

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

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL FUEGO Y PROTECCIÓN CONTRA INCENDIOS EN DIVERSAS TIPOLOGÍAS DE FACHADAS

María del Pilar Giraldo Forero

TESIS DOCTORAL

Director de tesis
Jaume Avellaneda Díaz-Grande
Dr. Arquitecto



Departamento de Construcciones Arquitectónicas I
Escuela Técnica Superior de Arquitectura
Universidad Politécnica de Cataluña

2012

A mis padres, Julio Ernesto y Myriam, a mi hermano César y a mi esposo Pau, por su constante e incondicional apoyo a lo largo de estos años.

Resumen

En una situación de incendio, la fachada del edificio es una de las vías más rápidas de propagación del fuego, representando un potencial peligro no solo para el edificio donde se origina el fuego, sino también para las edificaciones colindantes. Esta situación es más conflictiva en las tipologías de fachada ligera y en los muros cortina, debido al débil comportamiento termo mecánico de los elementos que los conforman. Algunos incendios han puesto en evidencia esta situación como el del Edificio Windsor de Madrid (2005) o del Mandarin Oriental Hotel de Pekín (2009). El objetivo de controlar la propagación del fuego en este segmento del edificio y minimizar a cotas aceptables su riesgo, ha sido y continúa siendo un reto para los profesionales, especialistas y los industriales del sector de la protección contra el fuego. Las disposiciones contempladas por el Código Técnico de la Edificación español (CTE) en referencia al control de la propagación exterior del fuego se perciben como insuficientes, genéricas y poco flexibles. La adaptación de estas disposiciones en los muros cortina ha dado lugar a detalles constructivos complejos, en ocasiones contradictorios, y en general ha condicionado el resultado final de los diseños de las fachadas. En los últimos años la seguridad contra incendios ha ido evolucionando hacia un campo más especializado e interdisciplinario. El CTE ha entrado en esta dinámica con la introducción del enfoque basado en prestaciones; este plantea que es posible proponer soluciones alternativas a las exigidas en los documentos básicos, siempre que se justifique técnicamente que aportan un nivel de seguridad equivalente o superior. Dicho enfoque permite mayor flexibilidad en el diseño de los edificios, sin poner en riesgo los niveles óptimos de seguridad contra incendios. En algunos países más avanzados en asuntos de seguridad este enfoque se aplica hace varios años, pero en España aún está empezando.

La presente investigación tiene por objeto el estudio de la propagación del fuego a través de las fachadas considerando fundamentalmente dos aspectos: el contexto normativo relacionado con el control de la propagación exterior del fuego y la influencia del diseño arquitectónico de las fachadas en la trayectoria del fuego.

Para abordar el primer aspecto se ha realizado un estudio exploratorio de las normativas de diferentes países con el propósito de determinar en qué punto se sitúa la normativa española. Se han estudiado con mayor detenimiento las normativas de países que son considerados referentes en materia de seguridad contra incendios como son EEUU, Reino Unido y Nueva Zelanda.

Para estudiar el segundo aspecto se ha realizado una fase experimental mediante técnicas de modelado y simulación computacional de incendios, para lo cual se ha empleado el modelo *Fire Dynamics Simulator* (FDS). Se han elaborado un conjunto de escenarios de incendio que representan los diferentes aspectos de evaluación. Todos estos se han recogido en un catálogo en el que se detallan las variables aplicadas en cada caso, algunas de estas son: las medidas estipuladas por el CTE, distintas configuraciones de ventanas, de elementos salientes y las cuatro tipologías de fachada propuestas en este estudio: fachadas convencionales, ventiladas, muros cortina y fachadas con elementos de control solar.

Dado que el fuego es un fenómeno destructivo, resulta económicamente inviable realizar ensayos para realizar un estudio de estas características, por tanto la simulación computacional de incendios ha sido una herramienta de gran utilidad en esta investigación. En algunos países como EEUU estas técnicas son implementadas para justificar estrategias de protección contra incendios ante los organismos competentes.

El estudio ha permitido extraer diferentes consideraciones y conclusiones sobre la gran influencia que ejerce el factor geométrico de las fachadas en el comportamiento y la trayectoria de fuego, lo cual lleva a reflexionar sobre la importancia del diseño arquitectónico como medida de protección pasiva frente al fuego.

Abstract

In the event of a fire, a building's facade is one of the ways in which fire spreads the quickest. This represents a potential risk not only for the building in which the fire has originated, but also for adjacent buildings. This situation is even more difficult in lightweight facades and curtain wall arrangements, due to the weak thermal behaviour of the elements that they are formed with. Some fires, such as that of the Windsor Building in Madrid (2005) and the Mandarin Oriental Hotel in Beijing (2009) have exposed this situation. The goal of containing the spread of the fire in this part of the building and minimizing the risk to acceptable levels has been and still is a challenge for professionals, specialists and industrialists of the fire prevention sector. The regulations laid out in the *Spanish Construction Technical Code* (Código Técnico de la Edificación or CTE) in relation to controlling external fire spread are deemed insufficient, generic and narrow. Adapting those regulations to curtain walls have prompted complex constructional details, which are contradicting at times, and which they have, in general, influenced the final result of facade designs. In the last few years fire prevention has evolved into a more specialised and interdisciplinary area. The CTE has entered into this dynamic by introducing a provision based approach. The Code suggests that it is possible to propose solutions other than those required in the basic documents; as long as they can technically justify that they offer an equivalent or superior security level. This approach allows for a higher flexibility in the design of buildings, without putting optimal fire prevention levels at risk. This approach has been applied in countries with more advanced safety standards, but in Spain it is only just starting.

This research aims to study the spread of fire through facades, considering two basic aspects: the regulatory context relating to the control of the external spread of the fire, and the influence the architectural design of facades has in the trajectory of fire.

To tackle the first aspect, an exploratory study has been carried out regarding the regulations of different countries to determine at which point the Spanish regulation stands. Regulations of countries which are considered a reference for fire prevention, such as the United States, United Kingdom and New Zealand, have been more thoroughly studied.

In order to study the second aspect, an experimental phase has been carried out with modelling and fire computer-simulation techniques, for which the *Fire Dynamics Simulator* (FDS) model has been used. A set of different fire scenarios has been

elaborated, representing the different evaluation aspects. All of the scenarios have been compiled in a catalogue detailing every variable applied on each case, some of which are: the measurements stipulated by the CTE, the different configurations of windows and outgoing elements and the four facade typologies proposed in this study: conventional facades, ventilated facades, curtain walls and facades with solar control elements.

Because fire is a destructive element, it is not possible to carry out tests to execute this type of study. Therefore, the fire computer simulation has been a very useful tool in this investigation. In some countries such as the United States, these techniques are implemented to justify fire prevention strategies before competent authorities.

The study has allowed for different considerations and conclusions to be drawn about the large influence the facades' geometric factor has in the behaviour and trajectory of fire, which leads to reflecting about the importance of the architectural design as a passive protective measure against fire.

Agradecimientos

No puedo empezar este apartado sino agradeciéndole a Dios, porque mi fe en Jesús me ha sostenido hasta el día de hoy, habiendo experimentado su fidelidad y amor cada día.

Quiero agradecer en primer lugar a mi director de tesis el Dr. Arq. Jaume Avellaneda por sus valiosas contribuciones para dar sentido a esta investigación, por su apoyo permanente, su paciencia y por creer en mi capacidad para llevar a cabo esta investigación. Su valía como profesional solo se ve superada por su calidad humana. También quiero expresar mi más sincero agradecimiento a la Dr. Ana Lacasta por su apoyo en la fase experimental de la tesis, su ayuda en los temas relacionados con la dinámica del fuego y el uso de las técnicas de modelado y simulación computacional fueron definitivos para desarrollar esta fase de la investigación. También le quiero agradecer el poner a mi disposición los equipos informáticos del Laboratorio del Fuego de la UPC.

Quiero agradecer de forma especial al INCAFUST, institución en la que trabajo actualmente en el ámbito de la investigación, por el apoyo recibido durante la fase final de esta tesis. Quiero agradecer en particular al ex presidente de la fundación Josep Ramón Mora y al actual presidente Albert Muntada. También quiero expresar mi más sincero agradecimiento al director Jordi Gené y a Anna Borrás por el apoyo y la confianza que pusieron en mí desde el primer día. A Vladimir Rodríguez por sus consejos sobre la estructura del documento y a Camila Burgos por su colaboración, compañerismo y apoyo. También agradezco a mis compañeros Ester Caballol, Eduard Correal y Marcel Vilches que han estado pendientes de que alcanzara esta meta.

Agradezco a todos los profesionales que de una u otra forma han contribuido con este trabajo. En particular quiero agradecer a los arquitectos Xavier Ferrés y Jordi Murtra por la información que amablemente me facilitaron. También al ingeniero Santiago Rovira y al arquitecto Ignacio Fdez. Solla por la información prestada, las valiosas conversaciones mantenidas y por su buena disposición para dedicar su tiempo a resolver mis inquietudes. También quiero agradecer al Ingeniero Juan Carlos López ex Jefe de Bomberos de Barcelona y miembro de APICI Asociación de Profesionales de Ingeniería de Protección Contra Incendios por la información suministrada, su tiempo y buena disposición para responder a mis interrogantes. A la arquitecta Natividad Casado asesora técnica del COAC Col·legi d'Arquitectes de Catalunya, porque sus oportunas aportaciones sobre la normativa de seguridad en caso de incendios supusieron un antes y un después en la fase inicial de mi investigación.

Agradecer la inestimable colaboración de la OPCI (Organización Iberoamericana de Protección contra Incendios), en particular de su presidente Jaime Moncada y su directora Aneth Calderón, quienes me abrieron las puertas de la biblioteca de su organización para mi estudio. La erudición del doctor Moncada y su vasta experiencia en el campo de la protección contra incendios a nivel internacional van de la mano de su simpatía y amabilidad. Agradecerle especialmente el confiar en mí para participar con mi tema de investigación en el Congreso Internacional de Protección Contra Incendios celebrado en Bogotá, Colombia en mayo de 2011. También quiero agradecer al Ingeniero Antonio Macias, Director de la National Fire Protection Association para México, Centroamérica y el Caribe por su amable acogida durante mi visita a la ciudad de México, y la valiosa información suministrada en relación a la normas de la NFPA.

Agradezco a la empresa Thunderhead Engineering por concederme una licencia de uso temporal del programa PyroSim para llevar a cabo el modelado de los escenarios que conforman la fase experimental de este estudio.

Un especial agradecimiento a mi esposo porque su amor, su paciencia y su apoyo han sido definitivos para llegar a esta meta que me tracé años atrás y que por momentos parecía imposible de alcanzar. Gracias a mis padres y hermano quienes a pesar de la distancia han estado allí de forma incondicional, siempre atentos a cualquier situación de mi vida y en especial de todo este proceso que ha comprendido la elaboración de la tesis. A mi familia en Colombia, a mis queridos primos y primas. Especial agradecimiento a mi prima Alexandra “La flaca” porque pese a estar tan lejos ha sido una compañía siempre cercana y oportuna, una amiga incondicional, interesada en apoyar mis metas personales y profesionales. A mi prima Naima por su colaboración en la revisión del documento. A todos mis amigos en Bogotá y en Barcelona a quienes por muchos años he agobiado con un mismo discurso enfrascado en mi tesis y por la falta de tiempo que supone redactar este documento. A los amigos del doctorado con quienes he compartido bonitas experiencias durante todos estos años. Un especial agradecimiento a todos los amigos de La Viña ciudad Condal, por su preocupación y sus oraciones.

También quiero agradecer a la Escuela Técnica Superior del Vallès y en particular al Departamento de Construcciones Arquitectónicas I por cederme temporalmente un ordenador para sacar adelante parte de los cálculos de mi fase experimental y reservarme una mesa de trabajo. No quiero dejar de mencionar y agradecer al grupo de “compañeras del Vallès”, quienes durante una larga temporada han seguido mi proceso de tesis con interés. A Silvia, Anna P, Anna C, Aline y en especial a Maru, siempre pendiente y aportando todo su entusiasmo.

Resumen	III
Abstract	V
Agradecimientos	VII

ÍNDICE

CAPÍTULO 1: OBJETO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1	Introducción	3
1.2	Objetivos	6
1.3	Metodología	7
1.4	Estructura y contenidos de la investigación	8

CAPÍTULO 2: PLANTEAMIENTO DEL TEMA

2.1	Antecedentes y estado del arte	13
2.2	Consideraciones sobre la seguridad contra incendios	34
2.3	La propagación del fuego a través de las fachadas	35
2.4	Casos de incendio con propagación del fuego a través de las fachadas	43
2.4.1	Hotel Mandarin Oriental, Pekín	44
2.4.2	Edificio Windsor, Madrid	45
2.4.3	Edificio Torre Central, Caracas	47
2.4.4	Edificio One Meridian Plaza, Philadelphia	48
2.4.5	Edificio First Interstate Bank, Los Ángeles	49
2.4.6	Edificio Andraus Building, Sao Paulo	50

CAPÍTULO 3: CONTEXTO NORMATIVO

3.1	Introducción	57
3.2	Objetivos de las normas de seguridad contra incendios	57
3.3	Evolución de las normas de seguridad contra incendios en España	60
3.4	La entrada en vigor del CTE y la armonización europea	66
3.5	El control de la propagación exterior del fuego según el CTE	78
3.5.1	Disposiciones contempladas en el Documento Básico SI del CTE	87
3.6	Comparativa de normas de diferentes países	98
3.6.1	Contexto normativo europeo	100
3.6.2	Normativa de países referenciales	108
3.7	Más allá de los códigos prescriptivos	129
3.7.1	Diseño basado en prestaciones	129
3.7.2	Estrategias de protección contra incendios	131
3.8	Casos de estudio	134
3.8.1	London City Hall	136
3.8.2	Parc de la Recerca Biomèdica de Barcelona	144
3.8.3	Edificio Mare Nostrum, Barcelona	149
3.8.4	Edificio Génova, Madrid	152
3.9	Conclusiones parciales	154

CAPÍTULO 4: PROPAGACIÓN EXTERIOR DEL FUEGO

4.1	Introducción a la dinámica del fuego	165
4.1.1	El fuego y el incendio	165
4.1.2	Fases del incendio	168
4.1.3	Mecanismos de transferencia de calor	171
4.1.4	Carga de fuego	173
4.1.5	Velocidad de cesión del calor <i>HRR</i>	174
4.1.6	Factores que afectan el desarrollo del incendio	175
4.2	Propagación del fuego en la edificación	184
4.3	Propagación vertical del fuego	185

4.4	Propagación del fuego a través de las fachadas	189
4.4.1	Propagación del fuego a través de las ventanas o efecto <i>leap frog</i>	191
4.4.2	Propagación del fuego a través de la cavidad en el encuentro del forjado y la fachada	192
4.4.3	Propagación del fuego a través de las cámaras ventiladas	195
4.4.4	Propagación del fuego a través de los revestimientos combustibles	197
4.5	Efecto de la configuración geométrica de las fachadas	198
4.5.1	Geometría de las ventanas	202
4.5.2	Comportamiento del penacho de fuego	205
4.6	Efecto chimenea	208
4.7	Comportamiento de los materiales frente al fuego	210
4.7.1	Efectos del fuego en algunos materiales de construcción	215
4.8	Propagación de la llama	225

CAPÍTULO 5: INTRODUCCIÓN AL MODELADO Y LA SIMULACIÓN COMPUTACIONAL

5.1	La simulación como instrumento de aproximación a la realidad	233
5.1.1	El modelo de simulación	237
5.2	Consideraciones sobre el uso del modelado y la simulación computacional	242
5.3	Tipos de modelos de simulación	247
5.4	Introducción al modelado y simulación computacional de incendios	253
5.4.1	<i>Fire Dynamics Simulator</i> FDS	263
5.5	El modelado y simulación computacional de incendios como instrumento de evaluación	269
5.5.1	Fases del proceso de modelización	273

CAPÍTULO 6: FASE EXPERIMENTAL: Implementación de técnicas de simulación computacional de incendios en los tipos de fachadas propuestos

6.1	Introducción	283
6.2	Definición de los criterios de análisis	286
6.3	Fichas descriptivas de los aspectos a evaluar	292
6.4	Descripción del dominio computacional y de los escenarios de incendio	308
6.5	Análisis e interpretación de los resultados	325
6.5.1	Configuración geométrica de las fachadas	327
6.5.2	Elementos constructivos de las fachadas	369
6.5.3	Factores climatológicos	404
6.6	Síntesis de la fase experimental	416
6.7	Terminología usada en los análisis	439

CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES GENERALES DE LA INVESTIGACIÓN

7.1	Conclusiones finales del estudio	447
7.2	Futuras líneas de investigación	458

EPÍLOGO: REFLEXIONES PERSONALES	461
--	-----

Glosario	465
-----------------	-----

ANEXO 1. Archivo sobre casos de incendios (formato digital)

ANEXO 2. Datos adicionales sobre las normativas internacionales de protección contra incendios en relación al control de la propagación exterior del fuego (formato digital)

ANEXO 3. Ficha de productos y soluciones de protección contra incendios para fachadas ligeras (formato digital)

ANEXO 4. Muestra de vídeos breves de las simulaciones (formato digital)

1

OBJETO DE LA INVESTIGACIÓN



1.1 Introducción

La propagación del fuego a través de las fachadas es considerada una de las vías más rápidas de difusión del incendio en la edificación. El fuego que emerge a través de las ventanas desde un recinto en llamas constituye un peligro potencial para las plantas superiores del propio edificio y también para los edificios colindantes. El contacto permanente con el oxígeno del aire, el viento y la verticalidad misma de la superficie de la fachada son factores que favorecen la dinámica del fuego.

La propagación exterior del fuego puede ocurrir por diferentes vías, la más común es a través de las ventanas mediante de un mecanismo denominado efecto *leap frog* (salto de rana), por tanto cualquier fachada, independientemente de su tipología o de los materiales que la constituyan puede servir de ruta de propagación del fuego. No obstante, la relación con el incendio es más conflictiva en las tipologías de fachada ligera y en los muros cortina debido al débil comportamiento termomecánico de los elementos que los conforman.

El peligro asociado a la propagación del fuego a través de las fachadas se ha hecho evidente a causa de numerosos casos de incendio tales como: el del Hotel Mandarin Oriental de Pekín (2009), el del edificio Windsor de Madrid (2005), el del edificio Torre Central de Caracas en Venezuela (2004), el del One Meridian Plaza de Philadelphia en EE UU (1991), entre otros. Algunos incidentes de este tipo han propiciado la revisión de las normas de protección contra incendios locales y estatales, tal ha sido el caso del incendio del One Meridian Plaza de Philadelphia, a partir del cual se revisaron diversos aspectos de la normativa en algunos estados de EEUU, estableciendo normas más estrictas sobre el uso de rociadores automáticos. Estos casos de incendio, debido a su magnitud y a que han tenido lugar en edificios de gran altura, han alcanzado cierto nivel de notoriedad. No obstante, llega a ser inquietante el número de incendios que ocurren en edificios residenciales, de los cuales sólo se tiene conocimiento por las estadísticas realizadas por organismos como la USFA (*U.S Fire Administration*).

El objetivo de controlar la propagación del fuego en este segmento del edificio y minimizar a cotas aceptables su riesgo, ha sido y continúa siendo un reto para los profesionales, especialistas y los industriales del sector de la protección contra el fuego. La falta de directrices de carácter normativo en relación al control de la propagación exterior del fuego ha sido una constante en el panorama de la protección

contra incendios en España. Las disposiciones contempladas en el documento básico (DB) de seguridad contra incendios (SI) del Código Técnico de la Edificación (CTE) en referencia al control de la propagación exterior del fuego no presentan diferencias sustanciales respecto a las contenidas en su norma predecesora, la NBE CPI 96, lo cual refleja que en este aspecto no se ha avanzado en varios años. Dichas medidas estipuladas por el CTE se perciben como insuficientes, genéricas y poco flexibles. No aluden a ninguna tipología constructiva de fachadas y por ende no hacen referencia a los requerimientos particulares de las fachadas ligeras.

Los mayores inconvenientes se presentan con la medida exigida para aportar resistencia a la fachada como elemento que limita un sector de incendios. La norma determina una franja resistente al fuego de 1 m (como mínimo) como separación vertical de una planta a otra. Esta medida en términos constructivos es acorde con las tipologías de fachada convencional, por tanto su aplicación no supone dificultades técnicas ni estéticas. Sin embargo, en las fachadas ligeras y en particular en los muros cortina, su adaptación ha dado lugar a detalles constructivos complejos, en ocasiones contradictorios, que condicionan notablemente el resultado final de los diseños de las fachadas. A esto se suma la dificultad que supone determinar el nivel de efectividad que esta medida de protección puede aportar a los muros cortina teniendo en cuenta su débil comportamiento frente al fuego. La imposición de requerimientos tan genéricos como este puede dar lugar a situaciones de riesgo derivadas del diseño de las fachadas, si se tiene en cuenta que el fuego es un fenómeno complejo que puede variar en función de diferentes factores, entre otros: la configuración geométrica de las fachadas, el tamaño de las ventanas, el viento, etc.

La entrada en vigor de CTE, aunque tiene una lectura prescriptiva en sus documentos básicos, ha dado un paso importante con la introducción del enfoque basado en prestaciones, lo que significa que es posible proponer soluciones alternativas a las exigidas en dichos documentos siempre que se justifique que aportan un nivel de seguridad equivalente. La adopción de este concepto es un reconocimiento al progreso continuo de la tecnología de la edificación y da un impulso al campo de la especialización.

El desarrollo de proyectos basados en este enfoque implica una menor dependencia de las normas prescriptivas y una mayor gestión interdisciplinaria en los proyectos. Una de sus mayores virtudes es que a través de este enfoque es posible respetar la singularidad del diseño de los edificios sin poner en riesgo los niveles óptimos de

seguridad contra incendios. Este concepto se ha ido consolidando con los años en países más avanzados en materia de seguridad contra incendios, algunos de estos son: EEUU, Reino Unido y Nueva Zelanda. En la actualidad, tanto sus normativas prescriptivas y funcionales como sus avances en ingeniería de protección contra incendios y su enfoque basado en prestaciones son considerados un referente a nivel mundial en este ámbito.

La presente investigación tiene por objeto el estudio de la propagación del fuego a través de las fachadas considerando fundamentalmente dos aspectos: el contexto normativo relacionado con el control de la propagación exterior del fuego y la influencia del diseño arquitectónico de las fachadas en la trayectoria del fuego.

Para abordar el primer aspecto se ha realizado un estudio exploratorio de las normativas de diferentes países con el propósito de determinar en qué punto se sitúa la normativa española. Se han estudiado con mayor detenimiento las normativas de los países de referencia en esta materia.

Para estudiar el segundo aspecto se ha realizado una fase experimental mediante técnicas de modelado y simulación computacional de incendios, para lo cual se ha empleado el modelo *Fire Dynamics Simulator* (FDS). Se han elaborado un conjunto de escenarios de incendio que representan los diferentes aspectos de evaluación. Todos estos han sido recogidos en un catálogo en el que se detallan las variables aplicadas en cada caso, algunas de estas son: las medidas estipuladas por el CTE, distintas configuraciones de ventanas, distintos tipos de elementos salientes y las cuatro tipologías de fachada propuestas en este estudio: fachadas convencionales, fachadas ventiladas, muros cortina y fachadas con elementos de control solar, en particular el sistema *brise soleil*.

Dado que el fuego es un fenómeno destructivo, resulta económicamente inviable realizar ensayos reales de laboratorio para llevar a cabo un estudio de estas características, por ello la simulación computacional de incendios ha sido una herramienta de gran utilidad en esta investigación. Estos instrumentos informáticos han avanzado exponencialmente en la última década, su capacidad para realizar estimaciones sobre el comportamiento del fuego en situaciones determinadas es cada vez mejor valorada. En países como EEUU, Canadá y Nueva Zelanda estas técnicas son implementadas para evaluar posibles escenarios de incendio y justificar ante los

organismos competentes aspectos relacionados con las estrategias de protección contra incendios en edificaciones singulares.

El estudio ha permitido extraer un importante número de consideraciones y conclusiones sobre la gran influencia que ejerce el factor geométrico de las fachadas en el comportamiento y la trayectoria de fuego, lo cual lleva a reflexionar sobre la importancia del diseño arquitectónico como medida de protección pasiva frente al fuego.

1.2 Objetivos

Esta investigación tiene los siguientes objetivos:

Objetivos principales

El objetivo general de la investigación es realizar una aproximación teórica y experimental a la problemática de la propagación exterior del fuego considerando el contexto normativo y dando especial atención a la influencia de los aspectos arquitectónicos involucrados.

Una parte importante de esta investigación se sustenta en la fase experimental que se realiza mediante técnicas de modelado y simulación computacional de incendios. Se pretende que los objetivos principales de la investigación sean alcanzados a través de esta fase del estudio. Los aspectos que se pretende esclarecer a través de esta fase experimental son:

1. La influencia del diseño arquitectónico de las fachadas en la propagación exterior del fuego.
2. La influencia de otros factores como el viento, la temperatura y la humedad relativa en la propagación exterior del fuego.
3. El nivel de protección que aportan las medidas contempladas por el CTE en su documento básico SI secciones 1 y 2 que hacen referencia a la propagación exterior del fuego.

Objetivos secundarios

1. Explorar la normativa de protección contra incendios de diferentes países, centrandó la atención en las medidas de control de la propagación exterior del fuego para determinar en qué punto se sitúa el contexto normativo español.
2. Conocer acerca de los nuevos enfoques y vías de evolución de las normas de seguridad contra incendios.
3. Establecer una base teórica sobre los procesos que intervienen en la propagación exterior del fuego para tener una mejor comprensión de la fase experimental realizada en esta investigación.
4. Establecer una base teórica relacionada con las técnicas de simulación computacional de incendios con el propósito de determinar los límites de la fase experimental de la investigación.

1.3 Metodología

La investigación que se presenta sigue una metodología estructurada en tres fases:

- (1) fase de formulación e identificación de la problemática.
- (2) fase de documentación de contenidos.
- (3) fase experimental y de análisis de resultados.

- (1) fase de formulación e identificación de la problemática.

La identificación de la problemática de la investigación ha estado determinada principalmente por la exploración de normativas de protección contra incendios de diferentes países y por entrevistas con expertos en ingeniería de fachadas, ingeniería de protección contra incendios y expertos en la dinámica del fuego.

- (2) fase de documentación de contenidos.

Esta fase ha requerido de la exploración de antecedentes y la investigación bibliográfica correspondiente. Se han consultado el siguiente tipo de documentos:

- Fuentes primarias
- Fuentes secundarias
- Artículos científicos

- *Proceedings* de congresos de protección contra incendios y de modelado y simulación computacional de incendios.

(3) fase experimental y análisis de resultados

La fase experimental se ha realizado según el siguiente esquema:

<ul style="list-style-type: none"> • Determinación de los aspectos de evaluación. 	Aplicación de variables considerando: -Medidas estipuladas por el CTE DB SI 1 y 2.
<ul style="list-style-type: none"> • Elaboración de los escenarios de incendio (Programa empleado PyroSim). 	-Configuración geométrica de las fachadas -Tipologías de fachadas: <ul style="list-style-type: none"> • Convencionales • Ventiladas • Muros cortina • Fachadas con elementos de control solar. • Factores climatológicos
<ul style="list-style-type: none"> • Procesos de calibración y prueba de los escenarios elaborados. 	
<ul style="list-style-type: none"> • Procesos de cálculo (programa implementado FDS <i>Fire Dynamics Simulator</i>) 	
<ul style="list-style-type: none"> • Obtención de resultados: -Cualitativos(programa implementado Smokeview) -Cuantitativos (curvas de datos numéricos) 	
<ul style="list-style-type: none"> • Análisis de resultados 	

1.4 Estructura y contenidos de la investigación

Esta investigación puede agruparse en tres grandes partes. Una primera parte formada por los capítulos 1, 2 y 3 en la que se plantea la estructura del estudio, la problemática y se explora el contexto normativo. Una segunda parte formada por los capítulos 4 y 5 en los cuales se configura un marco teórico en relación a los ámbitos del conocimiento vinculados con el tema en cuestión y los medios de experimentación, los cuales respectivamente son: la combustión y la dinámica del fuego, y la simulación computacional de incendios. Y la tercera parte formada por los capítulos 6 y 7 en los que se desarrolla la parte experimental del estudio, los análisis de los resultados obtenidos y se extraen las conclusiones y consideraciones derivadas de la fase experimental.

Primera parte: Estructura y problemática

El capítulo 1 plantea el objeto de estudio, el contexto de la investigación y los argumentos que la estructuran.

El capítulo 2 expone la peligrosidad de la propagación exterior del fuego con ejemplos de casos reales de incendios ocurridos en distintos lugares del mundo y cuyo punto en común es la propagación del fuego a través de las fachadas. Pone en evidencia la importancia de la seguridad contra incendios en la edificación y el papel de la fachada en la protección contra incendios. Revisa el estado del arte del tema, dando especial atención a los estudios científicos relacionados con la propagación exterior del fuego.

El capítulo 3 estudia la evolución de la normativa española de protección contra incendios y la problemática que plantea en el diseño de las fachadas la aplicación de las medidas estipuladas para el control de la propagación exterior del fuego. Se explora el contexto normativo de otros países, centrandose la atención en el ámbito normativo de tres países referenciales en materia de seguridad contra incendios, EEUU, Reino Unido y Nueva Zelanda. Finalmente examina el ámbito de las estrategias basadas en técnicas de ingeniería de protección contra incendios y la aplicación del enfoque basado en prestaciones, se corrobora la importancia de este enfoque en el ámbito del diseño arquitectónico mediante unos casos de estudio.

Segunda parte: Marco teórico

El capítulo 4 realiza un estudio descriptivo de los fundamentos de la combustión, la transferencia térmica y la dinámica del fuego. Se estudian aspectos generales sobre el comportamiento del fuego para centrarse posteriormente en la propagación del fuego a través de las fachadas.

El capítulo 5 se dedica a la temática de la simulación computacional. Realiza un recorrido por temas generales de la simulación. Posteriormente se centra en la simulación computacional de incendios y en particular en los modelos de campo de dinámica de fluidos a los cuales pertenece el modelo empleado para en la fase experimental del estudio.

Tercera parte: Fase experimental y análisis

El capítulo 6 realiza una introducción en la que se explica el alcance de los resultados de la fase experimental y los límites de la misma. Expone el método establecido para evaluar los diferentes aspectos planteados en el estudio mediante un catálogo de aspectos de evaluación. Realiza una explicación detallada de los escenarios de incendio realizados y de las variables aplicadas. Realiza un análisis en el cual se explican los resultados cualitativos y cuantitativos de los escenarios simulados. Finalmente realiza una síntesis que recoge los aspectos más relevantes de la fase experimental, en esta se explican varias de las aportaciones derivadas del estudio.

El capítulo 7 agrupa las conclusiones generales del estudio, las aportaciones de la investigación y propuestas de futuras líneas de investigación.

2

PLANTEAMIENTO DEL TEMA



2.1 Antecedentes y estado del arte

Esta investigación tiene como punto de partida la experiencia científica acumulada durante los últimos cincuenta años y que se ha basado en ensayos, desarrollo de métodos numéricos y conceptos en torno a la dinámica de propagación exterior del fuego. Estas investigaciones han configurado una sólida base del conocimiento que continua siendo de gran utilidad en la actualidad.

Durante la fase de investigación de fuentes bibliográficas se ha podido determinar que no hay investigaciones publicadas en España que relacionen el conjunto de temas que se tratan en este estudio. El comportamiento del fuego y la protección contra incendios es quizás el asunto menos explorado en relación a las fachadas de los edificios en comparación con otros aspectos técnicos, los cuales cuentan con un amplio número de publicaciones e información relacionada. La mayoría de los estudios de referencia sobre la propagación exterior del fuego han sido realizados por equipos de investigación de Canadá, Japón, Nueva Zelanda, EEUU, Finlandia o Reino Unido, entre otros.

Las primeras investigaciones sobre la propagación exterior del fuego fueron realizadas en los años 60 y 70 del siglo pasado. Diversos experimentos fueron llevados a cabo para observar el comportamiento de las llamas que emergen por las ventanas de un compartimento. Científicos como S. Yokoi, C. T. Webster, L. G. Seigel, o M. Law aportaron importantes datos para determinar las correlaciones que definen la altura, el tamaño y la temperatura de las llamas que emergen a través de las ventanas de un recinto en el que se desarrolla un incendio. Sus aportaciones han servido de base a lo largo de varias décadas en diferentes estudios relacionados con este tema.

A continuación se realiza un breve repaso del estado del conocimiento en este ámbito considerando los aportes más relevantes de algunos autores.

Uno de los primeros estudios realizados para determinar las distancias mínimas entre edificios con el propósito de prevenir la propagación del fuego desde un edificio a otro fue realizado en 1958 por el *National Research Council Canada*. Se llevaron a cabo una serie de experimentos en edificios a escala real situados en la población de Aultsville, por ello los experimentos se conocen con este nombre. Fueron conducidos por Shorter y McGuire y publicados por la NFPA en 1960. Los resultados derivados de este estudio fueron de gran interés. Uno de los objetivos más importantes era evaluar

el riesgo de propagación a los edificios vecinos considerando el flujo de calor por radiación emitido a través de las ventanas y la contribución del revestimiento combustible de la fachada. Los resultados indicaron que la radiación emitida desde el edificio ardiendo dependía en gran medida de las condiciones del viento; este aspecto resultó ser incluso más influyente que el material combustible del revestimiento. Las habitaciones dotadas con revestimientos combustibles alcanzaron una emisión de radiación de 167 W/cm^2 a través de las ventanas, mientras que las habitaciones dotadas con material inerte emitieron 84 W/cm^2 .

Unos años después M. Law (citada por Smith – Harmathy, 1978: 147) realizó ensayos en torno a este mecanismo de transferencia de calor determinando el flujo de calor por radiación emitido desde un recinto de $7,7 \times 3,7 \times 3 \text{ m}$ de altura y tres configuraciones diferentes en las aberturas de las ventanas según se aprecia en la Fig. 2.1.

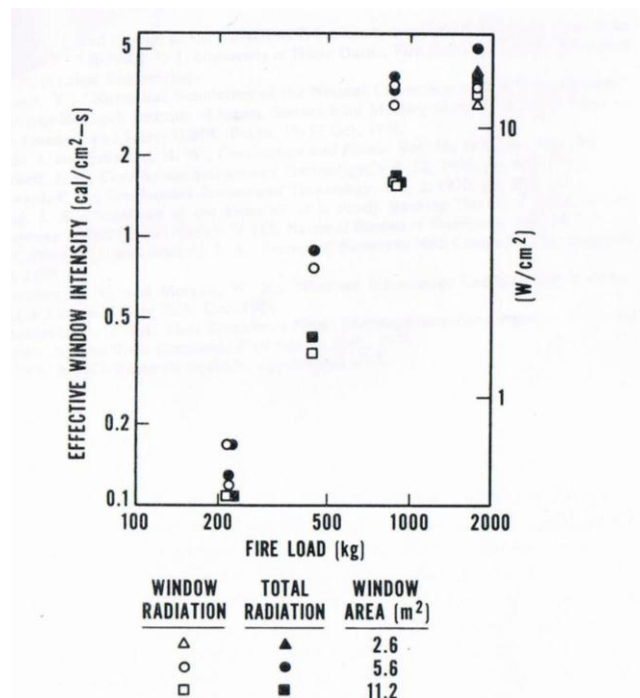


Fig. 2.1 Comparación de la radiación emitida por las llamas que emergen a través de las ventas (tres configuraciones distintas) de un recinto. M. Law (1978)
Fuente: Smith – Harmathy, 1978

Los resultados obtenidos por Law mostraron tan solo una pequeña contribución de la radiación emitida por las llamas emergentes sobre la parte superior de la ventana. Encontró que el aumento de material combustible en el recinto generaba un nivel mayor de radiación, igual que ocurrió en los ensayos de Aultsville; no obstante, con un flujo de radiación máximo muy lejano al observado en estos ensayos, el valor máximo obtenido por M. Law fue de 24 W/cm^2 . Los altos valores de flujo radiante obtenidos en

los ensayos de Aultsville se atribuyeron al efecto del viento y las condiciones de flujo forzado. La mayor aportación derivada de estos estudios fue el modelo de cálculo propuesto por M. Law para determinar las distancias de seguridad entre edificios a partir de un flujo máximo de $16,7 \text{ W/cm}^2$ y considerando la carga de fuego del recinto y las dimensiones de las ventanas. La influencia de la geometría del recinto y los efectos de viento serían tenidos en cuenta por ella en posteriores investigaciones.

McGuire (citado por Smith – Harmathy, 1978: 147) después de los ensayos de Aultsville realizó estudios sobre la propagación vertical del fuego y su relación con los materiales de revestimiento. Agrupó los materiales según dos tipos de comportamiento diferenciados: los que propagan con facilidad el fuego poco después de entrar en contacto con una fuente de calor y los que hacen una leve contribución a la propagación.

En Suecia los ensayos para probar aspectos relacionados con las fachadas se realizan desde hace muchos años. En 1958, Johannesson y Larsson (citados por Hakkarainen, 2002: 26) llevaron a cabo ensayos a escala real y escala de laboratorio para evaluar el uso de materiales combustibles de revestimiento en fachadas no portantes para edificios a prueba de fuego. Los resultados muestran la importancia de clasificar el uso de materiales y diseño estructural en función de la altura de los edificios.

S. Yokoi (1960) fue uno de los primeros expertos que estudió de manera pormenorizada los aspectos relacionados con la propagación exterior del fuego, sus trabajos y formulaciones han sido citados por numerosos autores. Buena parte de sus investigaciones las realizó basándose en ensayos a escala reducida. Utilizó tres escenarios de habitación distintos: el primero de $13,35 \times 3,5 \times 3,5 \text{ m}$, el segundo $4,3 \times 3,48, \times 2,47 \text{ m}$ y el tercero $5,0 \times 2,5 \times 1,67 \text{ m}$. Empleó alcohol como combustible. Sus investigaciones abarcaron distinto aspectos, entre los que consideró: la influencia de la geometría de las ventanas, la disposición de proyecciones horizontales (elementos salientes) y la presencia de paredes (planos) encima de las ventanas. Uno de sus objetivos principales era determinar la distancia vertical óptima entre las ventanas, la cual determinó a través:

$$\frac{z}{r_0} \text{ versus } \frac{\Delta T r_0^{5/3}}{\left(\frac{\dot{q}^2 T_0}{c_p^2 \rho^2 g}\right)^{1/3}} \equiv \ominus \quad [2.1]$$

Donde:

Z : distancia a lo largo de la trayectoria,

ΔT : aumento de la temperatura en z

T_o : temperatura ambiente

q : cantidad de energía por convección a través de la ventana

ρ : densidad del flujo de calor que emerge por la ventana

c_p : calor específico correspondiente, y

g : aceleración gravitacional

El radio equivalente de la ventana es dado por:

$$r_0 = \sqrt{\frac{hw}{2\pi}} \quad [2.2]$$

Donde:

H : altura de la ventana, y

W : es el ancho

Cabe resaltar los distintos aspectos considerados por Yokoi para determinar la distancia vertical o franja (resistente) entre las ventanas, teniendo en cuenta que este es un tema importante y recurrente dentro de la presente investigación.

Los modelos aportados por Yokoi no se centraron en la determinación de la altura de las llamas, sino en la distribución de las temperaturas de los gases calientes que emergen desde el recinto en llamas. Planteó las correlaciones que definen la trayectoria de este flujo de calor a partir de las dimensiones de la ventana considerando su promedio (ratio), el cual definió como:

$$n = 2w/h \quad [2.3]$$

Donde:

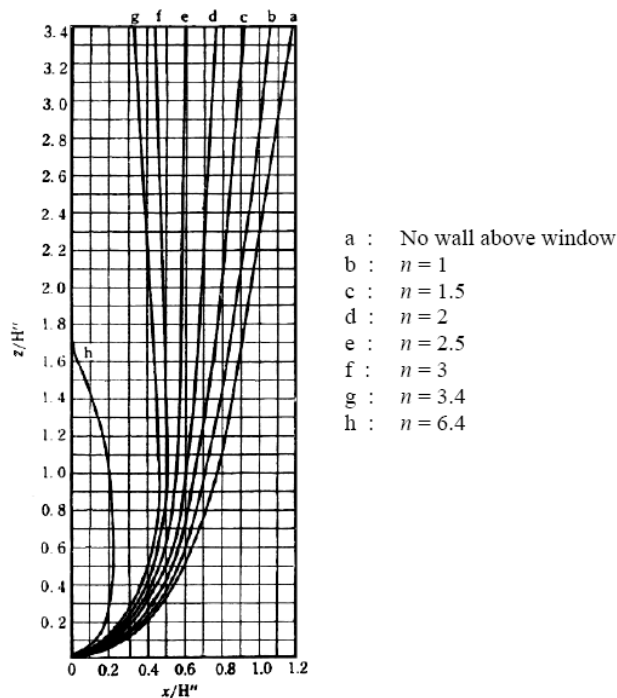
w : es el ancho de la ventana

h : es la altura

En referencia a este aspecto Yokoi encontró que para ventanas que son relativamente anchas, respecto a su altura, los gases calientes que emergen desde la ventana tienden a retornar sobre la fachada ciñéndose a ésta siempre que exista una superficie vertical sobre la ventana (plano de fachada). En ventanas altas y estrechas, con un “ n ” pequeño, las llamas se proyectan fuera de la fachada, luego su trayectoria asume una forma lineal por efecto de la convección. Según Yokoi, este comportamiento es similar al que ocurre en los casos en que no hay una superficie vertical sobre la ventana. Este leve efecto de proyección natural hacia el exterior aumenta en la medida que

disminuye el ancho de la ventana según se aprecia en el gráfico (Fig. 2.2). De acuerdo a sus experimentos, Yokoi determinó que las llamas proyectadas a través de una ventana ocupan las dos terceras partes de la zona superior de ésta. También observó que las temperaturas de los gases calientes son mayores cuando existe una superficie sobre la ventana, lo cual es la situación típica de propagación a través de las fachadas. Consideró que si la ventana ubicada arriba del recinto del incendio no se ve expuesta a temperaturas por encima de los 500°C, es posible prevenir la rotura de los vidrios, evitando la propagación del fuego a la planta superior.

Yokoi también realizó algunos ensayos para estudiar la capacidad de los elementos salientes para desviar la trayectoria del flujo de calor que emerge a través de las ventanas. Para ello consideró tres configuraciones distintas de ventanas y luego incorporó a las mismas un elemento saliente y observó las diferencias, se pueden apreciar en la Fig. 2.3. Se observa que las llamas tienden a ceñirse a la superficie a medida que aumenta el "n". No obstante, en cuanto se incorpora el elemento saliente las llamas son desviadas hacia el exterior. Yokoi comprobó que los elementos salientes reducen considerablemente la incidencia del flujo de calor sobre la fachada.



Donde:

n : es el promedio (ancho -alto) de la ventana $n=2w/h$

z : es la altura sobre el borde superior

x : es la distancia horizontal desde la apertura, donde la temperatura de los gases calientes es máxima

Fig. 2.2 Trayectoria de las llamas y gases calientes en función de diferentes configuraciones de las ventanas. Yokoi (1960).

Fuente: Goble, 2007

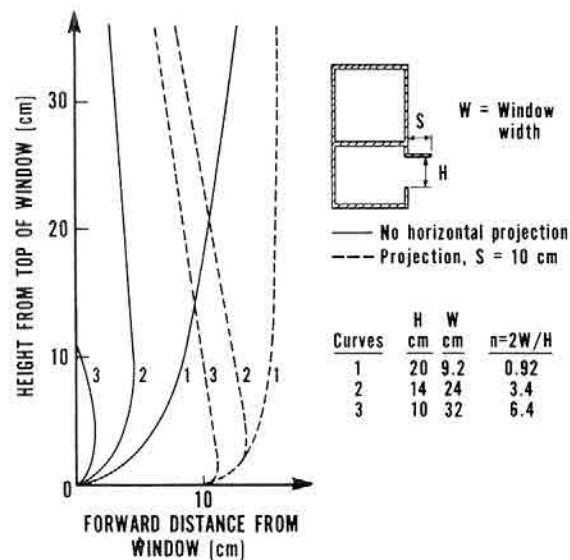


Fig. 2.3 Trayectoria de las llamas y los gases calientes en función de diferentes configuraciones de las ventanas y la disposición de un elemento saliente. Yokoi (1960).
Fuente: Smith – Harmathy, 1978

Yokoi confirmó posteriormente esta correlación mediante un experimento a escala real. De acuerdo a esos ensayos concluyó que el tamaño mínimo adecuado del elemento saliente era 74 cm, con el fin de desviar las llamas fuera de la fachada y reducir las temperaturas sobre la superficie.

Un trabajo posterior realizado por Moulen (1971) determinó que el tamaño óptimo para evitar el retorno de las llamas sobre la superficie era 140 cm. Otros experimentos realizados por Ashton and Malhotra (1960) (ambos citados por Smith – Harmathy, 1978: 151) les llevaron a concluir que una separación vertical de 90 cm o un elemento saliente de 60 cm eran suficientes para prevenir la incidencia de las llamas sobre la fachada. Es evidente que resultan muy dispares las conclusiones referentes a un mismo aspecto de estudio. Este tipo de dispersión en los resultados ha dado lugar a diversos comentarios por parte de algunos autores (citados más adelante), y suele atribuirse a las diferentes condiciones y criterios definidos en los distintos ensayos, los escenarios empleados, la fuente de energía empleada, etc.

Seiegel (1969) se centró en estudiar el tamaño de las llamas durante la descarga a través de las aberturas de un recinto. Se basó en un escenario de 3,05 x 3,66 x 3,05 m con aberturas que iban variando desde 0,90 x 1,80 m a 1,80 x 2,40 m. Su motivación fue considerar la incidencia del flujo de calor sobre estructuras de acero sin protección.

A partir de sus ensayos Seigel definió que en la punta de las llamas la temperatura era de 1000 °F (538 °C), y asumió este mismo dato a lo largo del eje central de las llamas. Utilizó un mismo rango de carga combustible en todos los experimentos empleando residuos de madera como combustible. En algunos de sus ensayos introdujo ventilación forzada y en base a estos experimentos pudo observar que los efectos de la flotabilidad y la mezcla de gases son menos significativos en condiciones de flujo forzado y que el comportamiento de las llamas tiende a ser tipo chorro.

Las investigaciones desarrolladas por M. Law tienen una gran importancia en este ámbito del conocimiento. Sus aportaciones han constituido la base para los modelos de cálculo que se aplican en la actualidad. Thomas y Law (1974) analizaron los resultados obtenidos por Yokoi (1960), Webster et al. (1964) y Seigel (1969) para determinar una ecuación que permitiera definir la altura de las llamas proyectadas desde la ventana de un recinto. En sus experimentos usaron diferentes cargas de fuego para evaluar la influencia de la carga de fuego en el tamaño y la altura de las llamas que emergen a través de las ventanas del recinto. Al igual que Yokoi, observaron que las ventanas estrechas generan penachos de fuego altos. Posteriormente la ecuación propuesta para describir la altura de las llamas fue ajustada por Law y O'Brien (1981). Esta ecuación modificada [2.4] fue publicada por sus autores en una guía de diseño y a partir de entonces fue recomendada y citada por distintos autores.

$$z + h = 12.8 \left(\frac{R}{w} \right)^{2/3} \quad [2.4]$$

Donde:

z: altura de la llama tomada desde la parte de arriba de la ventana

R: velocidad de combustión

h: altura de la ventana

w: ancho de la ventana

La R puede ser tomada como función de la carga de fuego L_v en una habitación con muebles combustibles.

La carga de fuego es la masa de combustible disponible en el recinto y se obtiene usando la densidad de carga de fuego, q (kgm^{-2}) y área del suelo de la habitación A_f (m^2).

Law (1978) y posteriormente Law y O'Brien (1981) desarrollarían lo que hasta hoy es el modelo de análisis más completo para describir la exposición al flujo de calor de una fachada como resultado de la propagación exterior de un incendio. El Eurocódigo 1 - Anexo B [1] es una adaptación del modelo de Law y es empleado actualmente en las

normas de diseño estructural contra incendios. Muchas de las correlaciones empleadas en el modelo derivan de distintos experimentos a escala real. El modelo considera escenarios bajo diferentes condiciones: ventilación con flujo natural (tiro no forzado) y tiro forzado, fuego controlado por la ventilación y fuego controlado por el combustible (ver apartado 4.1.6). En cada situación el comportamiento de las llamas respecto a las aberturas es muy diferente. En condiciones de flujo natural (Fig. 2.4) las llamas ocupan las dos terceras partes de la zona superior, tal como lo indicó Yokoi, y en condiciones de flujo forzado tienden a ocupar toda la ventana (Fig. 2.5). Posteriormente Law y O'Brien (1981) consideraron en las ecuaciones la incorporación de elementos salientes ubicados en la parte superior de las ventanas. Durante la investigación observaron que una proyección horizontal desvía la trayectoria de las llamas pero su eje central permanece. Una vez superado el elemento saliente las llamas tienden a recuperar su trayectoria previa adoptando una forma curvilínea (Fig. 2.6B).

El Modelo de Law se compone de dos secciones de cálculo principales: una dirigida a determinar el desarrollo de un incendio en un recinto que conduce a una propagación exterior a través de las ventanas, y otra a determinar la transferencia de calor a miembros estructurales de acero (ubicados en las inmediaciones de la fachada), con el propósito de establecer las temperaturas a las que se pueden ver sometidos dichos elementos. El flujo de calor que afecta a los miembros estructurales deriva de una combinación del calor radiado a través de las ventanas, del fuego del recinto, y de la transferencia de radiación y convección de las llamas que se proyectan por las ventanas. A su vez los elementos pierden calor a través del aire circundante.

El modelo de Law considera unos escenarios de geometría simple con ángulos rectos. La Fig. 2.7 ilustra los cuatro principales escenarios característicos y las respectivas definiciones de sus parámetros. Cada escenario considera una combinación de aberturas de ventana de diferentes formas y tamaños, en cada escenario hay al menos una abertura. Los parámetros que definen la geometría de los recintos son los siguientes: el ancho del recinto W (m) es tomado como la longitud de las paredes del recinto. El espesor de la pared es tomado como la profundidad D (m) y la altura del recinto que se toma desde el suelo hasta el techo es H (m). Las dimensiones de las aberturas se definen como w (m) y su altura h (m). En uno de los escenarios se considera un núcleo dentro del compartimento. Sus dimensiones se definen en relación a las caras de las paredes paralelas a éstas (Fig. 2.7D).

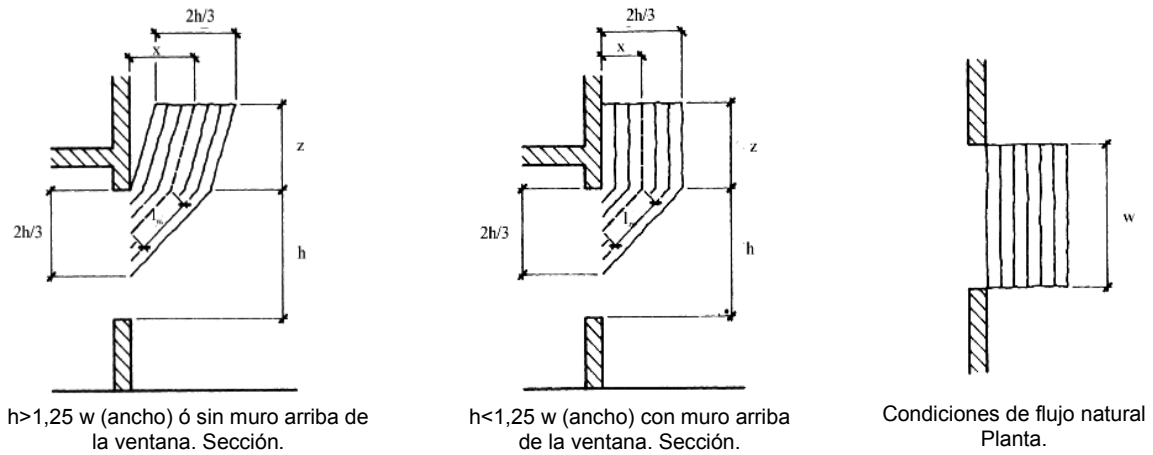


Fig. 2.4 Trayectoria de las llamas en condiciones de flujo natural. Law (1978).
Fuente: Nyuk, 2000

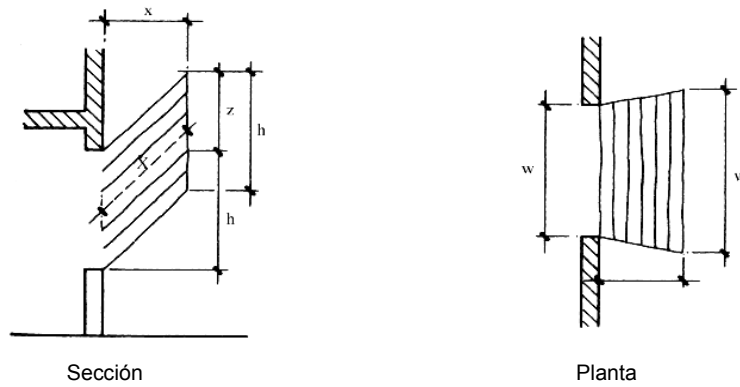


Fig. 2.5 Trayectoria de las llamas en condiciones de flujo forzado. Law (1978).
Fuente: Nyuk, 2000

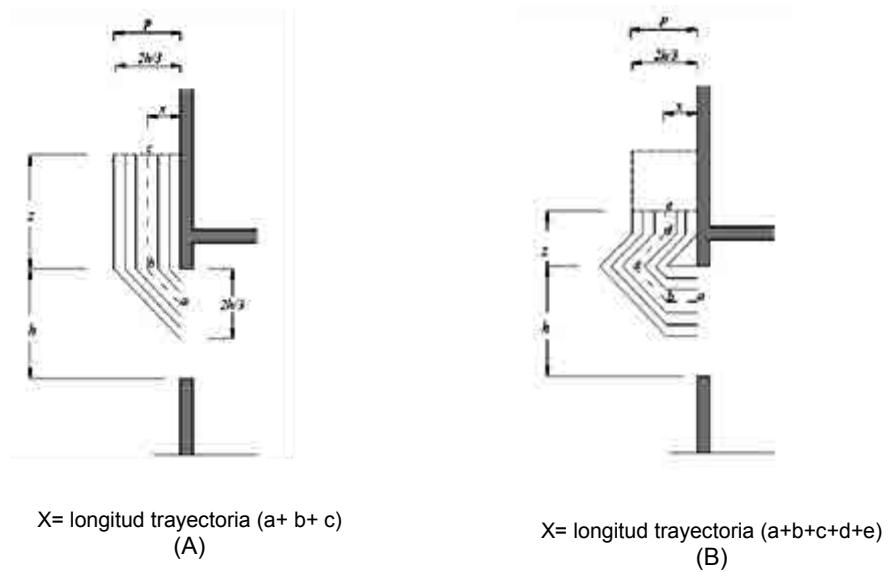
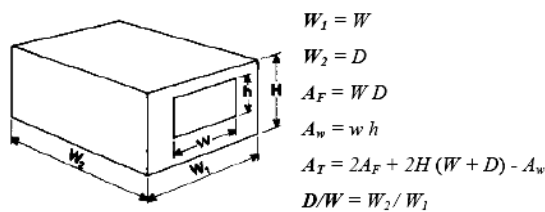


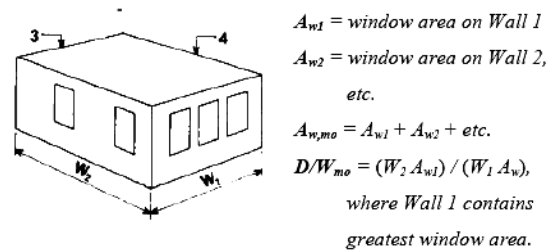
Fig. 2.6 Trayectoria de las llamas condiciones de flujo natural.
(A) Sin elemento saliente (B) Con elemento saliente. Law - O'Brien (1981).
Fuente: Goble, 2007

Todos estos parámetros que definen la geometría de los recintos son usados para obtener otros parámetros, tales como: el área del suelo del recinto A_F (m^2), la suma del área de las aberturas A_W (m^2) y el área total del recinto A_T (m^2), la cual incluye las paredes, el suelo y el techo pero excluye el área de las aberturas. La proporción D/W también es un importante parámetro empleado en las correlaciones del modelo. Cuando el modelo de Law es utilizado en escenarios con características específicas, la definición de algunos de estos parámetros requiere ser modificada.

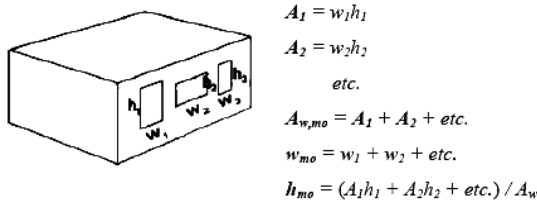
Los parámetros de cálculo para un escenario con una sola ventana se pueden apreciar en la Fig. 2.7A. En la Fig. 2.7B se observa un escenario con aberturas de diferentes formas. El total del ancho de aberturas W_{mo} es la suma de los anchos de cada abertura. El valor del área promedio de la altura H_{mo} es usado en distintos cálculos. Cuando se trata de aberturas ubicadas en más de una pared, como se aprecia en la Fig. 2.7C, el cálculo del área de apertura total sigue siendo la suma del área de cada abertura. Sin embargo, el área total de las aberturas de cada pared se utiliza para un valor ponderado de la proporción de profundidad y anchura del recinto D/W_{mo} . Cuando se trata de un recinto con un núcleo como lo muestra la Fig. 2.7D, el promedio de la profundidad y el ancho D/W_{mo} son también ajustados según el área de la superficie del suelo y el total de las superficies del recinto (Abecassis Empis, 2010: 42).



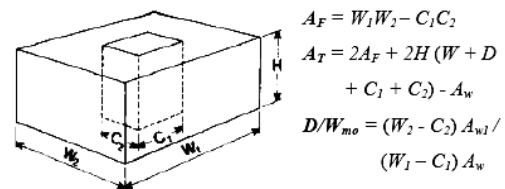
(A) caso básico



(B) ventanas en más de una pared



(C) varias ventanas



(D) recinto con núcleo

Fig. 2.7 Descripción de cuatro tipos diferentes de escenarios y definición de sus parámetros característicos mediante ecuaciones simples. Law – O'Brien (1989).

Fuente: Abecassis Empis, 2010

Los parámetros que se muestran en la Fig. 2.7 son usados para calcular el factor de apertura recíproca. Este factor tiene un significativo efecto en las condiciones del incendio de cada escenario. En este caso el factor de apertura η ($\text{m}^{-1/2}$) es definido como:

$$\eta = \frac{A_T}{A_w h^2} \quad [2.5]$$

El factor de apertura recíproca es la relación de la superficie sólida del recinto con respecto al factor de ventilación principal, es decir, el producto del área de apertura y la altura promedio de las aberturas del recinto. Aparte de las dimensiones de los escenarios y sus aberturas el único parámetro de entrada requerido es la carga del fuego L (kg). Este corresponde a un monto de combustible dentro del recinto, expresado en términos de cantidades equivalentes de madera cuya evolución respecto a la cantidad de calor generado es uniforme.

Pese a la enorme importancia que tiene el modelo de Law en la caracterización del fenómeno de la propagación exterior del fuego, presenta algunas limitaciones en su aplicación. Este modelo fue concebido como una herramienta para el diseño estructural, como un método para ayudar a determinar la temperatura que puede afectar a elementos estructurales de acero expuestos a un evento *post-flashover* con proyección de llamas hacia el exterior. Por ello se centra en el desarrollo del fuego en el recinto y en la transferencia de calor a un elemento estructural. La aplicabilidad de este modelo para determinar aspectos relacionados con la superficie de las fachadas y sus componentes requiere asumir distintos supuestos conservadores, lo cual limita su aplicación.

Abecassis Empis (2010) realizó un estudio pormenorizado del modelo de Law con el fin de determinar sus limitaciones y su aplicabilidad en distintos escenarios. Su investigación se apoyó por un lado en un ensayo a escala real: *Dalmarnock Fire Tests* (Fig. 2.8 y Fig. 2.9) llevado a cabo por la Universidad de Edimburgo; y por otro lado empleando técnicas de *Computational Fluid Dynamics* (CFD) (Fig. 2.10), en concreto los programas FDS y SOFIE. El ensayo permitió evaluar la aplicación del modelo de Law en un escenario de características reales, con un contenido de muebles convencionales. Este aspecto fue muy interesante en la investigación debido a que el tipo de combustible y su distribución son factores de gran influencia en el desarrollo de un incendio en un recinto. A diferencia del modelo de Law, el cual asume una carga de

fuego uniformemente distribuida, el uso de modelado y simulación computacional permitió evaluar, de forma cualitativa más que cuantitativa, el efecto de las variaciones de carga de fuego en el recinto. Se consideraron diferentes ubicaciones del material combustible respecto a las ventanas, lo cual puede tener un efecto notable en el flujo de calor proyectado hacia el exterior. En este sentido las técnicas de modelado y simulación computacional de incendios proporcionan una representación fiable del transporte de los productos de la combustión.

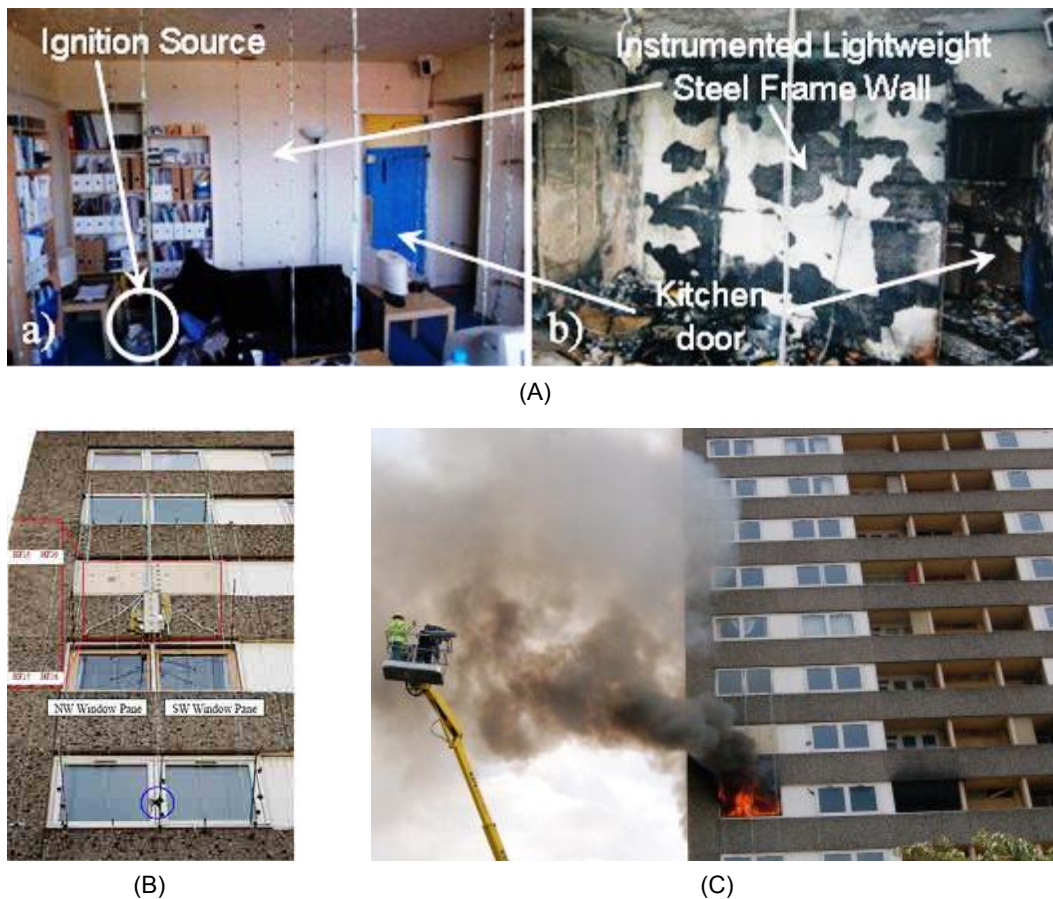


Fig. 2.8 Imágenes del ensayo a escala real *Dalmarnock Fire Tests (2006)*.
 (A) Recinto antes y después del ensayo (B) Termopares sobre la fachada
 (C) Penacho de fuego proyectado hacia el exterior.
 Fuente: Abecassis Empis, 2010 - <http://www.see.ed.ac.uk>

Abecassis Empis identificó distintas limitaciones de aplicabilidad del modelo de Law, derivadas todas ellas del carácter empírico de las correlaciones del modelo. Por tanto, si en un escenario dado no se definen las correlaciones precisas de acuerdo a sus características, el modelo puede dar lugar a representaciones poco realísticas del tamaño de las llamas y del flujo de calor sobre la fachada. También encontró que la carga de fuego es un parámetro clave en la determinación del flujo de calor sobre la fachada durante un incendio.

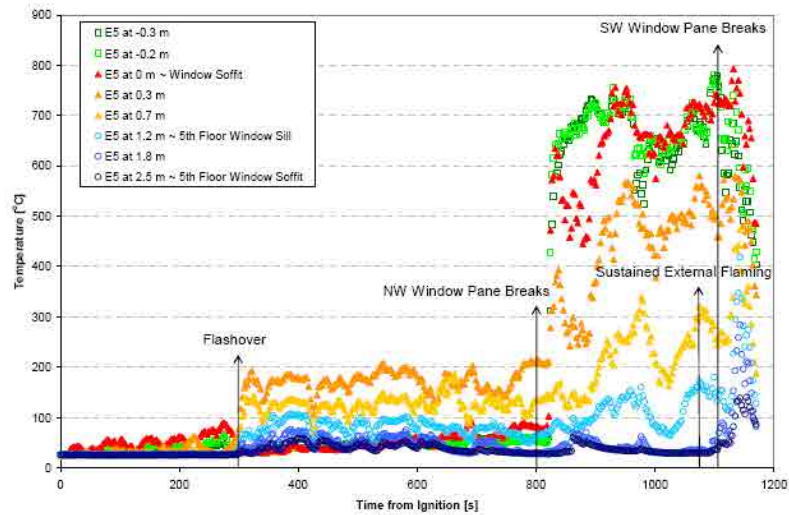


Fig. 2.9 Evolución de las temperaturas registradas por los termopares ubicados sobre la fachada. *Dalmarnock Fire Tests (2006)*.
Fuente: Abecassis Empis, 2010

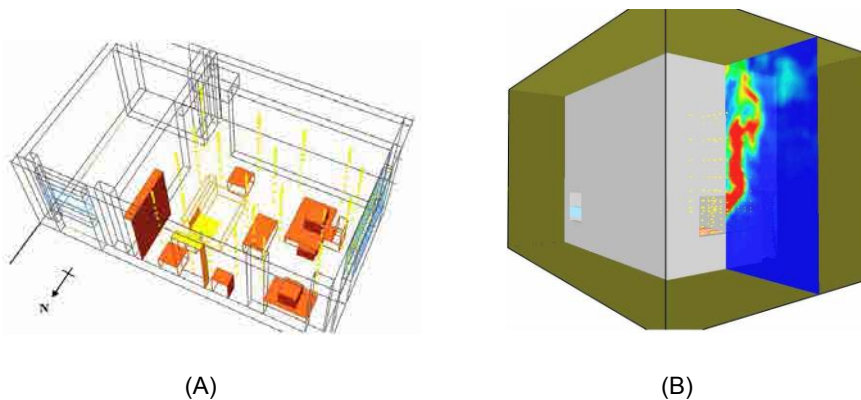


Fig. 2.10 Modelado del recinto de incendio *Dalmarnock Fire Tests (2006)*.
(A) Distribución del mobiliario y los termopares (B) Plano de distribución de las temperaturas mostrando el flujo de calor que se propaga hacia el exterior.
Fuente: Abecassis Empis, 2010

A partir de su investigación Abecassis Empis propuso un modelo de cálculo simplificado, el cual proporciona un método más rápido y sencillo para obtener una estimación de la distribución del flujo de calor sobre la fachada. En este modelo el flujo de calor incidente sobre el plano de fachada y la tasa de combustión están definidos por una correlación simple. La correlación propuesta para la distribución del flujo de calor en condiciones de flujo natural y régimen de fuego controlado por la ventilación es una simple función de la altura de la abertura. Para casos de flujo natural en régimen de fuego controlado por el combustible y para condiciones de flujo de ventilación forzada las correlaciones son una función de la carga de fuego del recinto.

El modelo simplificado es apropiado sólo para los escenarios que se encuentran en el rango $5-20 \text{ m}^{-1/2}$ del factor de la apertura recíproca, η . Por lo tanto, este aspecto debe ser considerado antes de implementarlo a un escenario determinado. El modelo simplificado es fácilmente aplicable a cualquier escenario dentro de sus límites de aplicabilidad, los cuales pueden eventualmente ser parámetros como: la geometría de los recintos y las aberturas, las condiciones atmosféricas, tales como la temperatura y el viento, e incluso, un flujo de ventilación forzada. La distribución del flujo de calor resultante se puede aplicar para evaluar las condiciones de diseño de distintos componentes de las fachadas, así como para identificar el riesgo de rotura de los vidrios debido a la incidencia del flujo de calor.

El error asociado con las expresiones se encuentra dentro del mismo rango de error considerado para el modelo de Law. El grado de desviación puede variar en función de las particularidades de cada situación y el nivel de riesgo. El margen de error que se aplique dependerá del criterio del ingeniero que define el diseño de protección frente al fuego (Abecassis Empis, 2010: 239-242).

Harmathy (1974) realizó diversas aportaciones en el campo de la protección contra incendios en la edificación. Con respecto a las fachadas sugirió la implementación de unos dispositivos metálicos de 1 m ubicados sobre las ventanas que servirían de deflector de las llamas. Además previó que mediante un mecanismo simple estos dispositivos podrían caer sobre la ventana cerrándola y evitando así la propagación del fuego por efecto *leap frog* (salto de rana) (Fig. 2.11A). Harmathy resalta la importancia de las dimensiones de los elementos salientes de profundidad (al menos 1 m) y de ancho (al menos el ancho de la ventana + 1,20 m) para que cumplan efectivamente su función de deflector.

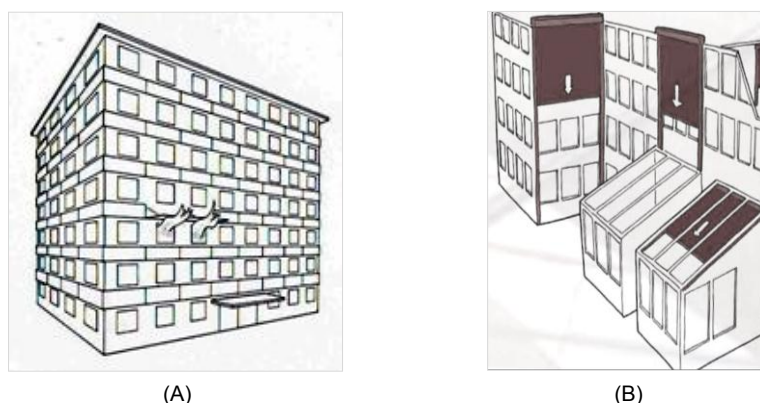


Fig. 2.11 (A) Deflectores manuales propuestos por T.Z. Harmathy.
 (B) Una propuesta similar en versión actual mediante un textil cortafuegos.
 Fuente: (A) Harmathy, 1978 (B) Estoebich sistemas cortafuegos

Oleszkiewicz (1991) realizó aportaciones muy importantes en diversos aspectos relacionados con el comportamiento del fuego durante una situación de propagación a través de las fachadas. En uno de sus ensayos a escala real usó un módulo de tres plantas de 6 x 4,5 m y 10,3 m de altura con una ventana de 2,60 m de ancho por 1,37 m de alto. En este estudio observó el comportamiento de la separación vertical (franja) en relación a diferentes profundidades de elementos salientes (aleros) de 0,30, 0,60, y 1,0 m. Aplicó diferentes velocidades de cesión del calor *HRR* (*Heat Release Rate*) 5,75 MW y 6,9 MW, consideradas “típicas” en habitaciones de estas características y con una carga de fuego estimada de 25 kg/m². De acuerdo a los resultados concluyó que los aleros de 0,30, 0,60 y 1,0 m reducen la exposición térmica respecto a la franja en un 50%, 60% y 85% respectivamente. También indicó que la franja no era un medio de protección práctico contra las llamas que emergen desde las ventanas. Para reducir en un 50% la exposición térmica mediante una franja vertical sería necesario que ésta fuera de al menos 2,5 m de altura.

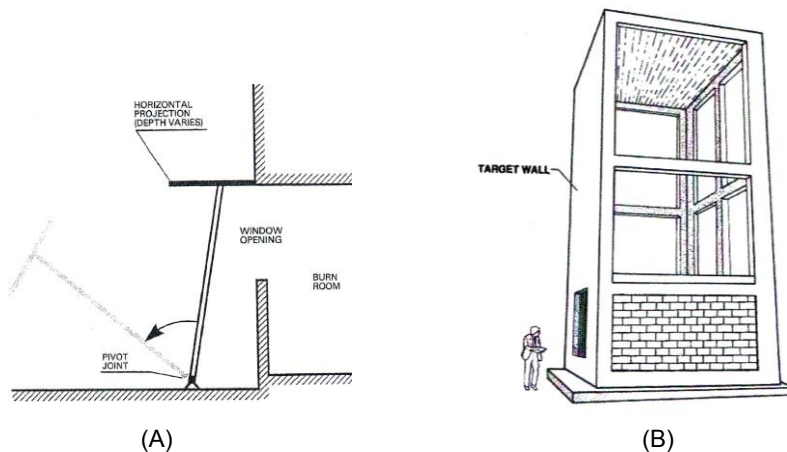


Fig. 2.12 (A) Dispositivo empleado para incorporar los elementos salientes en los ensayos.
(B) Módulo de ensayos de 3 plantas.

Fuente: Oleszkiewicz, 1991

Oleszkiewicz (1990) en otro estudio se centró en el análisis de la transferencia de calor del penacho de fuego sobre la superficie de la fachada. Señaló tres importantes factores que influyen en el nivel de exposición térmica de la superficie: (1) la velocidad de cesión del calor *HRR* del recinto, (2) las dimensiones de las ventanas y (3) la geometría de la fachada. Para analizar la influencia de la configuración geométrica de las ventanas realizó ensayos a escala real con diferentes tamaños y formas de ventanas (tabla 2.1). Encontró que las ventanas grandes propician mayor acoplamiento de las llamas sobre la superficie, mientras que las ventanas más pequeñas tienden a proyectar el penacho de fuego hacia el exterior, en consonancia con lo afirmado por Yokoi y posteriormente por Law.

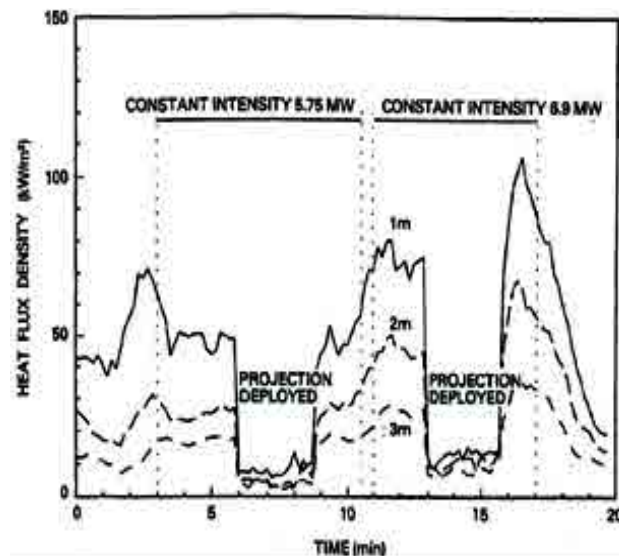


Fig. 2.13 Velocidad de sesión del calor (*HRR*) en tres alturas distintas de la fachada 1, 2 y 3 m arriba de la ventana, incorporando durante dos periodos (de 3 min aprox.) un alero de 1 m.
Fuente: Oleszkiewicz, 1991

Tabla 2.1 Datos de la velocidad de sesión de calor tomados a diferentes alturas y con diferentes configuraciones de ventanas.
Fuente: elaboración propia con datos de Oleszkiewicz, 1990

Window (W x H) (m)	Height above window (m)	Total heat flux density (KW/m ²) for heat release rate:			
		5.5 MW	9.9 MW	8.6 MW	10.3 MW
0.94 x 2.00	0.5	43.9	58.6	75.5	—
	1.5	12.4	17.7	25.9	—
	2.5	7.7	9.9	15.9	—
	3.5	3.9	5.1	8.1	—
0.94 x 2.70	0.5	19.2	34.8	53.2	68.3
	1.5	6.3	10.4	15.9	23.2
	2.5	3.5	6.0	9.8	13.7
	3.5	1.7	3.0	4.8	6.7
2.60 x 1.37	0.5	24.5	53.2	104.3	208.7
	1.5	22.9	33.1	58.6	122.4
	2.5	13.2	17.2	51.2	103.9
	3.5	11.5	15.6	28.3	56.5
2.60 x 2.00	0.5	10.5	17.4	29.5	43.4
	1.5	5.2	9.4	14.8	20.8
	2.5	4.5	7.4	12.6	16.3
	3.5	2.9	5.4	8.2	9.6
2.60 x 2.70	0.5	6.5	11.4	17.4	29.1
	1.5	2.9	5.3	8.1	12.8
	2.5	2.0	4.2	5.7	9.1
	3.5	1.4	2.9	3.6	5.6

Ondrus y Pettersson (1986) realizaron ensayos de diferentes sistemas de aislamiento térmico para fachadas. Los análisis se centraron en la evaluación del riesgo asociado a estos materiales durante la propagación del fuego a través de la superficie de la fachada y a través de las ventanas. Como resultado de los estudios fue formulado un documento técnico de criterios mínimos para los revestimientos. En la actualidad este criterio es aplicado a los productos ensayados mediante la SP FIRE 105, *Swedish Standard fire test of facades* [2].

Hokugo et al. (1999) estudiaron la propagación exterior del fuego en fachadas con balcones. De acuerdo a los resultados del estudio indicaron tres mecanismos de propagación del fuego a considerar: (1) propagación de un incendio desde el exterior a

través de la valla del balcón, (2) ignición de un material combustible en el balcón con posterior propagación vertical del fuego al resto del edificio y (3) propagación del fuego desde una planta baja del edificio.

Suzuki et al. (2000) llevaron a cabo un estudio sobre el efecto del tamaño de los balcones en la propagación del fuego a través de las ventanas. Para ello emplearon modelos de siete plantas a escala reducida 1/7. Observaron una importante relación entre la forma que adoptan las llamas y la configuración geométrica de la fachada, de manera que el tamaño de los balcones tienen gran influencia en la trayectoria de las llamas. Determinaron también que los balcones grandes pueden tener un efecto adverso en el recinto en el que se desarrolla el incendio debido a que dificulta la disipación térmica del recinto. Observaron que en estos recintos se alcanza con mayor rapidez el *flashover* o combustión súbita generalizada (ver apartado 4.1.2).

En Finlandia las investigaciones sobre la propagación exterior del fuego están muy relacionadas con las fachadas de madera. Los estudios llevados a cabo por Kokkala et al. (1997) y Hakkarainen et al. (1997) (citados por Hakkarainen, 2002: 26) han constituido la base de la primera versión de la norma ISO/FDIS 13785-1 [3] de ensayos a mediana escala para reacción al fuego en materiales aplicables a las fachadas.

Klopovic y Turan (2001) llevaron a cabo una serie de ensayos para investigar la probabilidad de propagación del fuego a través de las fachadas con revestimientos no combustibles. En la primera parte de la investigación analizaron los efectos de la ventilación sobre el penacho de fuego. Agruparon los distintos casos de ensayo considerados según las condiciones de ventilación aplicadas: tiro forzado y tiro no forzado. La segunda parte de la investigación se dedicó al análisis de la distribución de las temperaturas en la superficie de la fachada y los flujos de calor provenientes de las llamas que emergen de la ventana. Las características del penacho de fuego del modelo numérico y el experimental fueron comparadas. Los periodos de tiempo en los que ocurre la rotura de los vidrios y la transferencia de calor del penacho de fuego a la superficie también fueron analizados.

Lee, Delichatsios y Silcock (2006) estudiaron la influencia del tamaño del recinto de origen del incendio y el comportamiento de las llamas que emergen a través de las ventanas en una situación *post-flashover*. Usaron escenarios de distintos tamaños a escala reducida y emplearon como combustible propano y metano. Estudiaron también

la concentración de especies de los gases mediante un calorímetro de cono. Encontraron sustanciales diferencias en las temperaturas dentro del recinto en función del tamaño de éste. Los escenarios más grandes presentaron temperaturas bajas debido a la creciente pérdida de calor a través de los cerramientos. Verificaron que la expresión usada comúnmente para el límite de ventilación $1500 A\sqrt{H}$ representa consecuentemente la velocidad de liberación de energía en el interior del recinto.

Factor de apertura

El factor de apertura, también llamado por algunos autores parámetro geométrico de ventilación, define la correlación que existe entre el área y la geometría de la ventana, la cantidad de aire inducido al interior del recinto y el flujo de calor que emerge a través de ésta durante la proyección de las llamas hacia el exterior. El factor de apertura influye sobre la pérdida de masa combustible y la velocidad de cesión del calor HRR en el recinto.

Kawagoe (1958) (citado por Ee H. Yii et al. 2007: 212-213) fue el primero en proponer un modelo de flujo de viento para estudiar esta situación. Consideró un recinto de incendio con una mezcla equilibrada “*well mixed*” y un espacio exterior con una temperatura ambiente uniforme. Asumió los flujos de ventilación como impulsados por las fuerzas de flotabilidad y generadas a partir de la presión hidrostática producida por la diferencia entre los dos ambientes en reposo. Basado en ello, Kawagoe dedujo que el flujo de aire inducido en el recinto dependía poco de la temperatura (para temperaturas >500 K), y sí en gran medida de la geometría de la abertura de ventilación, la cual es caracterizada por el parámetro:

$$A_v \sqrt{H_v} \quad [2.6]$$

Este parámetro describe el aspecto físico de la ventilación a través de la ventana, donde: A_v (m^2) es el área de apertura de la ventana y H_v (m) es la altura de apertura de la ventana. Este factor ha sido utilizado en muchos modelos de cálculo y correlaciones. Permite calcular el monto de calor transferido por el penacho de fuego que emerge a través de la ventana y también la cantidad de aire que fluye al interior del recinto. Drysdale (1985) basado en el modelo de Kawagoe consideró que el flujo de aire inducido para tamaños moderados de ventana puede ser representado como:

$$\approx 0.5 \times A\sqrt{H} \text{ (Kg/s)} \quad [2.7]$$

El valor 0.5 es considerado como “coeficiente de ventilación”, que junto con la expresión $A_v \sqrt{H_v}$ describen la ventilación inducida a través de la ventana debido al arrastre del penacho de fuego que emerge a través de ésta. Dicha aproximación referente al flujo de viento ha sido considerada bajo la asunción de una mezcla equilibrada y una carga combustible distribuida uniformemente. Este modelo ha sido muy usado en el cálculo de incendios en recintos en fase de total desarrollo.

Thomas et al. (1967) (citado por Ee H. Yii et al., 2007: 213) realizaron estudios basados en este modelo de flujo de viento para evaluar la propagación exterior del fuego durante la fase *post-flashover*. Encontraron dos comportamientos de flujo de viento marcadamente distintos en recintos con ventanas pequeñas y con ventanas grandes. Indicaron que los flujos de ventilación en ventanas pequeñas son generados en su mayoría por las diferencias de presión hidrostática entre los gases calientes del interior y los fríos del exterior. En cambio, en las ventanas grandes los flujos de ventilación están dominados por pequeñas diferencias de presión asociadas al arrastre generado por el penacho de fuego. También concluyeron que el penacho de fuego proveniente de una ventana pequeña y una grande tienen un comportamiento distinto.

Según se indicó antes, Yokoi también consideró la importancia de la geometría de las ventanas en la trayectoria del penacho de fuego proyectado hacia el exterior y lo definió según la ecuación [2.3].

Investigaciones mediante técnicas de modelado y simulación computacional

Durante los últimos años el incremento de las prestaciones de los equipos informáticos y la disponibilidad de modelos de simulación especializados en la dinámica de los incendios ha contribuido al aumento de investigaciones que utilizan este tipo de técnicas. Algunas de estas investigaciones se han centrado en la propagación exterior del fuego.

Satoh y Kuwahara (1991) emplearon un modelo de dos zonas (bidimensional) para evaluar el efecto de los balcones ubicados en la parte superior de cada ventana de un edificio de varias plantas y el comportamiento de los gases calientes que entran a través de una ventana ubicada sobre el recinto del incendio. Corroboraron que el modelo no era válido para describir el arrastre del penacho de fuego en los bordes de los balcones. También observaron que se producía un efecto de “columna” entre el flujo de calor y la fachada con los balcones.

Galea et al. (1995) llevaron a cabo un estudio empleando modelos de dinámica computacional de fluidos (CFD) con el propósito de evaluar la distribución de los gases calientes que emergen a través de las aberturas de un recinto, basándose en los análisis realizados por Yokoi (1960). Los resultados mostraron que el eje central del penacho de fuego era desviado fuera de la fachada en una ventana estrecha, mientras que solo mostraba una leve desviación en una ventana grande. La velocidad de los gases también fue medida y se pudo apreciar que la salida de los gases calientes era mayor en la ventana estrecha y menor en la ventana grande.

Posteriormente Galea et al. (1996) llevaron a cabo otro estudio empleando el modelo CFD-FLOW3D. El objetivo en este estudio era evaluar el efecto de los elementos salientes en la propagación del fuego. Las dimensiones del módulo creado fueron 4 x 4,75 x 2,5 m, y el promedio (ratio) “ n ” de la ventana 9,1 (según la ecuación 2.3). Fueron evaluados tres escenarios: (1) sin elemento saliente, (2) con un elemento saliente de 0,5 m y (3) con un elemento saliente de 1 m. Los resultados mostraron que los elementos salientes minimizaron las temperaturas en la superficie de la fachada. En el escenario sin elemento saliente se pudo observar que las llamas al inicio están levemente separadas de la fachada y posteriormente se ciñen a ésta, lo cual coincide con las afirmaciones realizadas por Yokoi.

La investigación de Mammoser y Battaglia (2004) también se centra en la evaluación del efecto de los balcones en la propagación exterior del fuego y su efectividad para reducir las temperaturas sobre la superficie de la fachada. Tomaron como referencia los datos de los experimentos realizados por Suzuki et al. (2000) en modelos a escala 1/7. Para llevar a cabo este estudio eligieron el modelo de dinámica de fluidos FDS (Fire Dynamics Simulator). Al igual que Suzuki, consideraron un edificio de siete plantas cuyo escenario del incendio se ubica en la segunda planta. Las dimensiones del recinto son 0,93 x 0,57 m y 0,4 m de altura, con una abertura de 0,6 m de ancho y 0,27 m de alto (Fig. 2.14).

Analizaron cuatro configuraciones diferentes de balcones que incluían diferentes tamaños y tipologías (Fig. 2.15). Los resultados obtenidos permitieron apreciar un comportamiento diferenciado de la propagación del fuego y la distribución de las temperaturas en función de la configuración de los balcones. Los perfiles de temperatura exteriores mostraron una tendencia general acorde con los ensayos experimentales de Suzuki et al. (2000). Sin embargo las temperaturas registradas en

el interior del recinto en los ensayos fueron del orden de 90-150°C por encima de las obtenidas en la simulación computacional.

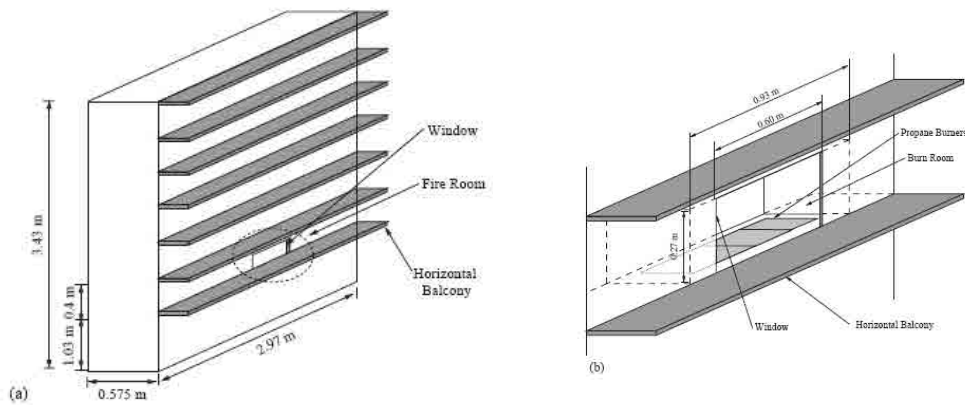


Fig. 2.14 Escenario utilizado para evaluar la propagación del fuego en un edificio con balcones.
Fuente: Mammoser – Battaglia, 2004

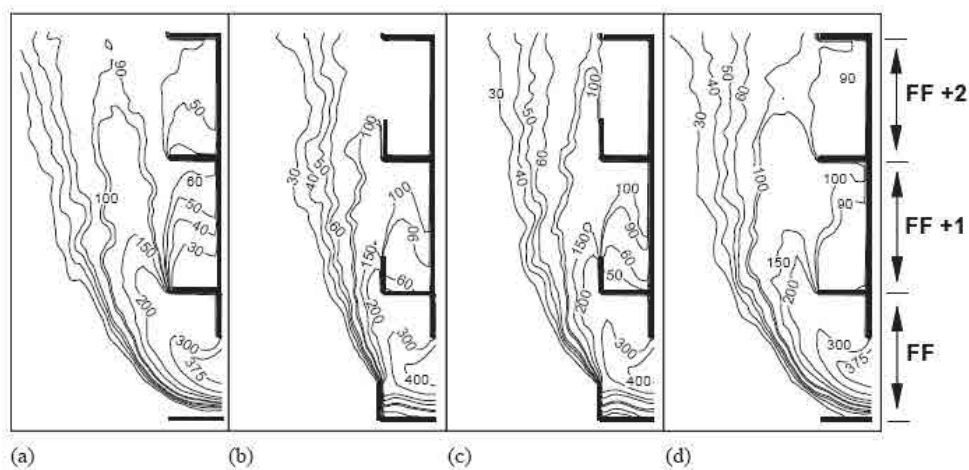


Fig. 2.15 Perfiles de temperaturas de 4 configuraciones de balcones.
Fuente: Mammoser – Battaglia, 2004

Los datos derivados de los diversos estudios científicos han ayudado a configurar una base sólida del conocimiento en el tema. No obstante algunos autores advierten sobre la dificultad de comparar datos o tomar como referencia estudios previos teniendo en cuenta la dispersión de los resultados [Mammoser – Battaglia 2004] [Lee et al. 2006]. Esto se debe a las diferentes condiciones de ensayo y criterios de análisis definidos por cada equipo de investigación, a lo que también hay que sumar la enorme complejidad del fenómeno del fuego y su comportamiento aleatorio frente a diversos factores.

2.2 Consideraciones sobre la seguridad contra incendios

La protección contra incendios (PCI) es una de las variables más complejas a resolver en la edificación. Alcanzar un grado de seguridad exigible a la edificación en caso de incendio consiste en garantizar la seguridad de sus ocupantes y del personal de rescate y extinción, reducir a límites aceptables el riesgo de daños de los bienes y de los edificios colindantes, así como facilitar las labores de extinción y acceso de los equipos de rescate. De forma ideal todas estas metas han de ser abordadas mediante estrategias de protección, en las cuales se combinan convenientemente medidas de protección relacionadas con la construcción del edificio (protección pasiva) o con instalaciones destinadas a intervenir frente al incendio (protección activa). En definitiva, el conjunto de medidas adoptadas dentro de una estrategia de protección son las que conducen a alcanzar la seguridad contra incendios en la edificación.

La seguridad contra incendios (SCI) en los edificios es un asunto complejo que engloba muchas variables a tener en cuenta desde la etapa de proyecto del edificio. La aplicación adecuada de medidas de prevención y protección dictadas por la legislación tendría que determinar los fundamentos para que el edificio esté dotado de los elementos suficientes para responder previsiblemente ante una situación de emergencia. No obstante, en la práctica no siempre es así. El enfoque de las normativas vigentes de seguridad contra incendios y los parámetros que traza en determinados sectores del edificio, como es el caso de la PCI de las fachadas, se presentan como insuficientes para abordar con solvencia la problemática del incendio.

La SCI en la edificación, al igual que otras disciplinas, ha tenido que replantear sus conceptos para adaptarse a los cambios planteados por el progreso tecnológico y la singularidad de los proyectos arquitectónicos. Los enfoques emergentes en materia de SCI se sitúan en un ámbito más especializado y más interdisciplinario en el cual la ingeniería de protección contra incendios se ha ido consolidando.

Existen países que han logrado despuntar en el ámbito de la SCI y por ello son considerados en la actualidad referente a nivel mundial. Este grupo de países está conformado entre otros por: Estados Unidos, Reino Unido, Nueva Zelanda, Australia, Canadá, Suecia y Japón. La manera de afrontar el problema del incendio en estos países es fruto de muchos años de concienciación, debates y reflexiones a partir de los incendios que figuran en su historia, muchos de ellos con desafortunados saldos de víctimas y grandes pérdidas materiales. En torno a ello ha ido creciendo una cultura

de SCI en la que intervienen factores de tipo cultural, educacional y legislativo. Por tanto, los progresos que se puedan alcanzar en este sentido dependen de cada sociedad, de su capacidad de establecer sus propios parámetros normativos o de adaptar a sus necesidades y contexto lo que en otros países más avanzados en materia de SCI funciona adecuadamente. En esta investigación se realiza un recorrido por las normativas de diferentes países, incluyendo algunos de los que se han mencionado como países de referencia, con el propósito de analizar su postura frente al problema de la propagación exterior del fuego.

2.3 La propagación del fuego a través de las fachadas

La fachada del edificio tiene una notable importancia cuando se declara un incendio, por un lado puede ser un punto de actuación para los equipos de emergencia, y por otro lado, puede servir de ruta para que el incendio se propague fácil y rápidamente. Esto último constituye la razón de ser de la presente investigación.

Algunos expertos señalan la propagación del fuego a través de las fachadas como unas de las causas más comunes y peligrosas de la propagación del fuego en la edificación [Patterson 1993], [Oleszkiewicz 1990], [Mammoser – Battaglia 2004]. Otras causas relevantes son: la falta de sectorización, los fallos en la sectorización y la propagación vertical a través de conductos, cajas de escaleras, ascensores y cavidades o grietas en la estructura del edificio. Aunque la propagación exterior del fuego es un asunto que merece atención, las investigaciones realizadas sobre este tema son notablemente más escasas que aquellas que abordan temas de incendios en recintos cerrados.

La propagación exterior del fuego en una edificación puede ocurrir a partir de un foco en el exterior del edificio, debido a la combustión de algún material (contenedor de basuras, mobiliario urbano, etc.) en las inmediaciones del edificio o debido a pavesas encendidas provenientes de una zona boscosa en llamas. A efectos de este estudio se considerará la situación en la cual el incendio ha tenido lugar en un recinto del propio edificio y se propaga hacia el exterior a través de las ventanas. Esta situación es la que ocurre con mayor frecuencia y estadísticamente la que reviste mayor peligro.

En un evento de propagación exterior del fuego se desarrollan complejos procesos convectivos. La mezcla de gases calientes y aire fresco, necesarios para la flotabilidad de las llamas, ocurre de forma natural en el perímetro de las fachadas. Cuando las

llamas emergen a través de las ventanas del recinto también tienen lugar diferentes procesos relacionados con la diferencia de presiones entre el interior y el exterior. Según se explica en la sección 4.1.6, la trayectoria, el tamaño y altura de las llamas dependen de diferentes factores, entre ellos la configuración geométrica de la fachada y la forma de las ventanas.

A partir de las formulaciones realizadas por Ingberg (1928), por mucho tiempo se determinó la peligrosidad de un incendio únicamente en función de la carga de fuego o carga combustible de los materiales. Con el tiempo la ciencia del fuego ha replanteado estos conceptos reconociendo la influencia en el desarrollo del incendio de otros aspectos como el factor de ventilación y el factor geométrico de los recintos, sin demeritar la influencia de la carga combustible. En la actualidad es ampliamente aceptado que la configuración geométrica, y en un sentido más amplio el diseño arquitectónico, tiene un efecto importante en el comportamiento del fuego. En las fachadas de los edificios el diseño involucra diversas variables de formas y tamaños en los distintos elementos constructivos que las conforman (Fig. 2.16).

A mediados de los años 60 del siglo pasado, los muros cortina comenzaban a ser una tipología de fachada ampliamente utilizada en diferentes países del mundo. Las posibilidades que brindó el desarrollo tecnológico y la evolución de las técnicas constructivas derivaron en diseños cada vez más homogéneos. En esa búsqueda por la levedad y la continuidad del material de revestimiento se diseñaron fachadas totalmente acristaladas, incluso en los frentes de los forjados, con una trama de montantes y travesaños cada vez más delgados (Fig. 2.17).

Cuando se construyeron los primeros muros cortina, denominados de primera generación, aún no existía una conciencia objetiva frente al problema del incendio en la edificación, por tanto, no se tuvo en cuenta el peligro que suponían las cavidades del perímetro de los forjados en su encuentro con las fachadas, la prueba de ello quedó plasmada en los detalles constructivos con los que se construyeron dichas fachadas (Fig. 2.17 – 2.18).



Diferentes formas y tamaños de ventanas



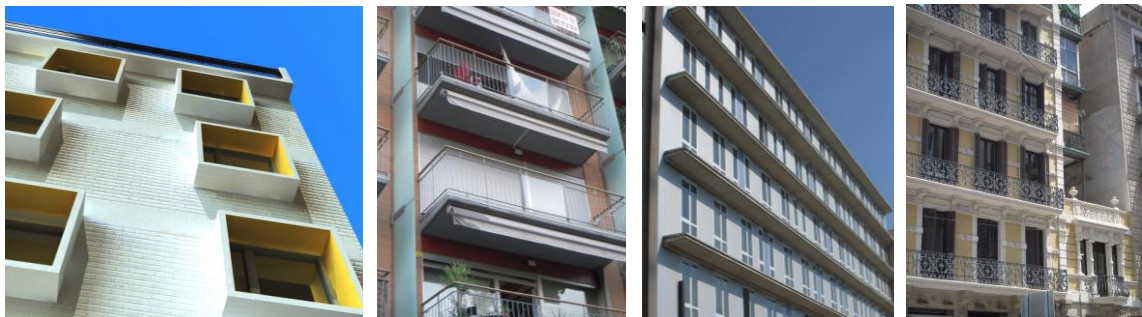
Diferentes tipos de elementos salientes



Configuraciones geométricas singulares



Elementos de control solar



Diferentes tamaños de elementos salientes

Fig. 2.16 La configuración geométrica está presente en el diseño de las fachadas de distintas maneras.
Fotos: P. Giraldo, 2008-2010 algunas imágenes de internet

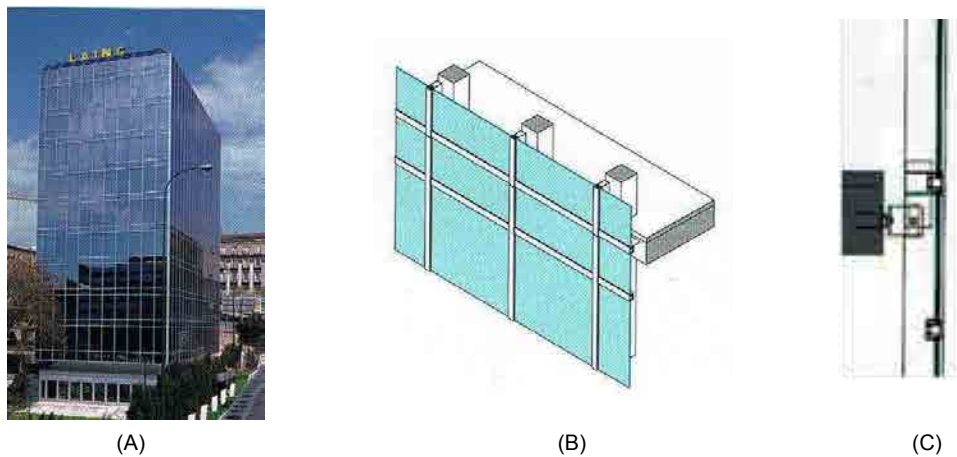


Fig. 2.17 Blackbird Building, J. Bosch Aymerich, Madrid, 1976.
 (A) Fotografía (B) Vista isométrica (C) Sección vertical
 Fuente: Paricio, 2010

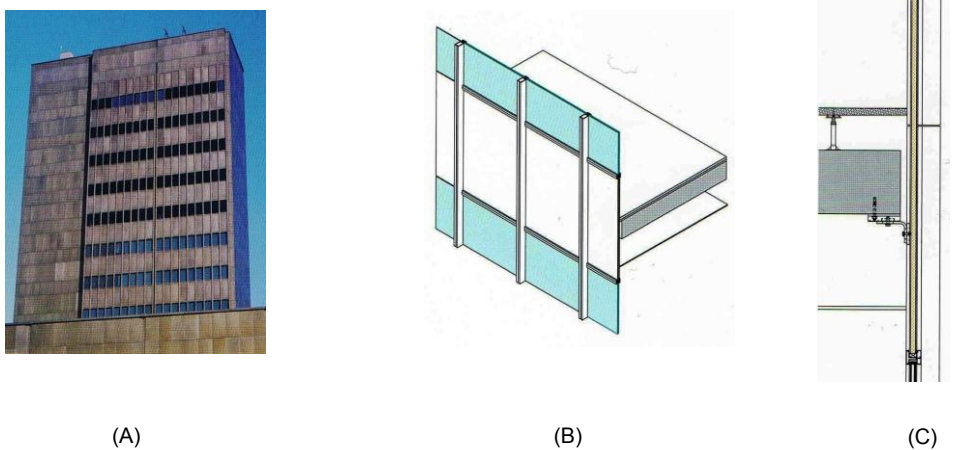


Fig. 2.18 Museo de arte moderno de Madrid, D. A. Díaz Domínguez, D.J. López de Asiani y Martíin, 1971.
 (A) Fotografía (B) Vista isométrica (C) Sección vertical
 Fuente: Paricio, 2010

No tardarían en ocurrir los primeros incendios en edificios con esta tipología de fachada poniendo de manifiesto sus peligros asociados, siendo los más relevantes:

- La debilidad termo mecánica de los elementos estructurales metálicos.
- La combustibilidad de algunos materiales de revestimiento.
- La facilidad con la que el fuego puede penetrar a través de cualquier cavidad o grieta, por pequeña que sea.
- El peligro que supone la rotura y caída de grandes piezas de vidrio.
- El peligro de colapso de partes del cerramiento.

Algunos casos de incendio como el del edificio Andraus Building (Sao Paulo, 1972), el del First Interstate Bank (Los Angeles, 1988) o del One Meridian Plaza (Philadelphia, 1991), todos ellos con víctimas mortales, dieron lugar a revisiones en las normativas y fueron el origen de numerosos estudios relacionados con la dinámica del incendio y con los riesgos asociados al diseño de los edificios.

En España el incendio del edificio Windsor (Madrid, 2005) puso de manifiesto, entre otros aspectos, que las medidas de protección relacionadas con los muros cortina merecían ser revisadas. Un año después de este grave incidente entraría en vigor el actual CTE. Sin embargo, su publicación no significó un punto de inflexión en relación al control de la propagación exterior del fuego. Las disposiciones relacionadas con este aspecto, recogidas en el Documento Básico SI sección 2, no presentaron cambios sustanciales respecto a la normativa anterior, es decir, la NBE CPI 96 (sección 3.5.1), lo cual se podría entender como un retroceso en materia de seguridad o por lo menos un descuido en un tema tan importante. En general, las medidas en cuestión se perciben como escasas, genéricas y poco flexibles porque no aluden a la problemática asociada a las distintas tipologías de fachada.

Las mayores dificultades surgen con la aplicación de la medida exigida para aportar resistencia a la fachada como elemento que limita dos sectores de incendio de una planta a otra. La medida consiste en implementar un elemento constructivo con capacidad resistente (EI 60) que configure una franja de 1 m (mínimo). Este requerimiento en términos constructivos tiene una aplicación lógica en las fachadas convencionales, teniendo en cuenta su configuración y sus materiales constructivos, los cuales, en sí mismos son resistentes al fuego (Fig. 2.19). Sin embargo su adaptación en los muros cortina puede derivar en la incorporación de complejos detalles constructivos cuya eficacia puede ser difícil de determinar (Fig. 2.20 y Fig. 2.21). En este punto cabe indicar que no se pretende hacer una crítica de este tipo de detalles o soluciones constructivas, puesto que el estudio no se centra en evaluar la resistencia frente al fuego de los elementos constructivos. La reflexión que se plantea apunta fundamentalmente a dos aspectos: por un lado a la configuración de la fachada y por otro al concepto mismo de pretender aportar resistencia mediante una franja de 1 m. En referencia al primer aspecto se ha de tener en cuenta que de acuerdo al CTE esta medida de protección (franja 1 m EI 60) se ha de aplicar indistintamente en cualquier tipo de fachada. Los muros cortina tienen una configuración que se caracteriza por tener grandes superficies acristaladas, lo cual lleva asociado el riesgo de propagar llamas de un tamaño proporcional a éstas (ver apartado 6.5.1). En este

caso la franja de 1 m podría pasar a ser un elemento de protección simbólico. El segundo aspecto se refiere al hecho de plantear que un elemento resistente de 1 m pueda aportar resistencia frente al fuego a un elemento que en sí mismo no la tiene, como es el caso de una subestructura de muro cortina. Como se ha dicho antes, los elementos que conforman los muros cortina tienen un débil comportamiento termo mecánico (ver apartados 2.4.2 y 2.4.6).



Fig. 2.19 (A) Incendio en un edificio residencial con fachada convencional de ladrillo, Barcelona.
 (B) Incendio en un edificio residencial con fachada ligera, Camberwell, Londres.
 (C) Incendio en un edificio administrativo con fachada ligera y trasdosado de ladrillo, Barcelona.
 Fotos: (A, B) internet, (C) P. Giraldo, 2010

Mediante esta exigencia el CTE asocia los muros cortina con las medidas de protección pasiva. En los proyectos de PCI abordados desde el concepto del diseño basado en prestaciones, *Performance Based Design (PBD)*, normalmente se asocia los muros cortina con el uso de medidas de protección activa (detectores de humo y calor, rociadores, etc.), lo que equivale a asumir que se trata de un elemento débil y que por tanto requiere de medios de extinción que contribuyan a que mantengan su estabilidad durante un tiempo determinado (Ei 60 - 120) para evitar un riesgo mayor en el resto de la edificación.

Existen casos interesantes que ejemplifican este tipo de situaciones, en el apartado 3.8 se tratan algunos casos de estudio de estas características.

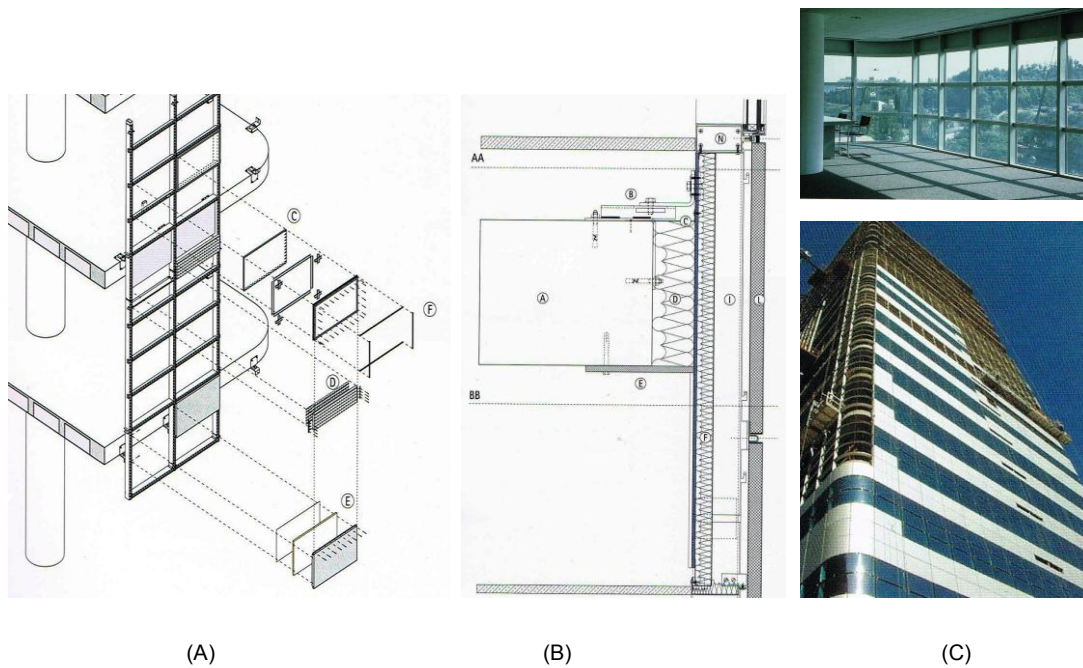


Fig. 2.20 Torre Millenium, Sabadell, Barcelona. Joan Roig y Enric Batlle.
 (A) Vista isométrica (B) Detalle del encuentro forjado-fachada (C) Fotografías
 Fuente: Rev. Tectónica 16

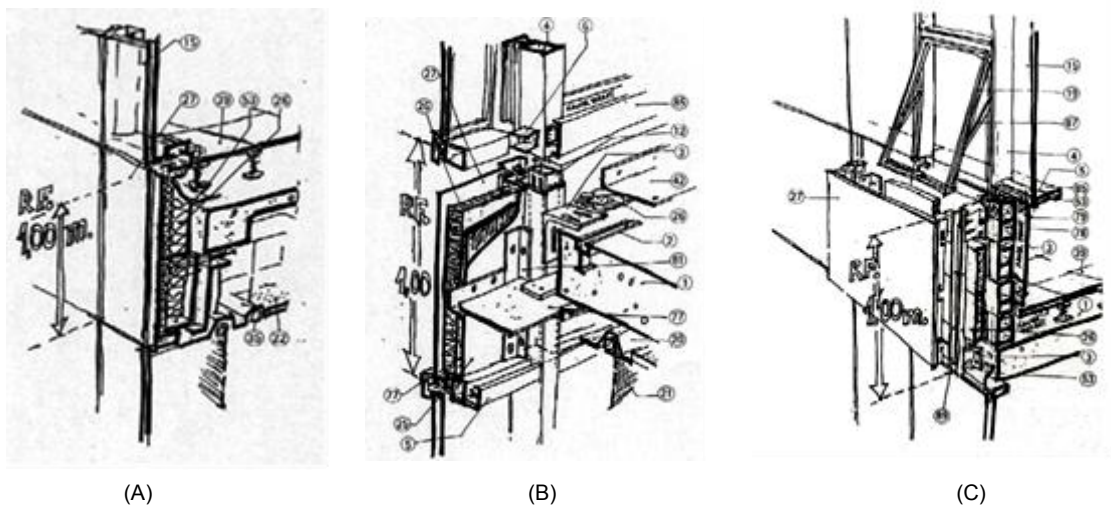
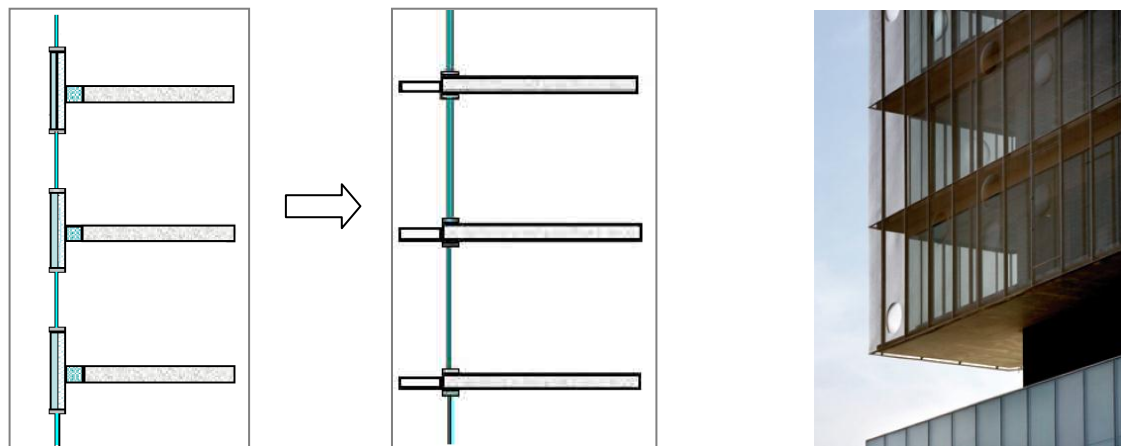


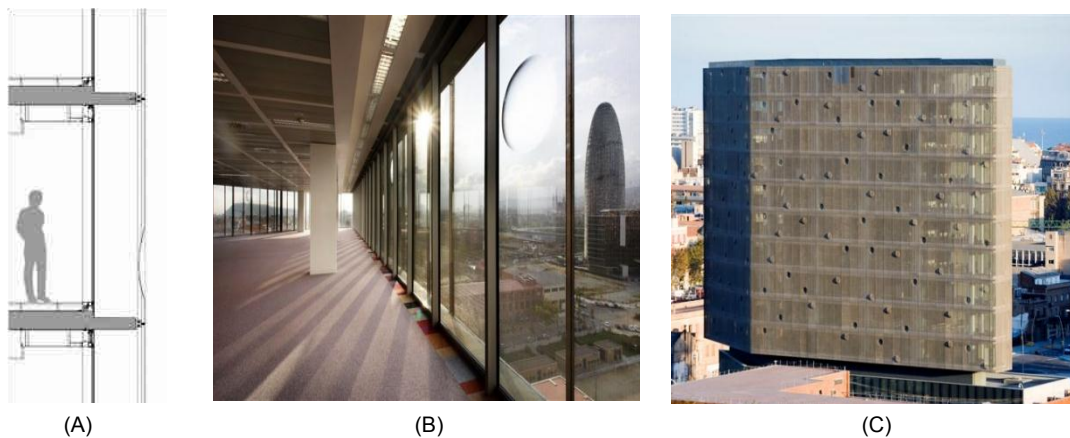
Fig. 2.21 Tres soluciones típicas del encuentro forjado-fachada (muro cortina) con la franja de 1 m.
 (A) Cortafuegos acoplado al forjado (B) Cortafuegos integrado en el panel del muro cortina
 (C) Cortafuegos convencional de obra de fábrica.
 Fuente: Dibujos de Xavier Ferrés. Rev. Tectónica 16, 2003

También hay soluciones más simples basadas en el propio diseño de la fachada, por ejemplo mediante el uso de muros cortina tipo panel. La diferencia con el muro cortina colgado es que es una piel de vidrio interrumpida por el forjado en cada planta. Con ello se mantiene la imagen diáfana característica de las fachadas acristaladas, pero se evitan las dificultades técnicas que supone solucionar la cavidad del encuentro de forjado-fachada y los riesgos asociados al problema del incendio (Fig. 2.22).



Muro cortina (colgado)

Muro cortina (tipo panel) más aleros de 80 cm.



(A)

(B)

(C)

Se trata de una fachada de doble piel formada por un muro cortina tipo panel como piel interior y unas láminas de tejido metálico como piel exterior. La piel exterior tiene una doble función: estética y como elemento de control solar. Los forjados en cada planta continúan hasta la segunda piel formando voladizos de 80 cm. Este planteamiento permite por una lado cumplir con la exigencia de la normativa (Ver apartado 3.5.1) y por otro aportar un elemento de control de la propagación del fuego efectivo (ver apartado 6.5.1).

Fig. 2.22 Edificio Indra, Barcelona.

(A) Sección de la fachada. (B) Fotografía interior (C) Fotografía exterior.

Fuente: Rev. Promateriales N° 76, 2008

Otros aspectos que quedan sin cubrir adecuadamente por la normativa están relacionados con la escasa referencia que hace sobre la problemática asociada a las fachadas ventiladas y lo poco restrictiva que resulta la norma respecto al uso de materiales combustibles en las fachadas. En el apartado 3.5.1 se explican las disposiciones de la normativa y en el apartado 6.5.2 se evalúan algunos aspectos relacionados mediante modelado y simulación computacional de incendios.

Los distintos aspectos que se han mencionado constituyen el objeto de estudio que nos hemos planteado abordar en esta investigación. En su mayoría aluden a aspectos

relacionados con el diseño y la geometría de las fachadas en su sentido más amplio. Las técnicas de modelado y simulación computacional elegidas para este propósito permiten una aproximación al fenómeno del fuego desde el punto de vista que se pretende estudiar.

2.4 Casos de incendio en edificios con propagación del fuego a través de las fachadas

Esta sección recoge algunos casos de incendio que por su magnitud, el saldo de víctimas humanas y las pérdidas materiales han sentado un precedente para dar una mayor atención a la protección contra incendios. Todos estos casos tienen en común que las fachadas han sido una de las vías principales de propagación del incendio. De acuerdo a los reportes consultados, el tipo de propagación ha variado según la tipología de cada fachada.

2.4.1 Hotel Mandarin Oriental



Localización: Pekín, China.
 Fecha: 9 de febrero de 2009
 Hora: 20:27
 Plantas: 34
 Altura: 256 m
 Origen: Cubierta del edificio
 Causas: Fuegos pirotécnicos
 Plantas afectadas: 34
 Muertos: 1 bombero
 Heridos: 7 bomberos

Fuente imágenes: 911 research.com

Tipo de fachada: Muro cortina.

Vía de propagación a través de la fachada: Material combustible del aislamiento térmico (presumiblemente).

Estructura del edificio: Hormigón armado.

Descripción del incendio:

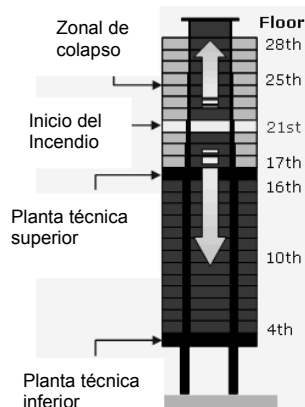
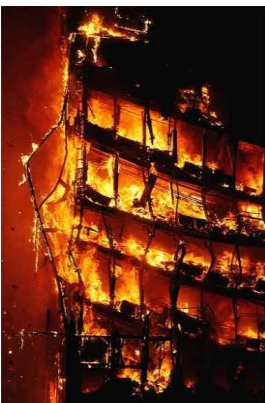
El incendio de este edificio ocurrió cuando estaba en fase de construcción. Todo indica que el origen del incendio se debió a una manipulación no autorizada de fuegos pirotécnicos en la cubierta del edificio y en las inmediaciones de la construcción. Una vez se inició el fuego, las fachadas del edificio quedaron envueltas en llamas en cuestión de 20 minutos. Los equipos de extinción de los bomberos resultaron insuficientes ante la magnitud del incendio, su total extinción no fue posible hasta la madrugada del día siguiente. Los gases tóxicos producidos por la combustión y la inoperatividad de la instalación de rociadores automáticos dificultaron las labores de los bomberos.

Teniendo en cuenta que el edificio estaba en fase de construcción la carga combustible en el interior del edificio era muy baja por ello toda provisión de material combustible apunta a la envolvente del edificio. El fuego comenzó en la terraza y descendió rápidamente por las fachadas laterales (ciegas). Según el reporte de los bomberos, los fuertes vientos contribuyeron a que el fuego se propagara con tal rapidez a través de todo el edificio. La evidencia más clara para considerar un material combustible como causa de la propagación es la trayectoria descendente del fuego. Esta trayectoria atípica suele ser forzada, o bien por la caída de piezas ardientes que provoquen fuegos secundarios en zonas más bajas, o por una situación que involucre material con propiedades inflamables. Se piensa que pudo tratarse del material de aislamiento térmico de la fachada.

2.4.2 Edificio Windsor



Localización: Madrid, España.
 Fecha: 12 de febrero de 2005
 Hora: 23:20
 Plantas: 32
 Altura: 106 m
 Año de construcción: 1979
 Origen: Planta 21
 Causas: Corto circuito (sin determinar).
 Plantas afectadas: 28
 Muertos: Sin víctimas mortales
 Heridos: 7 bomberos heridos leves



Fuente: Informe técnico Intemac OCT

Fuente imágenes: Fire safety group. Shimizu Corporation Japan.

Esquema de la trayectoria del incendio.
 Fuente: Arup

Tipo de fachada: Muro cortina.

Vía de propagación a través de la fachada: Cavidad en el encuentro del forjado y la fachada y material combustible del aislamiento térmico.

Estructura del edificio: Hormigón armado y pilares perimetrales de acero.

Descripción del incendio:

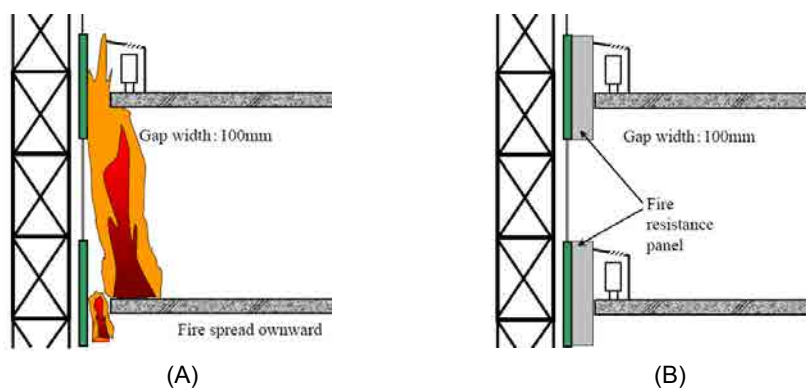
El incendio del edificio Windsor es considerado uno de los eventos de incendio más graves ocurridos en los últimos años. La estructura del edificio constaba de un núcleo central de hormigón con dos filas de columnas de hormigón armado en la dirección norte-sur, alineados con los muros del núcleo lateral. Los forjados de hormigón tenían unos apoyos perimetrales de pilares de acero. El fallo de estos pilares se considera la causa del colapso parcial que sufrieron los forjados de la parte superior del edificio. El fuego comenzó en la planta 21 del edificio. El sistema de alarma y de detectores de humos de esa planta no funcionó. La planta 21 no contaba con instalación de

rociadores automáticos. De acuerdo a la normativa de entonces, la CPI 96, sólo era obligatoria a partir de los 100 m de altura y esta planta se encontraba a una altura de 96 m. En la actual norma el CTE-DB SU la instalación de rociadores automáticos es obligatoria a partir de 80 m y los sistemas de alarma y detección a partir de 50 m.

El incendio avanzó en trayectoria ascendente durante varias horas y posteriormente comenzó a propagarse de forma descendente hasta la planta 4. Las causas de este descenso del incendio se atribuyen a la caída de trozos ardientes de la fachada y también a la implicación del material de aislamiento térmico. El inicio de la propagación del fuego a través de la fachada se produjo a través de la cavidad del encuentro del forjado y la fachada. El edificio Windsor fue construido en el año 1974, los muros cortina que se construían entonces eran los llamados muros cortina de primera generación. En éstos no se tomaba en consideración el sellado de las cavidades del perímetro del forjado. Semanas previas al incendio se habían comenzado a realizar trabajos para adaptar el muro cortina a la normativa de protección contra incendios contemplando un sellado y una franja resistente de 1 m. Cabe reflexionar si una franja resistente de 1 m podría haber minimizado o contribuido de alguna manera en el control de la propagación de un fuego de tal magnitud.

Los informes técnicos de la investigación [Ikeda 2005] señalan cuatro errores principales en este incendio:

- Fallo en los equipos de detección y alarma para atender a tiempo la emergencia.
- Falta de instalación de rociadores automáticos para prevenir el crecimiento del incendio y garantizar la estabilidad de la fachada por un tiempo determinado.
- Falta de compartimentación en la fachada (franja de 1 m) para minimizar la propagación vertical.
- Falta de revestimientos de protección contra el fuego en los elementos estructurales de acero para prevenir el colapso.



(A) Esquema de la cavidad perimetral de 10 cm.
 (B) Esquema del tipo de sello y franja entre 1 y 2 m para compartimentar.
 Fuente: Fire safety group. Shimizu Corporation Japan

2.4.3 Edificio Torre Central



Fuente imágenes: 911 research.com

Localización: Caracas, Venezuela.
 Fecha: 17 de octubre de 2004
 Hora: 00:05
 Plantas: 55
 Altura: 221 m
 Origen: Planta 34
 Causas: Sin determinar
 Plantas afectadas: 21
 Muertos: Sin víctimas mortales
 Heridos: 28 personas (25 de ellas bomberos)

Tipo de fachada: Convencional con antepechos de hormigón.

Vía de propagación a través de la fachada: Propagación a través de las ventanas por efecto *leap frog*.

Estructura del edificio: Hormigón armado.

Descripción del incendio:

El incendio de este edificio de oficinas comenzó en la planta 34 y se extendió hacia las plantas superiores hasta alcanzar la cubierta. Las labores de extinción fueron infructuosas porque los medios de protección activa del edificio estaban inoperantes. El edificio contaba con una instalación de rociadores automáticos, pero no estaba en funcionamiento, al parecer por falta de mantenimiento. Los bomberos no pudieron operar mediante bombas ni sistemas de columna seca, aparentemente no estaban operativos. Por ello se procedió a arrojar agua desde un helicóptero para atacar el fuego en las zonas más altas. Finalmente el fuego se extinguió cuando ya se había agotado todo el contenido combustible de las plantas. Las fotografías evidencian que la fachada contribuyó a la propagación del fuego. El edificio pudo ser desalojado a tiempo, pese a ello tres empleados y 25 bomberos resultaron heridos. Los bomberos, apoyados por helicópteros y personal del ejército combatieron el fuego durante 12 horas antes de abandonar el edificio debido al temor de un colapso estructural.

2.4.4 Edificio One Meridian Plaza



Localización: Philadelphia, EEUU.
 Fecha: 23 de febrero de 1991
 Hora: 20:40
 Plantas: 38
 Origen: Planta 22
 Causa: Aparente corto circuito (sin determinar).
 Plantas afectadas: 9
 Muertos: 3 bomberos
 Heridos: 24 heridos

Fuente imágenes: wtc7.net

Tipo de fachada: Muro cortina con estructura de acero y revestimiento de placas de granito.

Vía de propagación a través de la fachada: Propagación a través de las ventanas por efecto *leap frog*.

Estructura del edificio: Hormigón armado.

Descripción del incendio:

El fuego comenzó en la planta 22 en una oficina vacía, al parecer debido a un corto circuito. El edificio ardió durante más de 19 horas, consumiendo completamente ocho pisos. Hubo tres bomberos muertos y 24 heridos. El dispositivo de actuación contó con cerca de 300 bomberos.

La fachada estaba compuesta por una estructura de acero con paneles de granito anclados a ésta y por grandes ventanales. La propagación el fuego ocurrió a través de las ventanas por efecto *leap frog* y todo indica que el soporte del muro cortina era un antepecho de hormigón.

La lucha contra el fuego fue obstaculizada por la circulación de humo denso, un fallo en el sistema eléctrico del edificio y la presión insuficiente del agua. La lucha contra el fuego fue abandonada después de 11 horas debido al riesgo de colapso estructural.

El edificio, de acuerdo a la normativa de entonces, contaba con rociadores a partir de la planta 30 y cuando el incendio ascendió hasta esta planta pudo ser controlado. Esta situación puso en evidencia la importancia de los rociadores automáticos en este tipo de edificaciones. A partir de este incendio en varios estados del país fueron modificadas las legislaciones, aumentando las exigencias sobre las instalaciones de rociadores automáticos.

2.4.5 Edificio First Interstate Bank



Fuente imágenes: Los Angeles Times



Fuente: New York Board of Underwriters

Localización: Los Angeles, EEUU.
 Fecha: 4 de marzo de 1988
 Hora: 22:00
 Plantas: 62
 Altura: 262 m
 Lugar de origen: Planta 12
 Año de construcción: 1971-1973
 Causa: Aparente corto circuito.
 Plantas afectadas: 5
 Muertos: 1
 Heridos: 40 heridos

Tipo de fachada: Muro cortina con estructura de aluminio.

Vía de propagación a través de la fachada: Propagación a través de la cavidad en el encuentro del forjado y la fachada.

Estructura del edificio: Hormigón y acero.

Descripción del incendio:

El fuego comenzó en un piso de oficinas y fue notificado rápidamente a los bomberos, sin embargo, cuando estos llegaron al lugar una parte importante de la planta ya estaba en llamas. El fuego alcanzó cinco plantas antes de ser controlado unas 3 horas y media más tarde. El edificio estaba provisto de instalación de rociadores automáticos, pero éstos no entraron en funcionamiento en el momento de declararse el incendio. Las llamas se propagaron a través de la cavidad del encuentro del forjado y la fachada. El doblado interior del muro cortina constaba de un revestimiento de tablero de yeso que resultó insuficiente para evitar que entrara en combustión el aislamiento térmico de la fachada.

Según se aprecia en la imagen, las esquinas del edificio estaban revestidas con unos paneles compuestos en su interior de material combustible y acabado de lámina de aluminio. Todo indica que el material alojado en el interior de los paneles también contribuyó al crecimiento del fuego.

2.4.6 Edificio Andraus Building



Fuente imagen: 911 research.com

<http://en.wikipedia.org>

Localización: Sao Paulo, Brasil.
 Fecha: 24 de febrero de 1972
 Hora: 23:20
 Plantas: 32
 Altura: 115 m
 Año de construcción: 1962
 Lugar de origen: Planta 2
 Causa: Corto circuito
 Plantas afectadas: 24
 Muertos: 16
 Heridos: 330 heridos

Tipo de fachada: Muro cortina con estructura de acero, con antepecho de soporte de hormigón.

Vía de propagación a través de la fachada: Propagación a través de las ventanas por efecto *leap frog*.

Estructura del edificio: Hormigón armado.

Descripción del incendio:

El edificio era de uso comercial desde la planta baja hasta la planta 7 y desde la planta 8 a la 32 estaba destinado a oficinas. El fuego se inició en la planta segunda y se extendió rápidamente hacia la parte exterior de la construcción, la propagación ascendente ocurrió a través de las fachadas y de una caja de escaleras alcanzando 24 pisos. El incendio destruyó la mayor parte del edificio, dejando un saldo de 16 fallecidos y 330 heridos. La fachada estaba constituida por un muro cortina totalmente acristalado, soportado de la estructura del edificio y un antepecho de hormigón.

La carga combustible del contenido del edificio era muy alta, en algunas plantas de oficinas los falsos techos y los tabiques divisorios eran de madera y material textil. Tras 15 minutos de declararse el incendio las llamas cubrían la fachada entera. La intensidad máxima del incendio se mantuvo por cerca de cuatro horas, y no fue extinguido totalmente hasta varias horas después. Alrededor de 350 personas huyeron al helipuerto en la azotea y pudieron ser rescatadas por helicópteros. El edificio mantuvo su integridad estructural durante el incendio. Se registraron daños en la estructura debidos a la intensidad del fuego y su duración. Sin embargo, no se consideraron daños importantes, por tanto posteriormente el edificio fue reparado y volvió a usarse normalmente.

Este ha sido uno de los incendios más impactantes que se recuerda. Las imágenes de víctimas lanzándose por las ventanas conmocionaron al mundo, dando lugar por primera vez a discusiones importantes sobre la seguridad contra el fuego en los edificios, lo cual se había pasado por alto hasta entonces en muchos lugares del mundo y en este caso en Brasil. Numerosas investigaciones realizadas por equipos de científicos de diferentes países fueron llevadas a cabo a partir de este incidente trágico.

Bibliografía:

[Abecassis Empis 2010] C. Abecassis Empis, Analysis of the compartment fire parameters influencing the heat flux incident on the structural façade, PhD Thesis, The University of Edimburgh, 2010.

[Drysedale 1985] D. D. Drysdale, An Introduction to Fire Dynamics, John Wiley & Sons, New York, Chapter 9, The pre-Flashover Compartment fire, pp.279-303, 1985.

[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, august 2007 vol. 17 no. 3, pp.211-237. doi: 10.1177/1042391507069634.

[Galea et al. 1995] E. R. Galea, D. Berhane, N. A. Hoffmann, CFD Analysis of Fire Plumes Emerging from Windows in High-Rise Buildings Proceedings of Fire Safety by Design, vol. 3 University of Sunderland, pp.111-120, 1995.

[Galea et al. 1996] E. R. Galea, D. Berhane, N. A. Hoffmann, CFD Analysis of Fire Plumes Emerging from Windows with External Protrusions in High-Rise Buildings Conference Proceedings of the Seventh International Interflam Conference. University of Cambridge, pp.835-839, 1996.

[Goble 2007] K. Goble, Height of Flames Projecting From Compartment Openings. Thesis Master of Engineering in Fire Engineering, Department of Civil Engineering, University of Canterbury, New Zealand, 2007.

[Harmathy 1974], T.Z. Harmathy, Flame deflectors, Ottawa: National Research Council of Canada, Division of Building Research, p.6, Buiding Research Note N° 96, 1974.

[Hakkarainen 2002] T. Hakkarainen, Studies on Fire Safety assessment of Construction Products, VTT Technical Research Centre of Finland, 2002.

[Hokugo et al. 1999] A. Hokugo, Y. Hasemi, Y. Hayashi, M. Yoshida, Mechanism for the Upward Fire Spread Through Balconies Based on an Invetigation and Experiments for a Multi-story Fire in High-rise Apartment Building. In: Curtat, M. (ed). Fire Safety Science, Proceedings of the 6th International Symposium. Poitiers, France, july 1999. International Fire Safety Science, pp.649, 2000, ISBN 0-925-223-25-5.

[Ikeda 2005] K. Ikeda, Collapse Mechanism of the Windsor Building by Fire in Madrid and the Plan for its Demolition Process, Fire Safety Design Group Design Division, Shimizu Corporation 1-2-3 Shibaura Minatoku Tokyo 105-8007 Japan, International Workshop on Emergency Response and Rescue, November 2005.

[Ingberg 1928] S.H. Ingberg, Tests of the Severity of Building Fires, Q. Natl. Fire Prot. Assoc. 22, 1928.

[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.

[Klopovic – Turan 2001] S. Klopovic, O.F. Turan, A comprehensive study of externally venting flames – Part II: Plume envelope and centre-line temperature comparisons, secondary fires, wind effects and smoke management system, Fire Safety Journal, 36, pp.135-172, 2001.

- [Law 1978] M. Law, Fire Safety of External Building Elements – The Design Approach. Engineering Journal of the American Institute of Steel Construction, vol 15, pp.59-74, 1978.
- [Law – O'Brien 1981] M. Law, T. O'Brien, Fire Safety of Bare External Structural steel. Croydon, constrado, 1981.
- [Law – O'Brien 1989] M. Law, T. O'Brien, Fire Safety of bare external structural steel, The Steel Construction Institute, SCI Publication 0009, U.K, 1989, ISBN: 0 86200 0262.
- [Lee et al. 2006] Y. Lee, M. A. Delichatsios, G.W.H. Silcock, Heat Fluxes and Flame Height In Facades from Fires in Enclosures of Varying Geometry, The Institute for Fire Safety Engineering Research and Technology (FireSERT), University of Ulster, Northern Ireland, 2006.
- [Mammeros – Battaglia 2004] J. H. Mammoser, F. Battaglia, A computational study on the use of balconies to reduce flame spread in high-rise apartment fires Fire Safety Journal vol. 39, pp.227-296, 2004.
- [Nyuk 2000] F. Nyuk Pho, Fire spread on external walls, Fire Engineering Report, University of Canterbury, 2000.
- [Oleszkiewicz 1990] I. Oleszkiewicz, Heat Transfer From a Window Fire Plume to a Building Façade, National Research Council Canada, 1990.
- [Oleszkiewicz 1991] I. Oleszkiewicz, Vertical separation of windows using spandrel walls and horizontal projections, Fire Technology, 27, pp.334-340, 1991.
- [Ondrus – Pettersson 1986] J. Ondrus, O. Pettersson, Brandrisker-Utvädigt tilläggisolerade fasader. En experimentserie I fullskala. Fire Hazards of Facades with externally applied additional thermal insulation. Full scales experiments. Lund Institute of Technology, p.56, 1986, ISSN 0282-3756.
- [Patterson 1993] J. Patterson, Simplified Design for Building Fire Safety, Iowa State University, John Wiley&Sons, Inc. New York, 1993, ISBN 0471572365.
- [Paricio 2010] I. Paricio, La Piel Ligera, Grupo Folcrà Edificación, S.A, pp.66-68, 2010, ISBN 978-84-92861-39-2.
- [Satoh - Kuwahara 1991] K. Satoh, K. Kuwahara, A Numerical Study Of Window-to-window Propagation In High-rise Building Fires. Fire Safety Science 3, pp.355-364, 1991.
- [Seigel 1969] L. G. Seigel, The Projection of Flames from Burning Buildings, Fire Technology, vol 5, pp.43-51, 1969.
- [Smith - Harmathy 1978] E.E. Smith, T.Z. Harmathy, Design of Buildings for Fire Safety, ASTM Special Technical Publication 685, National Research Council for Canada, pp.139-153, 1978.
- [Suzuki et al. 2000] T. Suzuki, A. Sekizawa, H. Satoh, T. Yamada, E. Yanai, H. Kurioka, 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, May 2000.

[Thomas, Law 1972] P. H. Thomas, M. Law, The Projection of flames from Buildings on Fire, Fire Prevention Science and Technology, 10, pp.19-26, 1974.

[Thomas et al. 1967] P. H. Thomas, A.J.M. Heselden, M. Law, Fully-developed Compartment Fires Two Kinds of Behaviour, Fire Research Technical Paper N° 18, Ministry of Technology and Fire Offices Committee, Joint Fire Research Organisation, HMSO, UK, pp.2-5,1967.

[Webster et al. 1964] C. T. Webster, M. Raftery, P. Smith, The Burning of Well Ventilated compartment fires. Part III. The effects of wood Thickness. Fire research Note 574, Fire Research organization, Borehamwood, 1964.

[Yokoi 1960] S. Yokoi, Study on the Prevention of fire spread caused by hot upward current, Building Research Institute, Report N° 34, Tokyo, Japan, 1960.

El incendio del edificio Windsor del Madrid, Investigación del comportamiento al fuego y de la capacidad resistente residual de la estructura tras el incendio. Notas de información Técnicas Intemac NIT 2, 2005.

Citas electrónicas:

<http://911research.wtc7.net/wtc/analysis/compare/fires.html>

<http://911research.wtc7.net/cache/wtc/analysis/compare/meridian.htm>

http://www.lafire.com/famous_fires/880504_1stInterstateFire/050488_InterstateFire.htm

Notas:

¹ Eurocódigo 1 Actions on structures EN 1991 part 1-2:2002. General actions – Actions on structures exposed to fire.

² SP Fire 105. External wall assemblies and façade claddings- Reaction to fire. Issue N° 5, approved 1985-07-18, revised 1994-09-09. Boras: Swedish National Testing and Research Institute, 1995. 11 p. + app. 4p. Es una norma de ensayos de reacción al fuego de los materiales enfocada en los materiales aplicables a las fachadas.

³ ISO/FDIS 1385-1. Reaction to fire test for facades . Par 1: Intermediate-scales test. Geneva: International Organization for Standardization, 2001, pp.8. Es una norma de ensayos a mediana escala para evaluar la reacción al fuego de los materiales aplicables a las fachadas.

3

CONTEXTO NORMATIVO



3.1 Introducción

En este capítulo se revisa el contexto normativo relacionado con la seguridad en caso de incendios en la edificación, haciendo énfasis en la normativa española y contrastando algunos aspectos relevantes con otras normativas internacionales. Los temas considerados en relación a las normativas aluden primordialmente a la propagación exterior del fuego y la protección contra incendios en la fachada de los edificios puesto que son el centro de la presente investigación.

3.2 Objetivos de las normas de seguridad contra incendios

La protección contra incendios puede entenderse como el conjunto de medidas, actividades y medios que conducen a la seguridad contra incendios en la edificación. Los objetivos centrales de la protección contra incendios según la norma 101 (código de seguridad humana) de la NFPA [1] (*Building Fire Protection Association*) en orden de prioridad son los siguientes:

- (1) Salvaguardar las vidas humanas
- (2) Reducir al máximo los daños a la propiedad
- (3) Procurar que las actividades del edificio puedan reanudarse en el plazo de tiempo más corto posible.

Idealmente las normativas de protección contra incendios han de orientar al proyectista y demás profesionales involucrados a integrar al programa del edificio las medidas necesarias para alcanzar un aceptable nivel de protección contra incendios. Sin embargo, no es así en todos los casos. En ocasiones la adaptación de los requerimientos exigidos por las normativas prescriptivas puede suponer sacrificar importantes aspectos funcionales o de diseño del proyecto. También puede darse la situación en la cual no se alcance un nivel de seguridad aceptable aún cuando se cumplan minuciosamente las medidas estipuladas por la normativa. Algunos expertos coinciden en afirmar que las normas prescriptivas desarrolladas por los comités de expertos pueden ser descritas como una compilación de buenas prácticas con una base técnica débil. Las disposiciones suelen ser tan genéricas que resulta fácil administrarlas pero difícil comprobar su efectividad (Fitzgerald, 2004: 3).

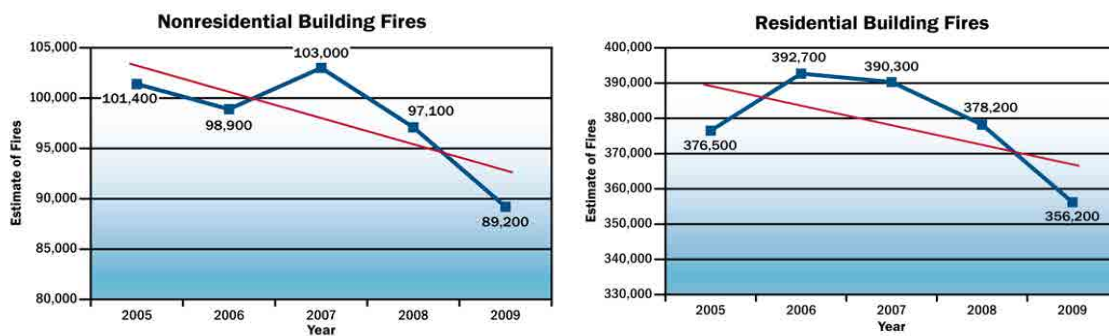


Fig. 3.1 Datos estadísticos de incendios en edificios residenciales y no residenciales en EEUU.
Fuente: USFA (U.A Fire Administration)
<http://www.usfa.fema.gov/>

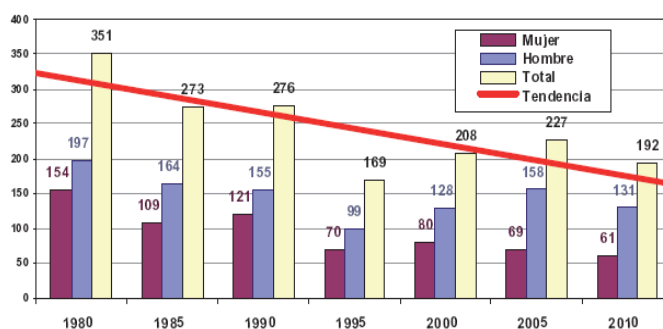


Fig. 3.2 Datos estadísticos de víctimas mortales en incendios en España.
Primer informe realizado en España que recoge estadísticas de incendios.
Fuente: Fundación Mapfre, Larrea et al., 2011

En los proyectos se pueden plantear eventualmente situaciones de riesgo que no son cubiertas por la normativa o para las cuales contempla disposiciones con un amplio margen de interpretación. Dichas situaciones pueden trasladar a los proyectistas responsabilidades que exceden su campo profesional, las cuales requerirían la intervención de un experto en ingeniería de protección contra incendios [2]. También se pueden crear situaciones de riesgo de forma inadvertida como resultado de un diseño inadecuado o por el uso de materiales inapropiados. El conflicto entre la conformidad con los requisitos de la normativa y las necesidades funcionales y estéticas del proyecto suelen ser una situación recurrente en la etapa de diseño de los proyectos.

Todas estas dificultades que se plantean vienen definidas por la complejidad del incendio y su carácter imprevisible. Los sistemas de seguridad contra incendios y las distintas actividades que lo componen son de lejos mucho más complejos que cualquier otro programa del edificio. Es por este motivo que cada vez con mayor frecuencia la protección contra incendios se sitúa en el marco de una actividad especializada en la que interviene la ingeniería de protección contra incendios. Dicha actividad no está reconocida como profesión reglada España en la actualidad.

No se pretende desvirtuar el importante papel que cumplen las normativas, puesto que la experiencia ha demostrado que el camino más efectivo para abordar el problema de los incendios en la edificación es a través de un apropiado sistema de códigos y normas, lo cual es constatable al observar las estadísticas (Fig. 3.1 y Fig. 3.2). No obstante, es importante resaltar que la seguridad contra incendios es un ámbito muy amplio que requiere de una acción coordinada desde distintos frentes que incluyen: los comités que establecen y modifican las normas, los órganos que las administran, los organismos que las regulan y los cuerpos de extinción y atención de emergencias.

En el año 2005 el incendio del edificio Windsor de Madrid puso en evidencia una cadena de errores de diversa índole que, entre otros aspectos, señalaba los vacíos que la normativa de seguridad contra incendios (que por entonces era la NBE CPI 96) presentaba respecto a los edificios en altura, en relación al control de la propagación y los medios de alarma y extinción. Otro importante aspecto sobre el cual hicieron hincapié desde algunas asociaciones de profesionales de técnicos de bomberos [3], y que aún después de varios años no ha cambiado, se refiere a la falta de una autoridad nacional en materia de seguridad contra incendios como la que existe en otros países del entorno europeo y en EEUU. Esta falta de unidad en la gestión y control genera, entre otros asuntos, que la legislación en materia de protección contra incendios (PCI) esté dispersas en los diferentes Ministerios como una de sus competencias. Así, existe legislación sobre incendios del Ministerio de Interior en los espectáculos públicos, del Ministerio de Fomento en los puertos y aeropuertos, del Ministerio de Sanidad en hospitales, del Ministerio de Comercio y Turismo sobre los hoteles. La seguridad en las cárceles depende del Ministerio de Justicia y en los cuarteles del Ministerio de Defensa, mientras que la seguridad en los camiones y autobuses depende del ministerio de Transporte. Todo lo relacionado con los incendios forestales depende del Ministerio de Medio Ambiente. Además, la legislación que regula las instalaciones de protección contra incendios depende del Ministerio de Industria, la instalación de los hidrantes depende de cada ayuntamiento, etc. La normativa vigente en la actualidad depende del CTE y este del Ministerio de Vivienda. La aprobación de los proyectos recae sobre los técnicos de bomberos, quienes en muchos casos solo están capacitados para verificar que el proyecto está dentro de lo que establece la normativa. Cualquier aspecto derivado, por ejemplo, de la singularidad de los proyectos supone dificultades para valorar la viabilidad de su aprobación. Esta panorámica lleva cuanto menos a reflexionar sobre un necesario cambio en la manera de gestionar la problemática de la seguridad contra incendios.

Algunos países con un desarrollo mayor en este campo son un modelo a considerar. Países como EEUU, Reino Unido o Australia han desarrollado con los años una cultura de la seguridad contra incendios que se basa en tres pilares fundamentales:

- una autoridad local competente, altamente cualificada en materia de seguridad contra incendios, encabezada por una figura como el *Fire Marshall* (EEUU) *Fire chairman* (Reino Unido).
- un sistema de códigos prescriptivos o funcionales amplio y una alternativa para proyectos complejos o singulares basada en el denominado Diseño basado en Desempeño **PBD** de sus siglas en inglés *Performance Based Design*.
- Reconocimiento del campo profesional de la ingeniería de protección contra incendios.

En el apartado 3.7 se explican con más detalle estos conceptos.

3.3 Evolución de las normas de seguridad contra incendios en España

Inevitablemente la historia de las normas de protección contra incendios ha estado marcada por grandes tragedias de incendios que han motivado un cambio de postura frente al problema del fuego en las edificaciones y sus consecuencias.

Históricamente, las primeras tentativas de procurar el control de los incendios las encontramos en la antigua Roma. Después del incendio que arrasó la ciudad en el año 64 DC, el emperador Nerón inició una reforma urbana en la cual los edificios a reconstruir debían guardar ciertas distancias de seguridad entre ellos, debían estar contruidos en ladrillo y tener fachadas formadas por pórticos de piedra. El gran incendio de Londres de 1666 que destruyó más del 80 por ciento de la ciudad es considerado el origen de las normas de seguridad contra incendios. Este suceso dio lugar a un código completo de regulaciones en los edificios que incluía distancias mínimas de separación entre edificios, uso de materiales de construcción no combustibles como el ladrillo y la piedra en las paredes medianeras de las casas y el uso de materiales como la pizarra en los tejados. El gran incendio de Londres también estimuló el desarrollo de los primeros equipos de extinción de incendios. La primera brigada contra incendios se constituyó una vez se comenzaron a aplicar las regulaciones establecidas para los edificios. En 1824 se constituye la Brigada Contra Incendios de Edimburgo, en 1830 el jefe de dicha brigada James Braidwood escribió el primer manual integral sobre las actuaciones de las brigadas. Este manual contenía 396 normas en las que se describían las funciones que debían desarrollar estos equipos de seguridad [Cote – Bugbee 1993].

En EEUU, considerado en la actualidad uno de los países más desarrollados en el campo de la seguridad contra incendios, las normas de seguridad contra incendios se comenzaron a gestar a partir de sucesos trágicos de gran envergadura como el gran incendio de Chicago de 1871 y el terremoto y deflagración de San Francisco en 1906. También fueron determinantes otros incendios acaecidos a principios del siglo XX como el de la Rhoades Opera House en Boyertown, Pennsylvania en 1903, el Iroquois Theatre en Chicago en 1903, el Lakeview Grammar School en Collinwood, Ohio en 1908 y la Triangle Shirtwaist Factory en Nueva York en 1911; estos últimos además propiciaron la creación del Comité para la Protección de Vidas (*Committee on Safety to Life*) de la NFPA [Capote 2001].

En España la situación no ha sido diferente, algunos incendios de gran trascendencia y con lamentables saldos de víctimas con el tiempo han dando lugar a un sistema de normativas capaz de abordar las distintas actividades de la edificación de acuerdo a sus riesgos específicos. En 1974 se publica la primera norma de carácter nacional que hace referencia al mundo de la protección contra el fuego: la Norma Tecnológica sobre Instalaciones de Protección contra el Fuego (NTE-IPF). Estas normas tecnológicas intentaron definir y unificar diversos aspectos de la edificación que hasta ese momento se llevaban de forma descoordinada. Esto significó un importante avance, teniendo en cuenta la situación previa en el ámbito de la seguridad contra incendios. Dicha norma permitió describir y estructurar las diversas instalaciones de protección que hasta ese momento, y al no existir una normativa, se ejecutaban conforme a una “tradición y buen hacer”. Los distintos profesionales la adoptaron inmediatamente en la redacción de sus proyectos y en la ejecución de las obras, consiguiendo unificar ciertos criterios.

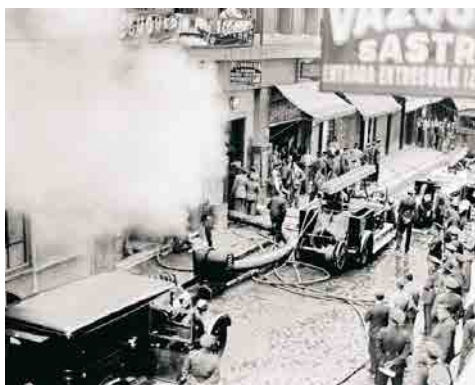


Fig. 3.3 Efectivos del cuerpo de bomberos apagan un incendio originado en una fábrica de juguetes. Madrid, 1973.

Fuente: R. Fernández. Desarrollo de las normas contra incendios en España.
<http://www.infomadera.net>

El 23 de septiembre de 1928 ocurre el incendio del Teatro Novedades de Madrid (Fig. 3.4) que ha pasado a formar parte de los sucesos de mayor repercusión en la historia de los incendios en Europa. La deflagración fue tan violenta que en una hora el Teatro estaba reducido a escombros. Murieron 67 personas y quedaron heridas, con quemaduras de diverso grado más de 200 personas. Esta tragedia dio lugar al primer reglamento de espectáculos públicos que existió en España.



Fig. 3.4 Imágenes del incendio del Teatro Novedades.
Madrid 23 de septiembre de 1928.
Fuente: Grandes catástrofes
<http://www.gorgas.gob.pa>

El 22 de noviembre de 1977 se produjo un incendio en el hospital materno-infantil de la ciudad sanitaria Virgen del Rocío, en Sevilla. El incendio provocó una enorme columna de humo que ascendió a través de los conductos de ventilación (no tenía sistema de corte en caso de incendio) y también a través de la escalera, lo cual dificultó enormemente las labores de rescate y evacuación. El edificio no contaba con escaleras de evacuación ni con un plan de emergencias debido a que no estaban contemplados por ninguna normativa, por tanto fue una situación en la que reinó el caos, pero afortunadamente no hubo víctimas. Este incendio, que pudo ser una enorme tragedia hizo que los responsables del Ministerio de Sanidad tomaran conciencia de la situación, y el 1 de septiembre de 1978 se promulgó el Real Decreto RD 2177/78 de Protección Contra Incendios en Hospitales. Los efectos de la normativa fueron lentos teniendo en cuenta que hasta entonces todos los hospitales y clínicas en España habían sido diseñados sin tener en cuenta las situaciones de incendio. Adoptar ciertas medidas que afectaban la configuración y distribución de los edificios no fue una tarea fácil.

El 12 de julio de 1979 se produjo otro gran incendio en el hotel Corona de Aragón (Fig. 3.5) en Zaragoza. Esta vez la catástrofe fue mayor porque hubo 76 víctimas mortales, además de cientos de heridos. El incendio ocurrió en un momento en el que el hotel estaba al completo, además estaban alojadas gran cantidad de personalidades, lo cual

contribuyó a que el incidente tuviera una enorme repercusión mediática. La intervención de los bomberos y de todos los cuerpos de seguridad (policía, sanitarios, protección civil, etc.) se realizó en condiciones muy difíciles ante la carencia de medios de evacuación, señalización, compartimentación, instalaciones de extinción, etc. Fue un escándalo, del que hizo eco la prensa internacional, que en un hotel de cinco estrellas no se contemplara ninguna medida de seguridad y que aún así no estuviera incumpliendo ninguna ley por una total ausencia de normas de seguridad en caso de incendios. En consecuencia, el 25 de septiembre de 1979 se dictó una orden ministerial sobre Protección Contra Incendios en Hoteles. Con ello, en el año 1979 en España sólo existían a nivel nacional dos normas: la de hospitales y la de hoteles y un reglamento para los espectáculos públicos, pero aún no se cubría la seguridad del resto de las edificaciones [Fernández 2009].



Fig. 3.5 Imágenes del incendio del hotel Corona de Aragón
Zaragoza 12 de julio de 1979.

Fuente: Noticias de Aragón

<http://zaragozame.com/2009/07/13/30-anos-del-incendio-del-hotel-corona-de-aragon-de-zaragoza>

El 10 de abril de 1981 se publica el RD 2059/81, por el que se aprobaba la entrada en vigor de la Norma Básica de Protección Contra Incendios (NBE-CPI-81), de ámbito nacional y de obligado cumplimiento, por la cual quedaba anulada toda norma de igual o inferior rango que contradijese lo dispuesto en esta Norma Básica de la Edificación (NBE). Aunque su aparición significó un progreso enorme en relación a las normas de seguridad, dio lugar a grandes dificultades debido a la poca flexibilidad que permitía en los diseños de los edificios, y por ello no tardó en llegar su derogación.

El 26 de junio de 1982, conforme al RD 1587/82, fueron anuladas todas las prescripciones referentes a los distintos usos de la NBE-CPI-81, salvo las normas de carácter general, dejando el resto de decisiones a juicio de los órganos de control administrativo de cada ciudad o comunidad. Por tanto, en lo referente a la normativa se puede decir que hubo un gran retroceso. A partir de entonces se siguieron aplicando las diferentes ordenanzas locales, provinciales o autonómicas y con ellas

coexistía marginalmente parte de la norma NBE-CPI-81 que quedó en vigor, a lo cual en su conjunto se denominó NBE-CPI-82.

Tabla 3.1 Relación de los incendios históricos en España y publicación de normas de seguridad contra incendios.
Fuente: elaboración propia

Fecha	Incendio	Reglamento o norma a la que dio lugar	Victimas
23 septiembre 1928	Teatro Novedades (Madrid)	Primer Reglamento de espectáculos públicos.	67 muertos 200 heridos
22 noviembre 1977	Hospital materno-infantil de la ciudad sanitaria Virgen del Rocío (Sevilla)	1 septiembre 1978, por RD 2177/78 Se aprueba la norma de Protección Contra Incendios en Hospitales.	Sin víctimas
12 julio 1979	Hotel Corona de Aragón (Zaragoza)	25 septiembre 1979 se dictó una orden ministerial sobre Protección Contra Incendios en Hoteles	80 muertos
		10 abril 1981, por RD 2059/81, Se aprueba la Norma Básica de Protección Contra Incendios NBE CPI 81.	
		26 junio 1982, por RD 1587/82 Se establece la NBE CPI 82.	
		1 marzo 1991, por RD 279 Se aprueba la NBE-CPI-91	
		4 octubre 1996, por RD 2177/96 Se aprueba la NBE-CPI-96.	
13 febrero 2005	Edificio Windsor (Madrid)	El 17 de marzo 2006, por RD 314/06 Se aprueba el Código Técnico de la Edificación (CTE) Documentos Básicos DB-SI (Seguridad contra incendios) y DB-SU (Seguridad de utilización) conforman la normativa de protección contra incendios en la edificación.	Sin víctimas

Tuvieron que pasar varios años para que esta situación cambiara con la aparición de lo que se podría considerar la primera norma española de carácter nacional; se trataba de la NBE-CPI-91, la cual fue aprobada por el RD 279/91 de 1 de marzo. Las condiciones establecidas en esta norma eran más modernas y flexibles. Abordaba situaciones específicas, sin embargo, aplicarla debidamente implicaba el esfuerzo de estudiarla a fondo. Por esta razón tardó un tiempo en ser del agrado de todos los profesionales implicados en su aplicación.

Bajo la misma filosofía pero corrigiendo algunos errores y perfeccionando algunos conceptos llegaría la nueva norma NBE-CPI-96 aprobada por el RD 2177/96 de 4 de octubre. Esta normativa tenía como principal característica que estaba mucho más en consonancia con lo que se estaba haciendo en el resto de Europa. España, como miembro de la Unión Europea (UE), tuvo que someter la norma a revisión pública en Bruselas y considerar las alegaciones correspondientes por parte del comité europeo, las cuales, dieron lugar a algunos cambios. Esta normativa estuvo vigente durante 10 años, mucho tiempo según lo advertían distintas asociaciones de expertos en seguridad contra incendios, que consideraban que la norma se había quedado desactualizada en relación al progreso del sector de la construcción.

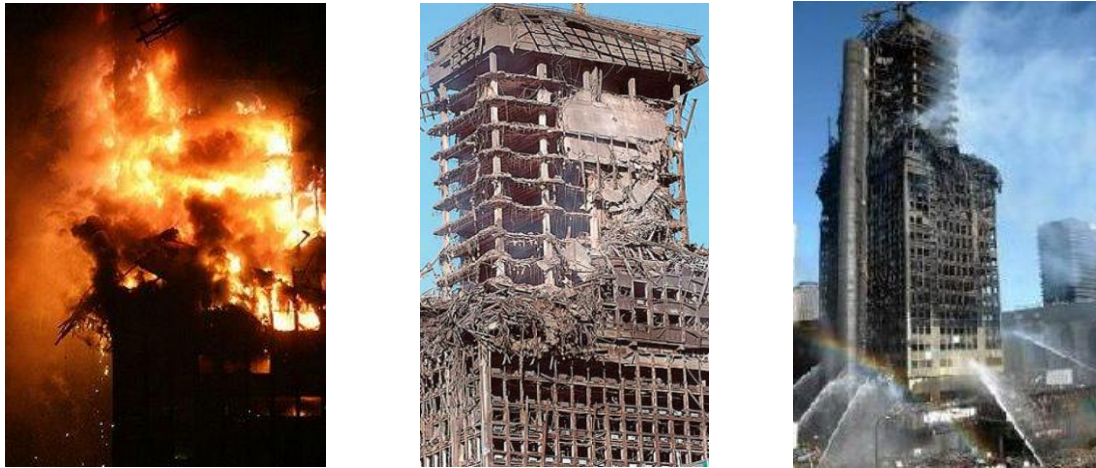


Fig. 3.6 Imágenes del incendio del edificio Windsor.
Madrid 13 de febrero de 2005.

Fuente: Blog de seguridad y protección contra incendios.
<http://bloganvela.com>

El final de esta norma estuvo marcado por un suceso grave, el incendio del edificio Windsor de Madrid (Fig. 3.6) que ocurrió en febrero de 2005. Meses antes del incidente se venía trabajando en la nueva normativa que daría fin a la NBE CPI 96, pero aún faltaban varios meses para su entrada en vigor. Este incendio, por su repercusión y gravedad, generó un aluvión de críticas que ponían el acento en los aspectos que la norma NBE CPI 96 no cubría adecuadamente y que se esperaba fueran considerados en la normativa que estaba siendo preparada. Entre otros aspectos, se cuestionaba la falta de medidas de control para la propagación exterior del fuego a través de los muros cortina y la evidente debilidad de este tipo de fachadas frente a un incendio, sobre todo aquellas que se clasifican dentro de la primera generación de muros cortina, en las cuales no se tomaba ninguna previsión para cubrir la cavidad del encuentro de los forjados con la fachada, como era el caso del edificio Windsor. Justamente, semanas previas al incendio se habían iniciado trabajos en la fachada de este edificio para acondicionarla (ver apartado 2.4.2) según las medidas de protección determinadas por el Reglamento de Prevención de Incendios de la Comunidad de Madrid [4].

Mediante un mandato de la LOE (Ley de Ordenación de la Edificación) el 17 de marzo de 2006 se dicta el RD 314/06 por el que se aprobaba el Código Técnico de la Edificación (CTE) y, dentro de él, los Documentos Básicos DB SI (Seguridad contra incendios) y DB-SU (Seguridad de utilización), que juntos, constituyen hoy el cuerpo legal de la protección contra incendios en España. A partir de su aparición la norma NBE CPI 96 quedó derogada, pero sigue vigente a efectos de revisiones e informes

periciales de edificaciones y construcciones anteriores a la entrada en vigor del referido CTE. Este breve repaso pone en evidencia que las practicas y conciencia real sobre la importancia de la PCI es un hecho reciente en el cual ha jugado un papel importante la influencia de la Unión Europea y las diversas iniciativas que ha promovido para mejorar y armonizar las normativas de los países miembros. La entrada en vigor del CTE no solo ha supuesto un cambio importante en la normativa que regula el sector de la construcción en España, sino que ha marcado el inicio de la equiparación con las normas europeas.

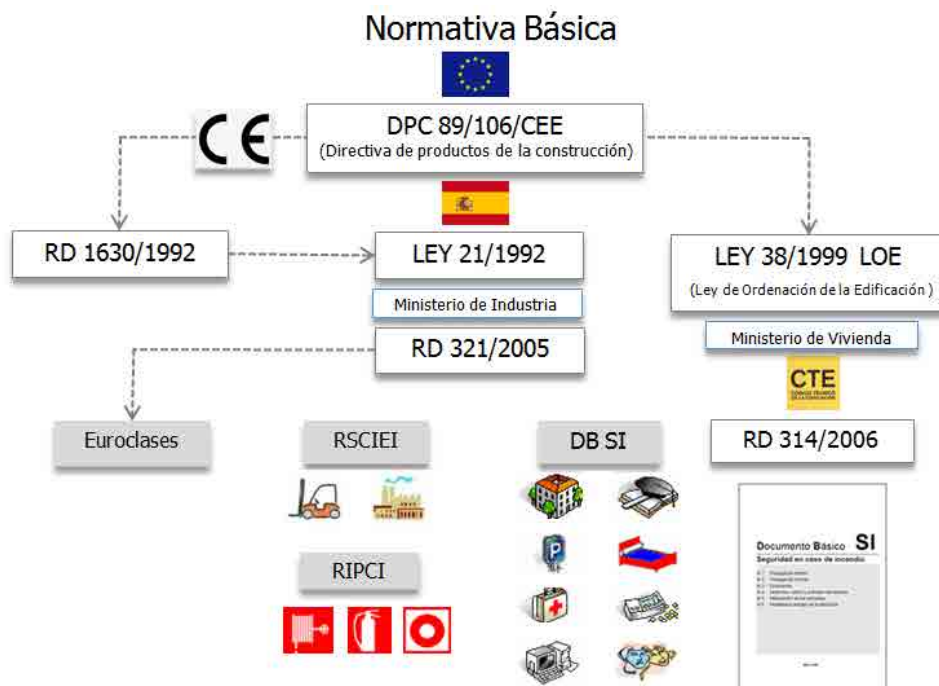


Fig. 3.7 Esquema que explica la secuencia de eventos en torno a la promulgación de la LOE y la puesta en vigor del CTE (Código Técnico de la Construcción).

Fuente: elaboración propia basada en presentación Jornadas CTE SI seguridad en caso de incendio. Javier Parras Simón

3.4 La entrada en vigor del CTE y la armonización europea

Uno de los pasos definitivos en la transformación de la normativa española estuvo determinado por la promulgación de la LOE (Ley de Ordenación de la Edificación, 38/1999, BOE 6-11-1999), la cual fue establecida para fijar unos requisitos básicos en la edificación y definir los ámbitos de aplicación, las competencias y las obligaciones de los agentes de la edificación. Fue constituida con el propósito de garantizar la seguridad de las personas, el bienestar de la sociedad, la sostenibilidad de la edificación y la protección del medio ambiente. El CTE define el marco jurídico que contiene los requisitos básicos de calidad de los edificios establecidos por la LOE. Dicho marco normativo armoniza la reglamentación nacional existente en la edificación

con las disposiciones de la Unión Europea vigentes en esta materia. En primer término con las relativas a la libre circulación de productos de la construcción dentro del mercado único europeo y, principalmente, con la Directiva 89/106/CEE, del consejo, de 21 de diciembre, conocida como la Directiva de Productos de la Construcción (DPC) [5]. Esta Directiva fue transpuesta al estado español mediante el RD 1630/1992 “Disposiciones para la libre circulación de productos de la construcción”. En segundo lugar según la Directiva 2002/91/CE, del Parlamento Europeo y del consejo, de 16 de diciembre, relativa a la eficiencia energética de los edificios, por la cual se han incorporado al CTE las exigencias relacionadas con los requisitos de eficiencia energética establecidos en esta directiva.

Este paso en materia de regulación trajo consigo la equiparación de las normas nacionales con las europeas, adoptando su simbología, su sistema de certificación, sus conceptos frente al problema del incendio y lo que ha sido más determinante la unificación de los métodos de ensayo de los productos, cambiando las antiguas UNE por las normas europeas EN, condición imprescindible para materializar la libre circulación de los materiales y productos de la construcción en todo el ámbito de la UE. También se han establecido como obligatorios los Eurocódigos relativos a todo tipo de estructuras.

El CTE además de los distintos Documentos Básicos (DB) de obligatorio cumplimiento de tipo prescriptivo “se alinea con el concepto denominado enfoque basado en prestaciones propugnado por las principales organizaciones Internacionales relacionadas con códigos de la edificación, tales como el Consejo Internacional de la Edificación, o el Comité Inter jurisdiccional de Colaboración Reglamentaria, ambos inspiradores de los códigos de países avanzados” [6]. Este enfoque, entre otras ventajas, aporta mayor libertad en el proyecto debido a que permite proponer soluciones alternativas a las dispuestas en los documentos básicos, siempre que puedan ser justificadas técnicamente. Este concepto prestacional no es nuevo del todo, la NBE CPI 91 ya hacía mención de la alternativa de adoptar otras soluciones distintas a las dispuestas en la normativa, siempre que el técnico proponente lo justificara técnica y documentalmente. Sin embargo, el concepto en el ámbito nacional no había alcanzado un nivel de madurez suficientemente, prueba de ello es que la gran mayoría de proyectos en España se han realizado, y aún se realizan, aplicando normativas prescriptivas. En algunos países como Holanda y Reino Unido se aplica la opción basada en prestaciones PBD en diferentes actividades de la edificación desde hace casi 30 años.

La integración de España en la Unión Europea supuso un acelerado cambio de modelo en diversas áreas, en las exigencias de los estándares de calidad de los productos y un cambio sustancial en la forma de ejecutar los procesos. Estos cambios no siempre son fáciles de llevar a término, de hecho, la UE tiene en frente un gran reto en su propósito de conciliar diversas culturas, lo cual, en definitiva, se traduce en diversas formas de pensar, de construir, de fabricar productos y de legislar.

En relación al uso industrial se estimó que los riesgos requerían un tratamiento distinto por tanto quedó fuera de las consideraciones de las normas básicas. El RD 786/01, de 6 de julio, aprobó el Reglamento de Seguridad Contra Incendios en Establecimientos Industriales (RSCIEI), hasta entonces, esta actividad no tuvo cobertura legislativa, lo cual dio lugar a la construcción de muchas naves industriales con precarias condiciones de seguridad. Debido a algunas insuficiencias detectadas en el documento, éste fue derogado el 27 de octubre de 2003. El 3 de diciembre de 2004, por el RD 2267/04 se estableció el nuevo RSCIEI que está en vigor en la actualidad. Su contenido estructura de forma simple unas tipologías de edificios industriales y una clasificación de riesgos, en función de los cuales define unos requerimientos de protección a implementar que incluyen medidas de protección pasiva y activa. El principal problema que presenta este documento es que quedó desactualizado con la entrada en vigor del CTE, debido a las muchas referencias que hacía de la norma NBE CPI 96 y de las normas UNE (actualmente anuladas por la UNE-EN). Por tal motivo el 5 marzo de 2005 se emite una Orden del Ministerio de Industria Turismo y Comercio corrigiendo algunas erratas del documento. El 14 de marzo de 2007, fue publicada una Guía de Aplicación del RSCIEI con correcciones sustanciales al documento original.

En relación a las instalaciones contra incendios, el 5 de noviembre de 2003 se aprobó el RD 1942/93 por el cual que aprobó el Reglamento de Instalaciones de Protección Contra Incendios RINCI el cual está actualmente en vigor. Se espera una actualización de esta norma en la cual se incluyan algunos procedimientos e instalaciones que no forman parte del documento actual.

A continuación se mencionan los conceptos más relevantes relacionados con la armonización de las normas europeas.

Mercado CE - El principal objetivo del mercado CE de un producto es declarar y acreditar la conformidad del producto con todos los requisitos comunitarios impuestos al fabricante por las Directivas Europeas. Garantiza la libre circulación de todos los

productos de construcción en la Unión Europea, mediante la armonización de las legislaciones nacionales relativas a los requisitos esenciales de los productos en materia de salud, seguridad y bienestar. Los Estados miembros deben presuponer que los productos que llevan el marcado CE cumplen todas las disposiciones de las directivas aplicables que regulan su colocación. Las iniciales CE proviene del francés y significa "*Conformité Européenne*" o, conformidad europea y es una marca europea para ciertos grupos de servicios o productos industriales. Se apoya en la directiva 93/68/EEC. El marcado CE no es una marca de calidad ni implica, por tanto, que el producto ofrece unas garantías o prestaciones de calidad extra; el marcado CE es el cumplimiento de unos requisitos mínimos relacionados con la seguridad y un requisito imprescindible legal para que se pueda comercializar un producto. El hecho de disponer de marcas de calidad no exime de la obligación de disponer del marcado CE. La marca CE puede considerarse como el pasaporte para el comercio del producto dentro de los países de la Unión Europea. En el caso de productos de construcción el marcado CE implica que el producto cumple las previsiones de la DPC (Directiva de Productos de Construcción) vía especificaciones técnicas armonizadas, incluyendo los procedimientos de evaluación de la conformidad.

DITE - El Documento de Idoneidad Técnica Europeo DITE (*European Technical Approval* ETA) es por definición, la evaluación técnica favorable de la idoneidad de un producto para el uso asignado (Art. 8.1 de la DPC). El DITE se requiere en aquellos casos en que no haya norma armonizada, que no se prevea que la pueda haber a corto plazo o cuando el producto se aparta de las normas armonizadas existentes. Es la vía para la obtención del marcado CE para los productos no normalizados de acuerdo con la DPC. El Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (IETcc) fue declarado el 27 de Diciembre de 1989 por el Ministerio de Industria y Energía, como el organismo oficial encargado de la concesión del DITE y representante español en la Organización Europea de Aprobación Técnica (EOTA), conforme al artículo 10.1 de la Directiva de Productos de Construcción DPC 89/106/CEE.

DIT - El Documento de Idoneidad Técnica, DIT, es equivalente al DITE a nivel local. Se trata de un documento de carácter voluntario expedido por el Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (IETcc), por el cual se obtiene una apreciación técnica favorable sobre la idoneidad del empleo en la edificación u obra civil de los materiales, productos, sistemas o procedimientos constructivos no tradicionales o innovadores.

El IETcc es el único Organismo español que tiene otorgada, por Decreto 3652/63 de Presidencia del Gobierno de fecha 26 de Diciembre de 1963 y Orden Ministerial 1265/88 de 23 de Diciembre de 1988, la facultad de conceder el DIT así como la confirmación de otros DIT concedidos por alguno de los Organismos Miembros de la Organización Europea en el ámbito de la UEAtc [7].

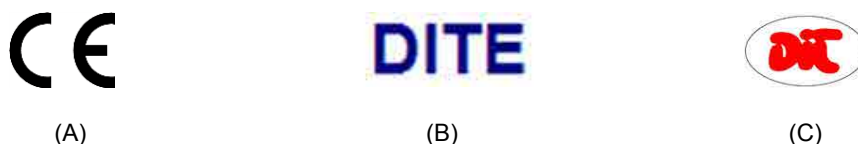


Fig. 3.8 Representación de los distintos certificados de productos.
 (A) Mercado CE europeo (B) Documento de Idoneidad Técnica Europeo (DITE)
 (C) Documento de Idoneidad Técnica (a nivel local).

Euroclases - El Comité Europeo de Normalización (CEN) trabaja desde 1988 en temas relacionados con el comportamiento frente al fuego de los productos de la construcción. Los estudios, decisiones, documentos y conclusiones desarrolladas en el marco del CEN durante todos estos años de existencia han configurado una serie de normas de ensayo, clasificaciones europeas, tablas de valores relacionadas con los productos y materiales construcción. La base que rige los productos de la construcción en el ámbito de la UE está representada en la Directiva de productos de la Construcción DPC 89/106/CEE (DOCE, 11 de febrero de 1989) Esta directiva supone un hito en la articulación del mercado europeo de la construcción. Esta directiva fue transpuesta a la legislación española mediante el Real Decreto 1630/1992 (y su posterior modificación RD 1328/95). En el año 2005 a través del RD 312/05, fue aprobada en España la clasificación europea de los productos de la construcción y de los elementos constructivos en función de sus propiedades de reacción y resistencia al fuego, lo cual se conoce también con el nombre de Euroclases de reacción y resistencia al fuego. La entrada en vigor del CTE y la publicación del RD 312/05 modificado posteriormente mediante el RD 110/08, han ratificado y consolidado la aplicación de estas Euroclases en el territorio nacional. La DPC 89/106/CEE fue creada con el propósito principal de eliminar obstáculos en los intercambios comerciales de productos de la construcción dentro del mercado interno de la UE. Establece los requisitos esenciales aplicables a las obras, ya sea de edificios o de proyectos de ingeniería civil. Dentro de estos requisitos encontramos los relacionados con la seguridad en caso de Incendio (requisito esencial núm. 2) en el cual se especifica que las obras han de proyectarse y construirse de forma que, en caso de incendio:

- la capacidad de sustentación de la obra se mantenga durante un periodo de tiempo determinado
- la aparición y propagación del fuego y del humo dentro de la obra estén limitados
- la propagación del fuego a obras vecinas esté limitada
- los ocupantes puedan abandonar la obra o ser rescatados por otros medios
- se contemple la seguridad de los equipos de rescate

Para dar cumplimiento a los requisitos establecidos por la Directiva las características técnicas de los productos deben cumplir con las siguientes condiciones:

(1) El marcado CE, indicando que el producto es conforme a las normas armonizadas o conforme a un Documento de Idoneidad Técnica DITE.

(2) Debe tener unas características técnicas suficientes que le permitan cumplir con los requisitos esenciales, como es el de seguridad en caso de incendio, según lo determinado por la Directiva. Para ello la Directiva ha constituido un marco común de clasificación de las propiedades de reacción y resistencia al fuego de los productos de construcción y los elementos constructivos. Esta clasificación a nivel comunitario se concreta mediante las siguientes normas armonizadas europeas:

- UNE-EN 13501-1:2007+A1:2010 “Clasificación de la reacción al fuego de los materiales de construcción”.
- UNE-EN 13501-2:2009+A1:2010 “Clasificación de resistencia al fuego de elementos de construcción”.

A continuación se realiza una breve descripción de la clasificación de los productos derivada de estas normas.

Clasificación de reacción al fuego

Se entiende por reacción al fuego de los materiales la respuesta de un material frente a un fuego al cual está expuesto y a su vez alimenta. Los ensayos de reacción al fuego considerados en las normas de ensayo consisten en realizar diferentes exposiciones del material al fuego en distintas configuraciones de acuerdo a su uso.

La valoración de la reacción al fuego de un material se realiza tomando en cuenta los siguientes aspectos:

- Combustibilidad: la cual se define como la capacidad de un material de mantener un proceso de combustión en unas determinadas condiciones de ensayo.
- Potencial calorífico o calor de combustión: es la cantidad de energía calorífica liberada por el material por unidad de masa en una combustión completa.

- **Inflamabilidad:** es la facilidad que tiene un material combustible para emitir gases que ardan. De este concepto se derivan otros importantes como:
 - (a) velocidad de propagación: que evalúa el avance superficial del frente de las llamas.
 - (b) velocidad de cesión de calor *HRR* de sus siglas en inglés *Heat Release Rate*: el cual está relacionado con la velocidad de generación de calor por unidad de tiempo.
 - (c) desprendimiento total de calor: el cual proporciona una idea de la cantidad de calor desprendida en un determinado intervalo de tiempo.
- **Emisión de humos:** capacidad de emitir humos que impiden la visión y por tanto dificultar la evacuación. También llamado opacidad.
- **Caída de partículas inflamadas:** ocurre cuando en la degradación del material por altas temperaturas se desprende gotas o partículas de material incandescente; cada una de estas es un potencial foco de incendio.
- **Toxicidad de gases:** consiste en la producción de gases nocivos para el ser humano durante los procesos de descomposición o pirolisis de los materiales. Se considera como la principal causa de mortalidad en los siniestros por fuego, ya que son los gases tóxicos los que provocan, por intoxicación y asfixia, el mayor número de fallecidos.

La norma EN 13501-1:2002 permite clasificar, en función de los resultados obtenidos en los ensayos, los materiales de construcción en su Euroclase correspondiente. En total la clasificación da lugar a 40 Euroclases para los materiales empleados en revestimientos de paredes y techos, y 11 para revestimientos de suelos. Está dividida en 7 niveles principales: A1, A2, B, C, D, E y F, donde A1 es el mejor y F corresponde a los productos y materiales no clasificados.

A1: No Combustible. Sin contribución en grado máximo al fuego

A2: No Combustible. Sin contribución en grado menor al fuego

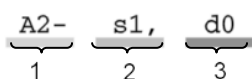
B: Combustible. Contribución muy limitada al fuego

C: Combustible. Contribución limitada al fuego

D: Combustible. Contribución media al fuego

E: Combustible. Contribución alta al fuego

F: Sin clasificar



1: Clasificación principal

2: Producción de humos

3: Caída de gotas

La reacción al fuego de un material viene definida por su Euroclase correspondiente, la cual incluye su reacción al fuego, densidad de humos que se generan durante la combustión s1, s2 y s3 y el desprendimiento de gotas o partículas inflamadas d0, d1 y d2. Para revestimientos de paredes y techos la Euroclase viene definida por tres parámetros: una primera letra (A1, A2, B, C, D, E y F) indica la reacción al fuego del material en términos de inflamabilidad, desarrollo de llamas, velocidad de cesión de calor, etc., un segundo parámetro que indica el grado de opacidad de humos (s1, s2 y s3) y un tercero que indica el tipo de gotas o partículas desprendidas en su caso (d0, d1 y d2). Por otro lado, los revestimientos de suelos quedan definidos únicamente por dos parámetros: una primera letra (A1fl, A2fl, Bfl, Cfl, Dfl, Efl y Ffl,) y una segunda relativa a la opacidad de los humos generados (s1 y s2) similares al caso de revestimientos de paredes y techos. De esta forma la Euroclase de reacción al fuego de un material lleva asociada una información amplia sobre el material, a diferencia de la información básica que ofrecía la anterior clasificación UNE 22727:1190 por las cual se clasificaban los materiales en función de su contribución al desarrollo del incendio como M0, M1, M2, M3 y M4.

Tabla 3.2 Nomenclatura de las Euroclases de reacción al fuego: UNE EN 13501-1

Clasificación según: (clasificación principal)	COMBUSTIBILIDAD	Aplicación final			COMBUSTIBLE	CONTRIBUCIÓN AL FUEGO	
		Paredes techos	suelos	Productos lineales para aislamiento térmico de tuberías			
	A1	A1 _{FL}	A1 _L	NO	NO	grado máximo	
	A2	A2 _{FL}	A2 _L	NO	NO	grado menor duración de la llama <20s	
	B	B _{FL}	B _L	SI	SI	Muy limitada	
	C	C _{FL}	C _L	SI	SI	Limitada	
	D	D _{FL}	D _L	SI	SI	Media	
	E	E _{FL}	E _L	SI	SI	Alta	
	F	F _{FL}	F _L	Sin clasificar sin comportamiento determinado			
Clasificaciones adicionales según:	OPACIDAD DE HUMOS	Cantidad y velocidad de emisión			Baja	s1	Observaciones: Las clases A1, A1 _{FL} y A1 _L , E, E _{FL} y E _L y F, F _{FL} y F _L no se clasifican bajo este concepto
					Media	s2	
					Alta	s3	
	CAÍDA DE GOTAS O DE PARTÍCULAS INFLAMADAS	Sin caída (UNE_EN 13823:2002) en 600 s				d0	Observaciones: Las clases A1, A1 _{FL} y A1 _L y F, F _{FL} y F _L no se clasifican bajo este concepto
Sin caída (UNE_EN 13823:2002) durante más de 10 s				d1			
Ni d0, ni d1				d2			

Escenarios de referencia

Uno de los aspectos a destacar sobre la clasificación de los productos por su reacción al fuego lo constituyen las condiciones de ensayo en las cuales éste parámetro es evaluado. Del amplio rango de situaciones en las que un incendio puede iniciarse y desarrollarse, la Comisión Europea ha determinado cuatro situaciones típicas (escenarios) consideradas como las más representativas de lo que sucede en un fuego real. De modo que los ensayos correspondientes han sido diseñados en función de las situaciones a las cuales un material de construcción se puede ver sometido. Básicamente los métodos de ensayo abarcan tres niveles del desarrollo de un incendio:

- el ataque puntual por una llama pequeña.
- un objeto en llamas, como puede ser una papelera o un mueble pequeño.
- un fuego plenamente desarrollado en un local.

Con el propósito de cuantificar los parámetros establecidos y simular, en la medida de lo posible, los distintos escenarios de fuego, el CEN estableció cinco ensayos, cuatro de ellos ya existían como normas ISO, sin embargo uno es completamente nuevo, se trata del ensayo de SBI (*Single Burning Item*).

Ataque puntual por una llama pequeña

Ensayo UNE EN ISO 11925-2:2002, simula una etapa inicial del incendio.

Un objeto ardiendo en la esquina de una habitación

Ensayo de SBI (*Single Burning Item*) de acuerdo a la norma UNE EN 13823:2002. Simula un escenario de fuego previo al “*flashover*”, entendiéndose éste como el instante en el cual el incendio pasa de estar localizado (en una papelera o un mueble) a estar involucrado completamente un recinto determinado.

Fuego totalmente desarrollado en una habitación

Ensayos a pequeña escala UNE EN ISO 1182:2002 de determinación de la no combustibilidad y UNE EN ISO 1716:2002 para la determinación del potencial calorífico superior. Uno de los más importantes es el ensayo a escala real RCT (*Room Corner Test*) (ISO 9705) EN 14390:2002, el cual simula el escenario de fuego posterior al *flashover*, es decir un incendio plenamente desarrollado en el interior de un recinto.

El ensayo RCT es la base del nuevo sistema de clasificación europeo para los productos de construcción, es el escenario de incendio a gran escala de referencia en toda Europa. A partir de sus resultados se han determinado los límites definidos por las Euroclases:

- Los productos de la construcción clasificados A1, A2 y B son productos seguros en materia de reacción al fuego: estos no producen el fenómeno de *Flashover*.
- Los productos de la construcción C, D y E son los productos más peligrosos en materia de reacción al fuego: estos provocan el fenómeno del *Flashover* en un periodo de tiempo extremadamente corto.

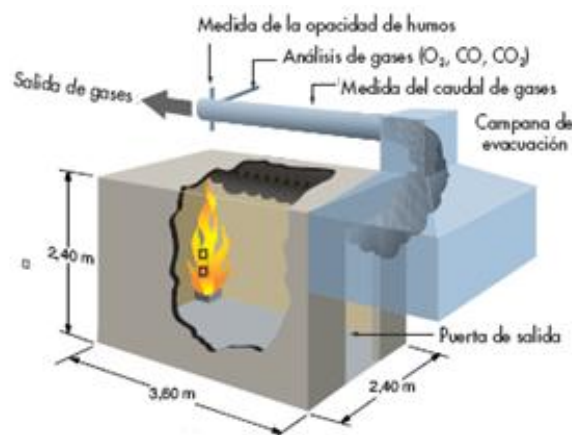


Fig. 3.9 Gráfico que representa el *Room Corner Test* (RCT).
Fuente: Documento técnico Rockwool. La lana de roca y las Euroclases

El ensayo del RCT se realiza en una cámara con las dimensiones características de una habitación pequeña (Fig. 3.9), el ensayo se centra en determinar las circunstancias en las que ocurre el *flashover* en el recinto, el tiempo en el que se da y la cantidad de energía y humos emitidos.

En relación a las fachadas es importante hacer algunas consideraciones importantes referentes a los métodos de ensayo.

La norma de clasificación EN 13501-1 exige que los resultados de los ensayos estén relacionados, en la medida de lo posible, con la aplicación final del producto. Por lo tanto los resultados realizados a los sistemas de fachadas han de incluir información acerca del montaje y fijación del producto durante el ensayo. Esto ha dado lugar a la publicación de especificaciones técnicas emitidas por el CEN como la CEN/TS 15447, 2006 y la CEN TC127, que proporciona una guía sobre la forma de montar y fijar los

productos en los ensayos de reacción al fuego. Sin embargo en ellos no se cubren todas las situaciones propias de cada sistema o producto.

Uno de los tipos de productos que ha generado mayores cuestionamientos son los paneles sándwich con recubrimiento metálico. Se ha cuestionado que un ensayo a escala intermedia, como el SBI, pueda reflejar el riesgo real del producto, dado que el comportamiento apreciado durante un primer *Round Robin* (prueba preliminar) del SBI fue muy diferente al que se observa en el ensayo del SBI respecto al ISO 9705 RCT.

En el caso de paneles sándwich con un núcleo combustible, la exposición al calor produce gases inflamables en el interior del panel. Como consecuencia el recubrimiento metálico del lado expuesto del panel empieza a abombarse, lo cual provoca la separación de las juntas de los paneles y la inflamación de los gases contenidos en el núcleo. Teniendo en cuenta que la exposición al calor y las dimensiones de la muestra en el ensayo SBI son insuficientes para provocar el abombado de los paneles, la mayoría de los paneles con un núcleo combustible obtendrán una clasificación alta en el ensayo SBI, indicando que no son susceptibles de causar *flashover* en una habitación pequeña. Sin embargo, muchos de estos paneles producirán *flashover* si se someten al ensayo ISO 9705 RCT, de modo que no existe una correlación coherente entre el ensayo SBI y el ensayo ISO 9705 RCT a gran escala para este grupo de productos. Por tanto, si este producto se comercializa de acuerdo a los resultados del ensayo SBI no se está informando del riesgo real del producto frente al fuego.

También el uso del sistema de ensayos de las Euroclases ha sido cuestionado extensamente en su aplicación para las fachadas. Se ha de tener en cuenta que el escenario de referencia corresponde a un incendio en un local cerrado, por tanto, el comportamiento del material en su aplicación final en condiciones externas puede diferir enormemente. En este sentido, sería necesario definir un nuevo escenario de referencia capaz de simular una situación propia de este tipo de desarrollo y propagación del incendio. En el año 2005 los Servicios de la Comisión crearon un grupo de trabajo que incluía a reguladores responsables en materia de incendios con la tarea de redactar una instrucción para el CEN con el objetivo de “evaluar las características del comportamiento al fuego de los sistemas de fachadas y de revestimiento de fachadas”, sin embargo esta instrucción no llegó a formalizarse y la tarea de definir un método de ensayo para las fachadas se trasladó a la EOTA. Cabe esperar que este organismo determine un método de ensayo adecuado para este

segmento de la edificación que constituye un relevante riesgo de propagación del fuego en una situación de incendio [8].

Clasificación de resistencia al fuego de los elementos constructivos

Para los elementos constructivos la clasificación europea de las propiedades de resistencia al fuego se rige por el RD 312/05 y la Norma UNE-EN 13501- 2:2002. Sus Euroclases son:

R = Capacidad portante resistente

E = Integridad (no aparición de fisuras)

I = Aislamiento (capacidad de reducir la transferencia de calor)

Tabla 3.3 Exigencia general para los elementos constructivos de acuerdo a las Euroclases de resistencia al fuego: UNE EN 13501-2

Tipos de elementos constructivos y características		Clasificación (t) 15 – 360 min.
ELEMENTOS PORTANTES	- sin función de separación frente al fuego - con función de separación frente al fuego	R t REI t
PARTICIONES	- con función de separación frente al fuego	EI t E t
TECHOS	- con resistencia intrínseca al fuego	EI t
FACHADAS (muros cortina) y MUROS EXTERIORES (incluido elementos de vidrio)		EI t E t
SUELOS ELEVADOS		*REI t
SISTEMAS DE OBTURACIÓN	- de penetración de cables y tuberías - (sellado) de penetración de cables y tuberías	EI t E t
PUERTAS	- y elementos paracticables resistentes al fuego y sus dispositivos de cierre - de piso de ascensor	**EI ₂ -C t ⁽²⁾ E-C t ⁽²⁾ E t ⁽³⁾
CONDUCTOS Y PATINILLOS	- para instalaciones y servicios	EI t
CONDUCTOS DE VENTILACIÓN Y COMPUERTAS (excluidos los utilizados en sistemas de extracción de calor y humos)	- resistentes al fuego	EI t
CONDUCTOS Y COMPUERTAS para el control de humo	- en un único sector de incendio - resistentes al fuego, en más de un sector de incendio	E ₆₀₀ t EI t
COMPUERTAS -para el control de humo	- en más de un sector	EI t
EXTRACTORES MECÁNICOS (ventiladores) de calor y humo		F ₄₀₀ t ⁽⁴⁾

(1) Hay otros parámetros adicionales que pueden figurar en la clasificación de cada tipo de elemento constructivo (Anexo III RD 312/2005)

* La clasificación se completa añadiendo el sufijo "f" para indicar resistencia plena al fuego (REI t- f) o el sufijo "r" para indicar la resistencia, únicamente, a una temperatura constante (REI t- r) (Anexo III RD 312/2005).

(2) Mientras no esté disponible la norma que define el procedimiento de ensayo que permita signar el parámetro C a la clasificación de las puertas resistentes al fuego (indicativo de la calidad de cierre automático), se aceptará la ausencia de este parámetro siempre y cuando las puertas tengan un sistema de cierre automático según se fija al apartado "Sistemas de cierre automático de las puertas resistentes al fuego".

** La clasificación I se completa con el sufijo 1 ó 2 para indicar la definición del aislamiento utilizado. Anexo III RD 312/2005).

(3) Conforme a la norma UNE EN 81-58:2004 "Reglas de seguridad para la construcción e instalación de ascensores. Exámenes y ensayos - Parte 58: Ensayo de resistencia al fuego de puertas de piso".

(4) Conforme a la norma UNE EN 12101-3: 2002 "Sistema de control de humos y calor. Parte 3. Especificaciones para aireadores extractores de humos y calor mecánicos".

Además de esta nomenclatura básica incluye otros códigos para acciones complementarias:

W - Emisión de calor por radiación.

M - Impacto mecánico.

C - Cierre automático.

S - Estanqueidad a humos.

P/HP - Continuidad de corriente eléctrica.

o → e, e → o - Fuego de exterior a interior o viceversa.

h_o, V_e - Posición horizontal o vertical.

A → b, b → a - Fuego de arriba o fuego de abajo.

Las clases se combinan siempre con un tiempo expresado en minutos. Estas clases de tiempo podrían ser desde 15 hasta 360 minutos en los pasos definidos en la norma de clasificación EN 13501-2. Por ejemplo, una pared divisoria con capacidad portante, normalmente está clasificada como REI 60, lo que significa que mantendrá su capacidad de carga, así como su función de separación contra el fuego durante 60 minutos de un fuego totalmente desarrollado.

A los elementos no portantes sólo se les da la clasificación IE o E en combinación con una tiempo determinado. Este caso cubre, por ejemplo, las particiones de vidrio, especialmente estable al fuego, las cuales evitan la penetración de llamas y gases calientes pero no proporcionan aislamiento contra el calor y por ello se clasifican como E. Una columna de soporte de carga, la cual obviamente no es un elemento de separación, puede, en consecuencia, tener únicamente la clasificación de resistencia al fuego R junto con una medida de tiempo. La tabla 3.3 muestra una clasificación general de las exigencias de resistencia estipuladas por el CTE de acuerdo a la ubicación de los elementos y su función en el edificio. Existen diferentes tablas que detallan las características de los elementos y el tiempo de resistencia exigido.

3.5 El control de la propagación exterior del fuego según el CTE

La entrada en vigor del CTE, como se ha mencionado antes, ha supuesto cambios importantes en la filosofía de la protección contra incendios y en definitiva un avance en la equiparación con otros países europeos en materia de clasificación de productos. Sin embargo, en relación a la propagación exterior del fuego y la protección de las fachadas, los cambios han sido insustanciales respecto a la norma NBE CPI 96. El CTE podría haber sido una oportunidad para incorporar mejoras en referencia a las fachadas, teniendo en cuenta que este segmento del edificio ha evolucionado hacia soluciones y sistemas que demandan nuevos requerimientos en relación a la

protección contra incendios. Sin embargo la situación real es que los vacíos de la normativa anterior han trascendido a la nueva normativa.

El documento básico del CTE sección 2 contiene las especificaciones relacionadas con la propagación exterior del fuego. También hace una breve alusión a las cámaras ventiladas de las fachadas en la sección 1 apartado 3, la cual es expuesta dentro del concepto “espacios ocultos” (ver apartado 3.5.1). En general, los principales vacíos que se detectan en la norma en relación al tema que nos ocupa se podrían resumir en dos puntos:

- (1) Las disposiciones de protección contra el fuego en las fachadas son muy genéricas, lo cual da lugar a vacíos y a un amplio margen de interpretación.
- (2) No hace ninguna referencia explícita a las tipologías de fachada. Los medios de protección considerados para una fachada convencional son los mismos previstos para cualquier otra tipología, ya sea una fachada ventilada, un muro cortina o una fachada de doble piel. La normativa no se apoya en otros documentos técnicos que aborden los aspectos no contenidos en los Documentos Básicos, como ocurre en las normas de otros países (ver apartado 3.6.2).

Si esta es la situación de las fachadas respecto a la protección contra incendios en el marco del CTE cabe preguntarse ¿cómo se justifican técnicamente (para la concesión de licencias de construcción) frente a la protección contra incendios las fachadas con tipología no convencional? A continuación se explican los medios empleados para justificar técnicamente un proyecto cuyo cerramiento es una fachada ventilada o un muro cortina.

- **Tipologías de fachada no contempladas por el CTE**

Fachadas ventiladas

Dado que la mayoría de aspectos relacionados con las fachadas ventiladas (entre otros, los relacionados con el comportamiento frente al fuego) no están recogidos de forma explícita por los diferentes Documentos Básicos (DB) del CTE, las soluciones comercializadas por los fabricantes deben ser planteadas como soluciones alternativas al CTE, por lo que debe justificarse su idoneidad mediante el establecimiento de equivalencias de sus prestaciones frente a las que se obtendrían con solo aplicar los

requerimientos estipulados en los DB. Entre los documentos de referencia empleados para este fin se consideran:

- Las especificaciones técnicas armonizadas de la Directiva de Productos de la Construcción DPC 89/ 106 / CEE, lo cual incluye: las normas armonizadas de ensayo y los Documentos de Idoneidad Técnica Europeos DITE (*European Technical Approval* ETA), obtenidos según los requerimientos especificados en la Guías DITE (ETAG) o de acuerdo a los procedimientos establecidos por los distintos organismos miembros de la EOTA. El *Institut de Tecnologia de la Construcció de Catalunya*, ITeC, forma parte de esta organización.

-Los informes técnicos de la EOTA (*Technical Reports*) referentes a los métodos de verificación de las propiedades técnicas de algunos productos de la construcción.

-Las normas internacionales (ISO) o normas de otros países europeos en cuyo marco legislativo se contemple el sistema constructivo en cuestión, e incluya métodos de verificación y criterios de evaluación para el mismo.

-Otras normas y documentos nacionales de idoneidad como el DAU Documento de Adecuación al Uso.

Como se mencionó antes, el CTE plantea un enfoque alternativo para la justificación de las exigencias básicas estipuladas. En el artículo 5 especifica que las dos alternativas posibles para ello son:

(1) Adoptar en el proyecto soluciones técnicas basadas en los DB, cuya aplicación acredita su cumplimiento.

(2) Adoptar soluciones técnicas alternativas a las estipuladas por los documentos básicos, en cuyo caso han de ser justificadas en el cumplimiento de los requerimientos. También se indica que la justificación de las soluciones técnicas alternativas a las contempladas en los DB consiste en establecer la equivalencia de las prestaciones respecto a las que se obtienen al aplicar los DB.

En relación a la seguridad en caso de incendio (SI) los parámetros prestacionales a considerar son la reacción y la resistencia al fuego. La justificación de las exigencias básicas se realiza aplicando directamente los valores límite indicados en el DB CTE SI

sección 1 y SI sección 2, es decir, las exigencias genéricas estipuladas para todas las tipologías de fachadas. Respecto a la propagación por el interior de la cámara ventilada, se tiene en cuenta la exigencia de clase de reacción al fuego, según lo indicado en la tabla 4.1 del DB SI1 (ver apartado 3.5.1), aplicado a la hoja interior del cerramiento, la cual es normalmente, un muro de fábrica de ladrillo, por tanto, sin problema cumple con los límites determinados. Con respecto a la propagación exterior, se consideran los valores límite y criterios de resistencia al fuego indicados también en el DB SI2 (propagación horizontal y vertical) aplicables al tramo de fachada que debe impedir la propagación del fuego de un recinto a otro a través de la fachada. Este requisito deberá ser asumido únicamente por la hoja interior del cerramiento de la fachada. De esta forma, si se considera una hoja interior de cerramiento a base de fábrica de ladrillo guarnecida por la cara expuesta, según la tabla F.1 del Anejo F del DB SI (ver anexo 2 de este documento), su resistencia al fuego sería EI 180, por lo tanto la fachada cumpliría sobradamente el valor límite EI 60 exigido [Bento 2010].

Respecto a la reacción al fuego en las fachadas, los componentes de la hoja exterior, y en especial el revestimiento se considera el valor límite indicado en el párrafo 4 del apartado 1 del DB SI2. Adicionalmente, los componentes auxiliares de la hoja exterior (por ejemplo, sellado de juntas) o los componentes que se encuentren sobre la superficie exterior de la hoja principal y en contacto con la cámara de aire (por ejemplo, aislantes térmicos) también deben cumplir con este valor límite para las condiciones establecidas en el DB SI2 (ver apartado 3.5.1).

En referencia a la subestructura de la fachada (componentes y materiales) no se realiza ninguna justificación teniendo en cuenta que los requerimientos en todo caso se aplican sobre la hoja interior. Respecto a la cámara ventilada, y su compartimentación, basta con cumplir con lo estipulado en el DB SI1 sección 3, lo cual según se discute en el apartado 6.5.2 de esta investigación resulta ser una medida que se considera insuficiente. De acuerdo al planteamiento de la norma, cualquier mejora en las medidas de protección dependerá del criterio del proyectista.

De este modo, en las fachadas ventiladas pese a estar clasificadas como fachadas ligeras, se puede justificar su conformidad con el CTE DB SI, prácticamente como si se tratara de fachadas convencionales, teniendo en cuenta que los requisitos se pueden aplicar a su hoja interior.

Muros cortina

En los muros cortina, al igual que en las fachadas ventiladas se aplican los requerimientos genéricos recogidos en el CTE DB SI sección 2 (ver apartado 3.5.1). Es por ello que la imagen exterior de este tipo de fachadas se caracteriza por la presencia de unas bandas de cerramiento opaco que se alternan con el cerramiento acristalado. Resulta curioso, pero el motivo de esta decisión estética tan determinante, en la mayoría de los casos, obedece a la exigencia de la norma de protección contra incendios en las fachadas. No obstante, para el caso de los muros cortina existe una normativa europea aplicable, que responde a los parámetros marcados por la Directiva de Productos de la construcción (DPC) y la obligatoriedad del Mercado CE para fachadas ligeras. Se trata de la normativa UNE EN 13830:2004 que surge en el año 2003 supliendo el vacío que habían tenido los sistemas de envolventes acristalados durante años.















Reaction to fire **		Thermal shock Resistance	
Fire resistance **		Resistance to live horizontal loads	
Fire propagation **		Air Permeability	
Watertightness		Water vapour permeability	
Resistance to dead load (self weight)		Thermal transmittance	
Resistance to wind load		Airborne sound insulation	
Resistance against impact		Durability	

Fig. 3.10 Requisitos exigidos a los muros cortina de acuerdo con la norma EN 13830.

Fuente: Documento técnico CE marking of curtain Walling. FAECF, 2004

En la actualidad las normas UNE EN 13830:2004 y marcado CE de los muros cortina son los documentos oficiales que especifican las características de los muros cortina y proporcionan información técnica acerca de sus requisitos, rendimiento y aplicación en toda Europa. El comité técnico 33 del CEN es el responsable del desarrollo de normas para puertas, ventanas, persianas y muros cortina. Esta norma europea especifica las características que deben tener los muros cortina y proporciona información técnica sobre los requisitos de rendimiento. Además, el documento constituye una guía para el fabricante de muros cortina sobre la manera de cumplir con las exigencias planteadas por la DPC. En la Fig. 3.10 se especifican las características esenciales exigidas a los

muros cortina de acuerdo a la norma EN 13830. En la tabla 3.4 se hace una relación de los ensayos armonizados a los que hace referencia la EN 13830 para obtener la conformidad de aplicación de los sistemas de muro cortina en cualquier país miembro de la UE representado en la marca CE. Esta certificación es de carácter obligatorio desde el año 2006 para los sistemas de muro cortina.

Tabla 3.4 Relación de normas de ensayos exigidos a los muros cortina.

Fuente: elaboración propia

Norma (método de ensayo)	Nombre
EN 13501:2007+ A1: 2010	Nueva clasificación europea de productos
UNE-EN 13501-2:2009+A1:2010	Clasificación en función del comportamiento frente al fuego de los productos de construcción y elementos para la edificación. Parte 2: Clasificación a partir de datos obtenidos de los ensayos de resistencia al fuego excluidas las instalaciones de ventilación
UNE-EN 1364-3:2008	Ensayos de resistencia al fuego de elementos no portantes. Parte 3: Fachadas ligeras. Tamaño real. Configuración completa.
UNE-EN 1364-4:2008	Ensayos de resistencia al fuego de elementos no portantes. Parte 4: Fachadas ligeras. Configuración parcial.

Los tres aspectos considerados en los ensayos son:

Reacción al fuego: EN 13501-1 (Clasificación del productos y elementos constructivos Parte 1 clasificación de acuerdo con los datos de prueba correspondiente a la reacción frente al fuego) Como se ha visto en un apartado anterior, esta norma establece los métodos de ensayo para la clasificación de los productos de la construcción. En cuanto a la reacción al fuego en las fachadas ligeras aún no se ha desarrollado un escenario de evaluación específico.

Resistencia al fuego: EN 13501-2 (Clasificación de productos y elementos constructivos – Parte 2 Clasificación de las fachadas (muro cortina) y muros externas (incluyendo elementos de vidrio). Según el tipo de muro cortina debe ser probado de acuerdo con las normas de ensayo EN 1364 – Parte 3 y otras partes del espécimen de acuerdo con EN 1364 Parte 4.

Propagación del fuego: La norma menciona que debe tomarse precaución para prevenir la transmisión de fuego y humo a través de los huecos en el muro cortina, sin embargo, no se indican métodos de ensayo para evaluar el tipo de sellos a emplear en la cavidad del encuentro forjado-fachada, tampoco se indican alternativas para evitar la transmisión del fuego y el humo a través de los huecos (ventanas) en el muro

cortina, lo cual evidentemente sería un aspecto a considerar teniendo en cuenta la enorme proporción de superficie de ventanas que caracteriza este sistema de fachada. En un estudio de investigación europeo denominado BestFacade [9] realizado por expertos de siete países miembros de la UE se realizó un sondeo que contempla desde distintos puntos de vista la aplicación en los países de la UE de las fachadas acristaladas, en particular de las DSF (*Double Skin Facade*). Contiene un apartado en el que se estudian las normativas aplicadas en el cual se incluyen las normas de seguridad contra incendios. De acuerdo al estudio, a pesar de la existencia de esta normativa específica a nivel europeo en muchos de los casos, al igual que en España se aplica la legislación vigente local aplicada en las fachadas convencionales. En proyectos grandes, generalmente con presupuestos altos, se incorporan sistemas de muros cortina que cuentan con el correspondiente marcado CE, sin embargo se trata de una minoría. En la fig. 3.11 se especifican los sistemas de muro cortina cubiertos y los no cubiertos por la norma UNE EN 13830 y el marcado CE.

El encuentro del forjado y la fachada constituye el punto más conflictivo a resolver en este tipo de fachadas, es por ello que existe una amplia oferta de productos en el mercado con diferentes soluciones, muchas de ellas avaladas con certificaciones locales que suelen ser suficientes para la justificación de conformidad con cumplimiento de la seguridad en caso de incendio en el proyecto.

En la fig. 3.12 se aprecian algunas imágenes de los ensayos realizados a los sistemas de muro cortina para obtener la marca CE y por tanto cumplir con lo dispuesto en la norma UNE EN 13830:2004.

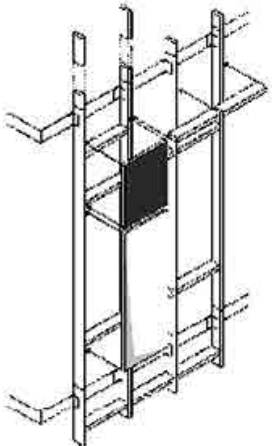
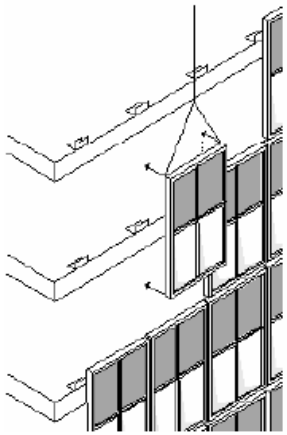

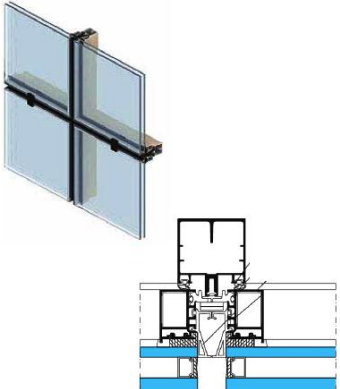
Tipos de muro cortina cubiertos por la norma UNE EN 13830 y el marcado CE	
	
<p>Sistema de montantes y travesaños</p> <p>Características:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fachada colgada (no apoyada) • Dilatación vertical entre plantas • Dilatación horizontal entre montantes • Fijación al canto del forjado • Vidrio no colaborante (elemento de relleno) 	<p>Sistema de fachada modular</p> <p>Características:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fachada colgada (no apoyada) • Dilatación vertical entre plantas (doble travesaño) • Dilatación horizontal entre semi montantes • Ajustes de forjado-fachada con anclaje por encima del forjado • Vidrio no colaborante (elemento de relleno)
Tipos de muro cortina no cubiertos por la norma UNE EN 13830 ni por el marcado CE	
	
<p>Sistema de vidrio abotonado o atornillado</p>	<p>Sistema de vidrio pegado con silicona estructural</p>

Fig. 3.11 Tipos de muro cortina cubiertos y no cubiertos por la normativa UNE EN 13830.
Fuente: elaboración propia basada en presentación de Ignacio Fernández Solla. ARUP. Jornadas técnicas VETECO, 2008

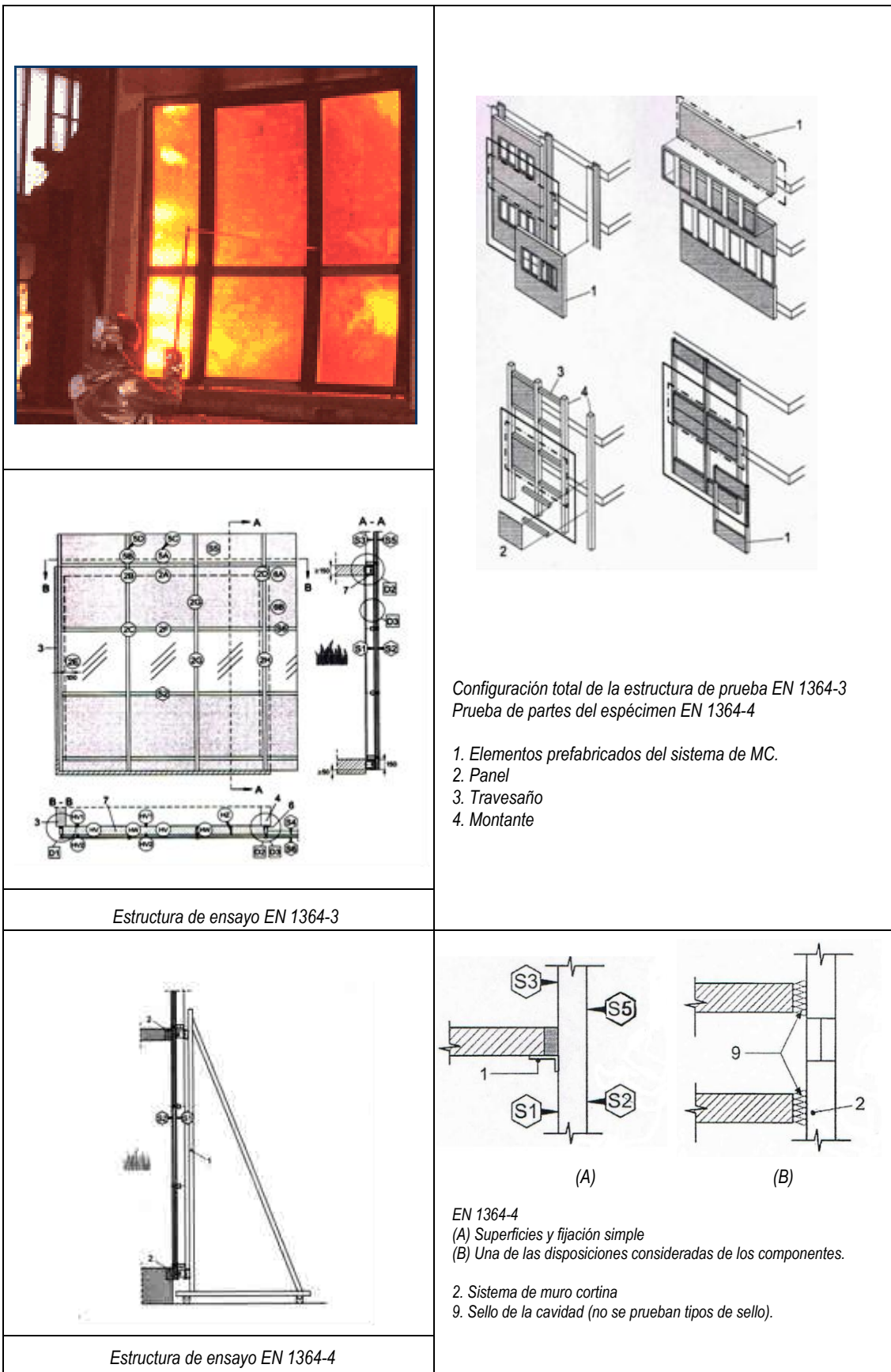


Fig. 3.12 Algunos esquemas relacionados con los procedimientos de ensayo para muros cortina EN 1364-3 y EN 1364-4.

Fuente: elaboración propia basada en la información suministrada por el Laboratorio del fuego de Applus

3.5.1 Disposiciones contempladas en el Documento Básico SI del CTE

A continuación se exponen las disposiciones contempladas por el CTE en relación al control de la propagación exterior del fuego. Se realiza la comparativa con la normativa NBE CPI 96 que quedó derogada con la entrada en vigor del CTE.

- Limitación de la propagación vertical del fuego

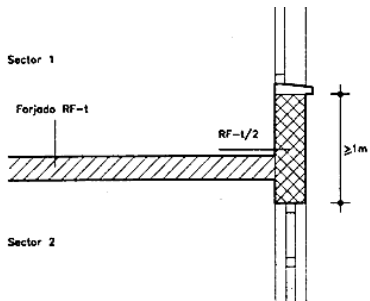
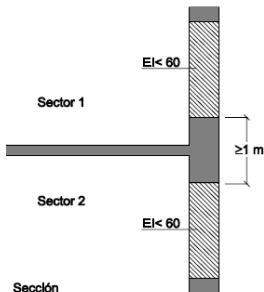
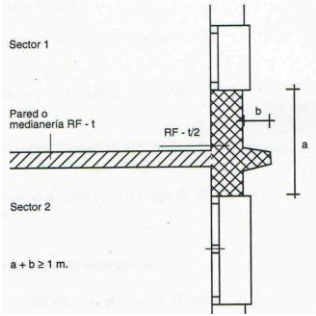
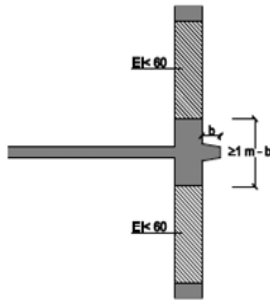
NBA CPI 96 (anterior)	CTE DB SI 2 (vigente)
<p>Limitación de la propagación vertical encuentro forjado – fachada → en una franja de $H \geq 1$ m de altura $RF_{\text{fachada}} \geq \frac{1}{2} RF_{\text{forjado}}$</p>  <p style="text-align: right;">Sección</p>	<p>Limitación de la propagación vertical entre dos sectores de incendio fachada al menos EI 60 → en una franja de $H \geq 1$ m de altura</p>  <p style="text-align: right;">Sección</p>
 <p>La franja de 1 m podrá reducirse en la dimensión de un elemento saliente.</p>	 <p>La franja de 1 m podrá reducirse en la dimensión de un elemento saliente.</p>

Fig. 3.13 Disposiciones contempladas por la normativa sobre el control de la propagación vertical del fuego.
 Fuente: NBE CPI 96 y CTE

Las disposiciones en referencia a la limitación de la propagación vertical del fuego están recogidas en el DB SI sección 2 apartado 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. 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” (Fig. 3.13).

Comentario:

No hay ninguna diferencia sustancial en este aspecto, las exigencias son las mismas solo ha cambiado la nomenclatura de la clasificación de resistencia al fuego de acuerdo a las Euroclases. En la norma CPI 96 se determinaba que la franja debía tener al menos la mitad de la resistencia al fuego del forjado, el CTE en todos los casos especifica EI 60, por lo tanto solo determina Integridad E (no aparición de fisuras) y aislamiento I (capacidad de reducir la transferencia de calor). No considera la R (capacidad portante).

• Limitación de la propagación horizontal del fuego

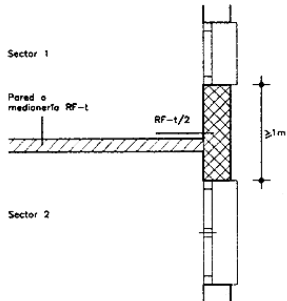
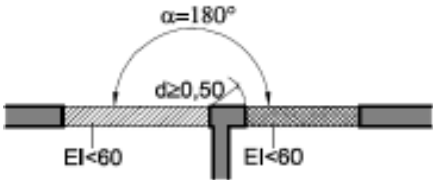
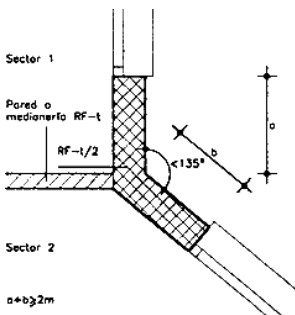
NBA CPI 96 (anterior)	CTE DB SI 2 (vigente)
<p>Limitación de la propagación horizontal el encuentro pared – fachada → en una franja de $H \geq 1$ m de ancho con $RF_{\text{fachada}} \geq \frac{1}{2} FR_{\text{forjado}}$</p>  <p>Vista en planta</p>	<p>Limitación de propagación la horizontal <u>entre dos sectores de incendio</u> Los puntos de la fachada con EI < 60 estarán separados una distancia $d \geq 0,5$ m en fachadas ubicadas a 180°.</p>  <p>Vista en planta</p>
<p>Cuando el ángulo formado por dos planos de la fachada sea $< 135^\circ$ el ancho de la franja será ≥ 2 m.</p>  <p>$a+b \geq 2m$</p>	<p>Limitación de propagación horizontal <u>entre dos sectores de incendio</u> Los puntos de la fachada con EI < 60 estarán separados una distancia d en función del ángulo α formado por los planos según se indica en la tabla 3.5.</p>

Fig. 3.14 Disposiciones contempladas por la normativa sobre el control de la propagación horizontal del fuego.

Fuente: NBE CPI 96 y CTE

Tabla 3.5 Separación de los puntos de las fachadas EI < 60 en función del ángulo al que se encuentren los planos de éstas. ⁽¹⁾ Refleja el caso de fachadas enfrentadas paralelas.

Fuente: CTE – DB SI sección 2

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

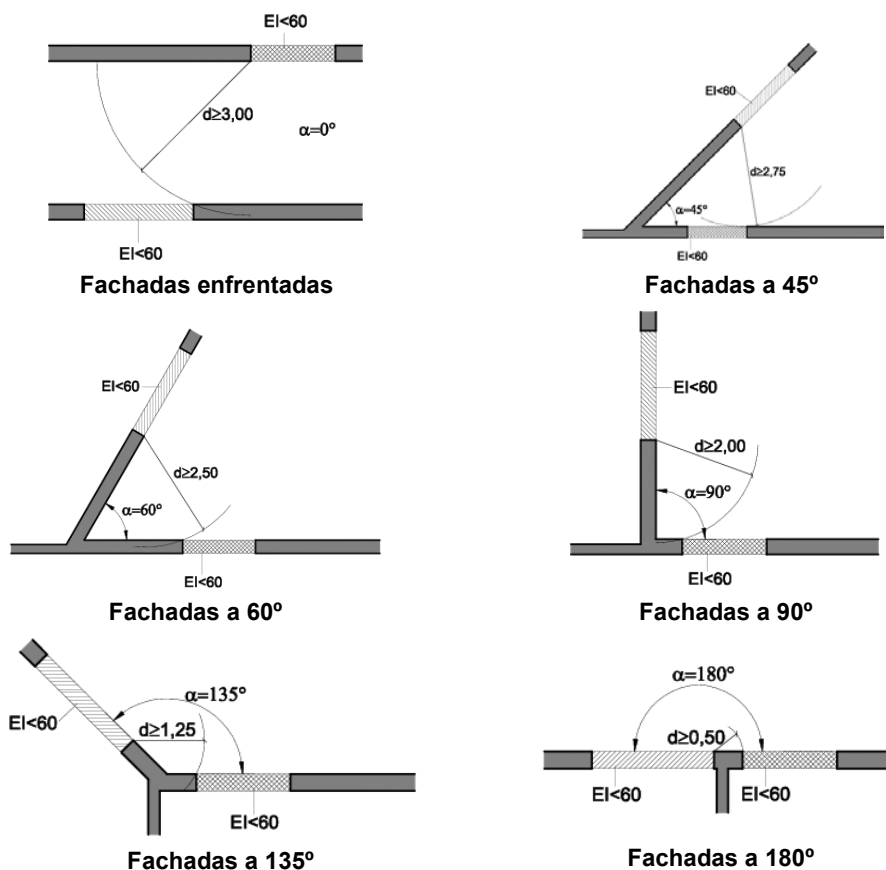


Fig. 3.15 Gráficos que ilustran las distancias horizontales exigidas en las fachadas en función del ángulo al que se encuentran las superficies.

Fuente: CTE DB SI sección 2 apartado 2

Las disposiciones en referencia a la limitación de la propagación horizontal del fuego están recogidas en el DB SI sección 2 apartado 2.

“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, como mínimo, en función del ángulo α formado por los planos exteriores de dichas fachadas (...)” (Fig. 3.14 – 3.15).

- **Medianeras**

“Los elementos verticales separadores de otro edificio deben ser al menos El 120”.

Comentario:

El CTE considera más opciones de separación en función de los ángulos a los cuales se encuentren situadas las fachadas una respecto a la otra. Mientras la CPI 96 consideraba de forma más genérica 1 m en el caso de sectores contiguos y 2 m cuando el ángulo formado por las paredes sea menor de 135°.

- **Sectores de incendio**

El CTE enfatiza que estas separaciones se realizan entre sectores de incendio, entendido este como:

“el 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. Los locales de riesgo especial no se consideran sectores de incendio”.

De acuerdo a la ocupación del edificio (uso y altura) la superficie de los sectores de incendio varía (tabla 1.1 CTE ver Anexo 2 de este documento). Para la mayoría de usos (residencial, residencial público, hospitalario, pública concurrencia) el sector de incendios es de 2.500 m² de superficie y puede aumentar a 5.000 m² si el sector cuenta con instalación de rociadores automáticos.

Comentario:

La definición de los diferentes sectores de incendio en el edificio permite en ocasiones puntuales evitar las franjas de separación exigidas en las fachadas, teniendo en cuenta que cada sector debe tener una superficie mínima determinada según la ocupación del edificio.

- **Disposiciones sobre la clase de reacción al fuego de los materiales**

Las disposiciones en referencia a los materiales exigidos en las superficies de las fachadas están recogidas en la tabla 3.6 (Tabla 4.1 del DB SI sección 1 apartado 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”.

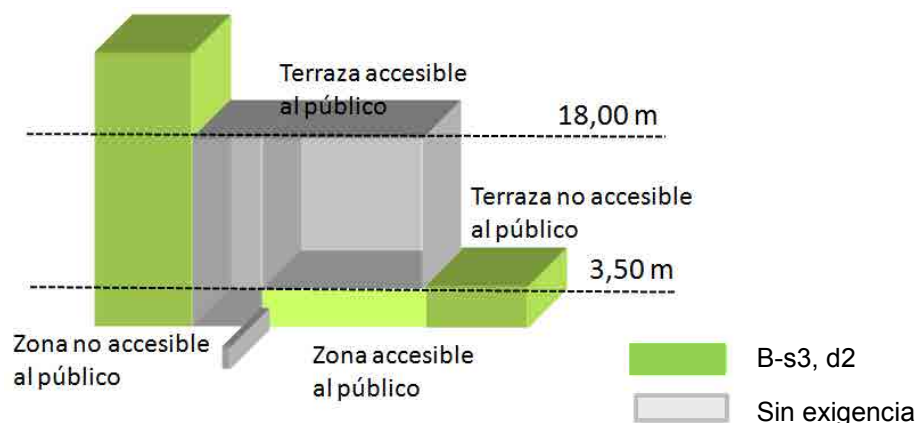


Fig. 3.16 Esquema que ilustra las exigencias contempladas por el CTE en referencia a la clase de reacción al fuego de los materiales de las superficies de las fachadas.

Fuente: elaboración propia

Tabla 3.6 Clases de reacción al fuego de los elementos constructivos.

Fuente: CTE DB SI1 Tabla 4.1

Situación del elemento	Revestimientos ⁽¹⁾	
	De techos y paredes ^{(2) (3)}	De suelos ⁽²⁾
Zonas ocupables ⁽⁴⁾	C-s2,d0	E _{FL}
Pasillos y escaleras protegidos	B-s1,d0	C _{FL} -s1
Aparcamientos y recintos de riesgo especial ⁽⁵⁾	B-s1,d0	B _{FL} -s1
Espacios ocultos no estancos, tales como patinillos, falsos techos y suelos elevados (excepto los existentes dentro de las viviendas) etc. o que siendo estancos, contengan instalaciones susceptibles de iniciar o de propagar un incendio.	B-s3,d0	B _{FL} -s2 ⁽⁶⁾

⁽¹⁾ Siempre que superen el 5% de las superficies totales del conjunto de las paredes, del conjunto de los techos o del conjunto de los suelos del recinto considerado.

⁽²⁾ Incluye las tuberías y conductos que transcurren por las zonas que se indican sin recubrimiento resistente al fuego. Cuando se trate de tuberías con aislamiento térmico lineal, la clase de reacción al fuego será la que se indica, pero incorporando el subíndice L.

⁽³⁾ Incluye a aquellos materiales que constituyan una capa contenida en el interior del techo o pared y que no esté protegida por una capa que sea EI 30 como mínimo.

⁽⁴⁾ Incluye, tanto las de permanencia de personas, como las de circulación que no sean protegidas. Excluye el interior de viviendas. En *uso Hospitalario* se aplicarán las mismas condiciones que en *pasillos y escaleras protegidos*.

⁽⁵⁾ Véase el capítulo 2 de esta Sección.

⁽⁶⁾ Se refiere a la parte inferior de la cavidad. Por ejemplo, en la cámara de los falsos techos se refiere al material situado en la cara superior de la membrana. En espacios con clara configuración vertical (por ejemplo, patinillos) así como cuando el falso techo esté constituido por una celosía, retícula o entramado abierto, con una función acústica, decorativa, etc., esta condición no es aplicable.

Comentario:

Según se aprecia en la Fig. 3.16 la norma marca un límite de altura de 18 m a partir del cual hay mayor restricción en la clase de reacción al fuego, clase B-s3,d2. De acuerdo a lo que determina la norma buena parte de los edificios de viviendas, cuya altura entraría en el rango límite de 18 m, quedarían sin restricción alguna de clase de material de revestimiento y cámaras ventiladas, salvo hasta una altura de 3,5 m en zonas accesibles al público, ya sea a nivel de la rasante exterior o desde una terraza.



Fig. 3.17 Incendios en edificios plurifamiliares con propagación a través de la fachada.
 (A) Propagación a través de las ventanas. Franja de material incombustible + alero pequeño.
 Country confort Motel Australia 1998
 (B) Propagación a través del aislamiento térmico combustible. Alemania 1996.
 Fuente: Martin – Loncour, 2004

Comentario:

El planteamiento de la normativa puede dejar sin cubrir aspectos de riesgo importantes. El fuego se propaga a través de las ventanas de un edificio cuyas superficies de fachada son no combustibles (Fig. 3.17A), uno de los factores de riesgo es el tamaño de las ventanas; el CTE no hace referencia a este aspecto. El fuego se propaga a través del material de aislamiento combustible de los paneles de revestimiento, el edificio no supera los 16 m de altura (Fig. 3.17B). El CTE no contempla restricciones en la clase de los materiales de las superficies de fachada en edificios de altura inferior a 18 m, salvo hasta una altura de 3,5 m en zonas accesibles al público.

• **Disposiciones sobre la compartimentación de las cámaras ventiladas**

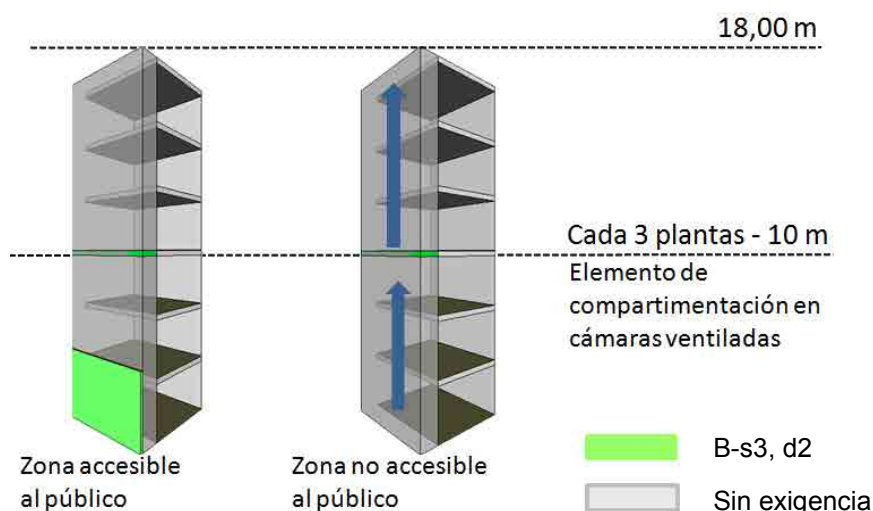


Fig. 3.18 Esquema que ilustra las exigencias contempladas por el CTE en referencia a las cámaras ventiladas (espacios ocultos).
 Fuente: elaboración propia

El CTE hace una escueta referencia a las cámaras ventiladas en un apartado que define como espacios ocultos contenido en el DB sección 1 apartado 3. La Fig. 3.18 lo ilustra.

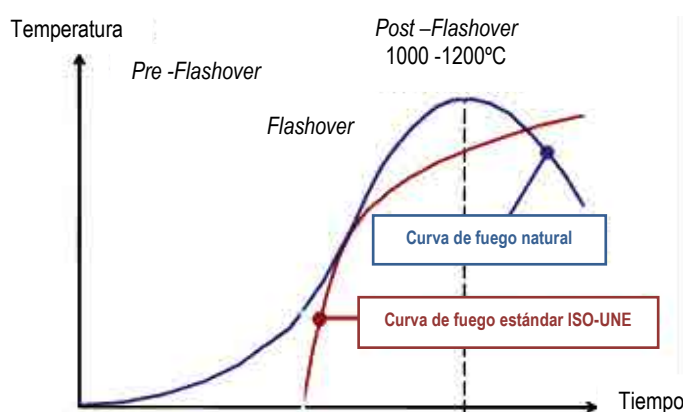
Comentario

La compartimentación queda supeditada al tipo de material de aislamiento térmico, si se emplean materiales que cumplen la clasificación B-s3,d2 no se exige compartimentación en la cámara ventilada, y si el material tiene una clasificación más baja (mayor combustibilidad) se exige compartimentación cada 10 m ó 3 plantas. Queda a consideración del proyectista el uso de elementos de compartimentación adicionales. Cabe añadir que también se admite “mejorar” el comportamiento al fuego del material de aislamiento térmico, mediante un enfoscado de cemento de 15 mm, aunque su clasificación originalmente no cumpla con lo estipulado por la norma. Esta permisividad puede dar lugar a riesgos significativos asociados a la combustibilidad de los materiales. En la fase experimental del estudio se han realizado algunas consideraciones al respecto (ver apartado 6.5.2).

• **Consideraciones sobre los métodos de ensayo**

Curvas de fuegos nominales

Históricamente, las curvas de fuegos nominales fueron desarrolladas para tener una referencia única y normalizada en los ensayos experimentales. Este método de cuantificación fue adoptado desde 1918 por la *American Society for Testing Materials* (ASTM) y desde entonces constituye el fundamento de casi todos los ensayos de resistencia al fuego. No obstante, estas curvas proveen un resultado muy pobre cuando se trata de dar una representación realista del desarrollo de un fuego natural.



Tiempo (t) minutos	15	30	45	60	90	120	180
Temperatura en °C	740	840	900	950	1000	1050	1100

Fig. 3.19 Curvas de fuegos nominales ISO 834 y etapas de un fuego natural. Tabla con el desarrollo de un incendio según la curva normalizada tiempo temperatura. Fuente: UNE EN 1363

La descripción que hace del desarrollo del incendio está muy lejos de la descripción de un incendio real. No tiene en cuenta las propiedades geométricas de los recintos, la influencia del viento, o la carga de fuego y tampoco considera la etapa de precalentamiento y de enfriamiento. El parámetro de resistencia al fuego se mide realizando una exposición del elemento constructivo a la temperatura dada por la curva ISO durante cierto periodo de tiempo. Veinticinco años después, se comenzó a tomar en consideración la influencia de la ventilación y de diferentes cargas de fuego sobre el incendio a partir de ensayos realizados por la *National Bureau of Standards* (Oficina Nacional de EEUU) y se constataron grandes variaciones debidas a la influencia del viento en los diferentes escenarios ensayados [NFPA 1991].

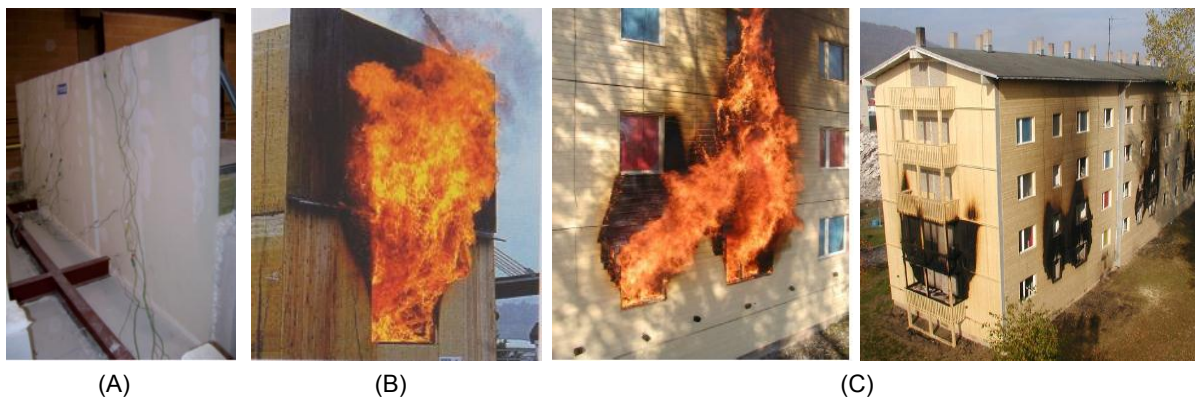


Fig. 3.20 (A) Ensayo que se realiza a las soluciones de franja de 1 m (EI 60) para el cumplimiento del CTE en muros cortina. Fuente: Promat
 (B) Ensayo de prototipo al aire libre. Fuente: *Development in timber engineering*.
 (C) Ensayo a escala real de la propagación del fuego en fachadas de madera. Leipzig, Alemania. Fuente: Merk – Winter, 2010

Comentario:

Los ensayos de los productos y elementos constructivos para fachadas tendrían que realizarse en las condiciones reales a las que estarán expuestos en una situación de incendio. Los ensayos de laboratorio bajo condiciones controladas en un recinto cerrado (A) no aportan una descripción real del comportamiento del producto frente al fuego (ver también Euroclases apartado 3.4). El prototipo (B) es una opción adecuada porque se ensaya en condiciones exteriores y puede ser económicamente viable. El prototipo (C) muestra un ensayo en condiciones muy apropiadas y reales, sin embargo una investigación de estas características requiere de un presupuesto alto.

Curvas paramétricas

Las curvas paramétricas son un método para determinar la evolución de la temperatura de un recinto durante un incendio tomando en consideración los fenómenos físicos de mayor relevancia. Este tipo de modelo, al igual que las curvas

nominales, describe un fuego totalmente desarrollado cuyo resultado es la evolución de la temperatura, que se considera homogénea en todo el recinto. Con este método se obtiene una representación más realista del incendio que con las curvas nominales. Los parámetros que se consideran para calcular una curva paramétrica son:

- La geometría del recinto
- La carga de fuego
- Las aperturas verticales (ventanas y puertas)
- Las propiedades térmicas de los límites del compartimiento (C, ρ, λ).

En el anexo A del Eurocódigo 1 1-2 se presenta, a título informativo, un método de cálculo para curvas paramétricas de tiempo-temperatura, su aplicación está limitada a recintos con menos de 500 m², sin aberturas en la cubierta y con una altura máxima de 4 m.

- **Eurocódigo 1: Acciones sobre estructuras – parte 1-2**

En este Eurocódigo se describen las acciones térmicas y mecánicas para el diseño estructural de los edificios expuestos al fuego. Se ocupa de aspectos concretos de la protección pasiva contra incendios en términos del diseño de las estructuras y sus componentes para lograr la resistencia adecuada y para limitar la propagación del fuego.

Como parte de este ámbito de estudio considera una situación de exposición de un miembro estructural externo ante un flujo de calor radiante emitido por un penacho de fuego que emerge desde una abertura de fachada. A partir de esta situación plantea, a título informativo, un método de cálculo recogido en el anexo B (Acciones térmicas para miembros externos - método de cálculo simplificado). Se trata de una adaptación del modelo de cálculo de M. Law del cual se habló en el apartado 2.1.

La información contenida es de particular interés para esta investigación, pues constituye el único documento de referencia en el ámbito normativo español en el que se caracteriza una situación de propagación exterior del fuego. A continuación se hace una breve descripción de su contenido. Este método de cálculo simplificado puede ser usado para:

- Determinar la temperatura máxima del recinto del incendio.
- Obtener datos sobre la temperatura y el tamaño del penacho de fuego que emerge desde la abertura del recinto.
- Determinar datos de los parámetros de radiación y convección.
- El método sólo es válido para cargas de fuego $q_{f,d}$ superiores a 200 MJ / m².
- El método sólo puede usarse en unas condiciones geométricas determinadas.

Condiciones de uso

Si hay más de un número de ventanas en el recinto, la altura promedio ponderado de las aberturas h_{eq} , la sumatoria del ancho de las ventanas ($w_t = \sum w_i$) y el área total de las aperturas verticales A_v , se utilizan.

El recinto al que se aplica no debería exceder: 70 m longitud, por 18 m largo y 5 m de altura. Se considera que el espesor y ancho del penacho de fuego son uniformes, así como su temperatura. Cuando hay ventanas en solo en un lado del muro 1, la proporción D/W se obtiene mediante:

$$D/W = \frac{W_2}{w_t} \quad [3.1]$$

Cuando hay ventanas en más de un muro del recinto, la proporción D/W se obtiene mediante:

$$D/W = \frac{W_2}{W_1} \frac{A_{v1}}{A_v} \quad [3.2]$$

Donde:

W_1 es el ancho de la pared 1, la pared contiene mayoritariamente la superficie de la ventana.

A_{v1} es la sumatoria del área de la ventana de la pared 1.

W_2 es el ancho de la pared perpendicular a la pared 1.

El método considera diferentes condiciones y efectos debidos a la influencia del viento y de la geometría, algunas de estas son:

- **Efectos del viento**

Si hay ventanas en los lados opuestos del compartimiento o si el fuego es alimentado por una fuente adicional de aire, se consideran condiciones de “tiro forzado” para el cálculo.

Desviación de las llamas debido al viento

Llamas que emergen del recinto de incendio se asumen en una dirección perpendicular a la fachada; en un ángulo de 45°, debido al efecto del viento.

Tiro forzado

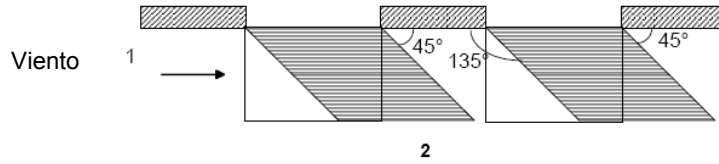


Fig. 3.21 Desviación de las llamas por efecto del viento

Fuente: Eurocódigo 1, anexo B

- **Altura de las llamas**

Tiro no forzado

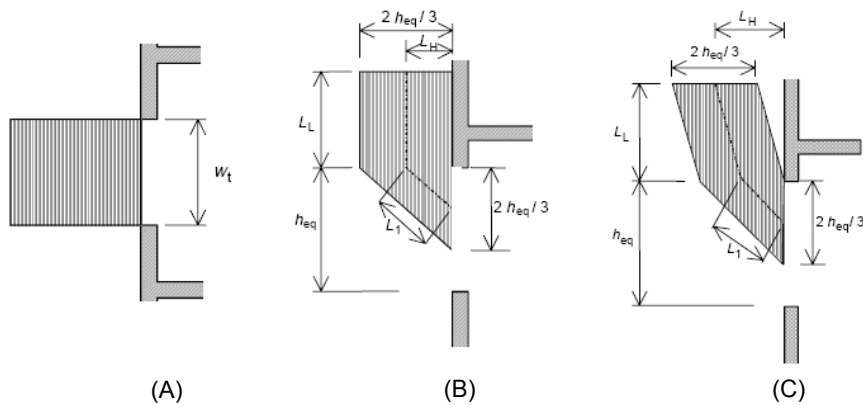


Fig. 3.22 Las llamas tienden a ocupar las dos terceras partes de la ventana.

(A) Planta. (B) Sección, con muro arriba de la ventana

(C) Sección, sin muro arriba de la ventana.

Fuente: Eurocódigo 1, anexo B

- **Con un elemento saliente ubicado al nivel de la parte superior de la ventana**

Tiro no forzado

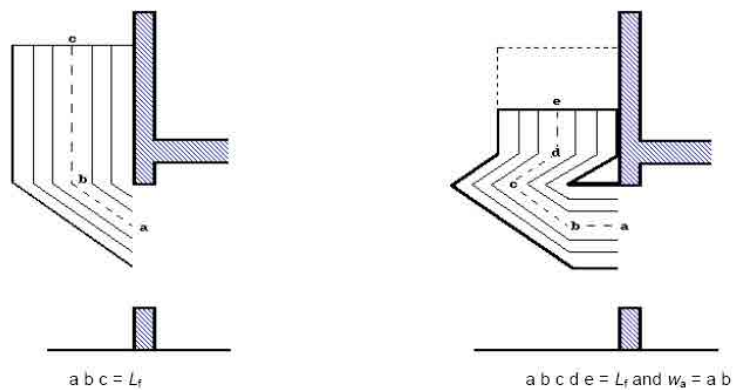


Fig. 3.23 Desviación de las llamas debido a una proyección horizontal. Sección.

Fuente: Eurocódigo 1, anexo B

- Tiro forzado por ventilación provista desde el interior del recinto

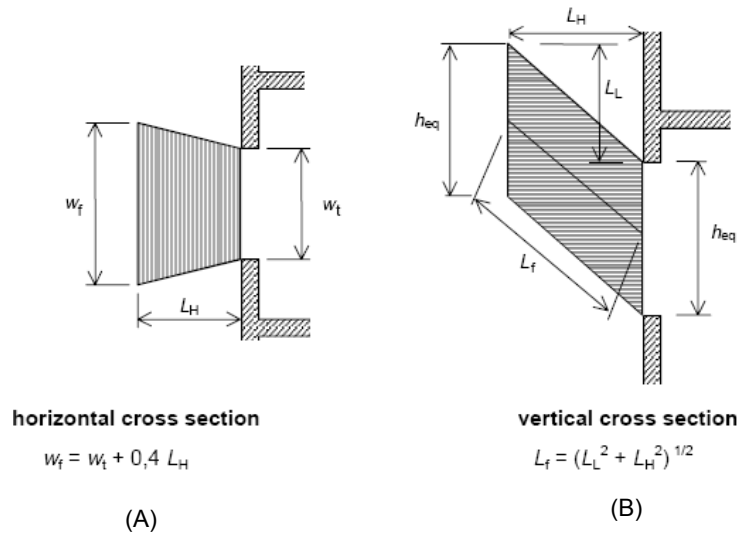


Fig. 3.24 Cambios en la forma y dimensión de las llamas por efecto de la ventilación.

(A) Planta (B) Sección
Fuente: Eurocódigo 1, anexo B

- Tiro forzado por ventilación y elemento saliente ubicado en la parte superior de la ventana.

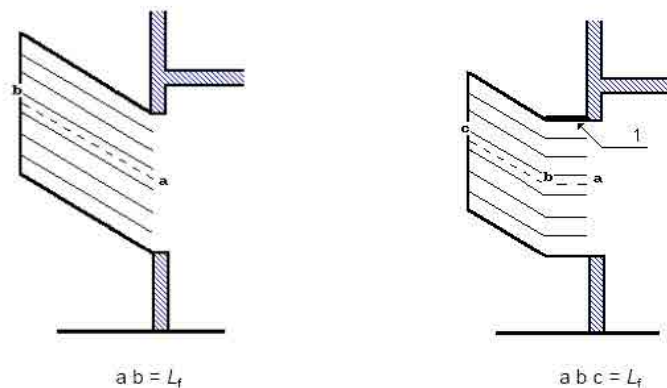


Fig. 3.25 Cambios en la forma de las llamas por efecto de la ventilación, Las llamas tienden a ocupar toda la superficie de la ventana. Sección.

Fuente: Eurocódigo 1, anexo B

3.6 Comparativa de normas de diferentes países

Las normas de seguridad contra incendios (SCI) han sido tradicionalmente de carácter prescriptivo en la mayoría de países, es decir, se han presentando como unas exigencias descritas con más o menos detalle que no admiten desviación y determinan unos parámetros concretos a seguir. Este enfoque normativo presenta algunas ventajas por su fácil aplicación o adaptación a los proyectos, y también porque favorece los procesos de control por parte de los organismos competentes. Sin

embargo, la poca flexibilidad de las disposiciones puede limitar el diseño y la incorporación de propuestas innovadoras en la edificación. También en ocasiones se puede dar mayor importancia al cumplimiento mismo de la exigencia olvidando el objetivo de alcanzar un nivel de seguridad suficiente en la edificación (Fitzgerald, 2004: 2).

Durante las últimas décadas se han hecho grandes progresos en materia de seguridad contra incendios en diferentes países. Los avances en la tecnología, en la comprensión de la dinámica de los incendios o el desarrollo de herramientas de diseño y análisis de riesgos han dado lugar a cambios en la forma de aproximarse al problema del incendio en las edificaciones. Por ello se ha dado una tendencia creciente a abordar la seguridad contra incendios desde el denominado enfoque basado en prestaciones (término usado en España) o diseño basado en el desempeño (término usado en latinoamérica), conocido como PBD del acrónimo en inglés de *Performance Based Design*. Esta orientación se fundamenta en técnicas de ingeniería contra incendios y parte de un apropiado conocimiento científico y técnico de los aspectos involucrados en una situación de incendio. Su aplicación permite satisfacer los requerimientos particulares de cada proyecto aplicando soluciones óptimas desde el punto de vista de la seguridad.

Teniendo en cuenta que la seguridad contra incendios en la edificación pueden ser abordada desde estos dos enfoques: el prescriptivo y el basado en prestaciones, a continuación se realiza una breve exploración de las normas de SCI de diferentes países considerando dos ámbitos: (1) El contexto normativo europeo y en particular el de ocho países miembros de la UE (Alemania, Dinamarca, Bélgica, Francia, Holanda, Reino Unido (Inglaterra y Gales), Suecia y Noruega), en cuyo horizonte se presenta el reto de la armonización de normas, y (2) El contexto normativo de tres de los países reconocidos como referente a nivel mundial en materia de SCI, en concreto el de EE.UU, Nueva Zelanda y Reino Unido (Inglaterra y Gales); todo ello sin perder de vista los aspectos de mayor interés para esta investigación, como son, el control de la propagación exterior del fuego y las medidas de protección consideradas para este fin.

3.6.1 Contexto normativo europeo

Durante la última década se han dado pasos importantes a nivel de la UE en el propósito de eliminar barreras técnicas y armonizar procedimientos y normas en el ámbito de la construcción. El Comité Europeo de Normalización (CEN) ha venido construyendo un marco común a través de diversas iniciativas como: el establecimiento de las euroclases de reacción al fuego, la incorporación paulatina de los eurocódigos estructurales, la unificación de la certificación energética como requisito exigible a las edificaciones, entre otros. No obstante, aún hay gran variedad de criterios normativos y requisitos técnicos para los edificios en los diferentes países miembros de la UE. Por ello, realizar una labor comparativa de las normas de distintos países de la zona resulta difícil, más aún cuando las normas consideradas son las de seguridad contra incendios que son de lejos las que presentan una mayor dispersión de datos y conceptos [Pedro et al. 2010].

Cada país tiene sus propias clasificaciones, terminologías, criterios para definir los riesgos, para delimitar sectores de incendio, para restringir el uso de materiales, para establecer periodos de resistencia al fuego, etc. Se identifican grandes diferencias en la estructura, la descripción y contenido de los requisitos exigibles; también en los planteamientos de necesidades y estrategias, lo cual en la práctica se traduce en grandes impedimentos para la armonización de las estrategias de seguridad contra incendios [Sheridan et al. 2003a].

Las dificultades para configurar parámetros comunes se sitúan no solamente en el ámbito técnico, con aspectos como los antes mencionados, sino también en el marco administrativo y legal, debido a que no solo existen códigos nacionales, también hay diversos reglamentos locales y muchas veces la dependencia o relación de las normas secundarias no resulta fácil de interpretar [Sheridan et al. 2003b].

Toda esta divergencia de criterios entre países resulta lógica y deriva de las diferencias culturales, climáticas, históricas, arquitectónicas, constructivas, legislativas, etc., diferencias que estructuran y caracterizan cada sociedad. Sin embargo, el CEN se ha propuesto el reto de la armonización de normas entre los países miembros. Por tanto, y aunque desde esta perspectiva plural se perciba lejana la formulación de un código modelo de construcción europeo para la SCI, es un objetivo que vale la pena perseguir. Además, países como Reino Unido y Suecia, que se encuentran en un nivel

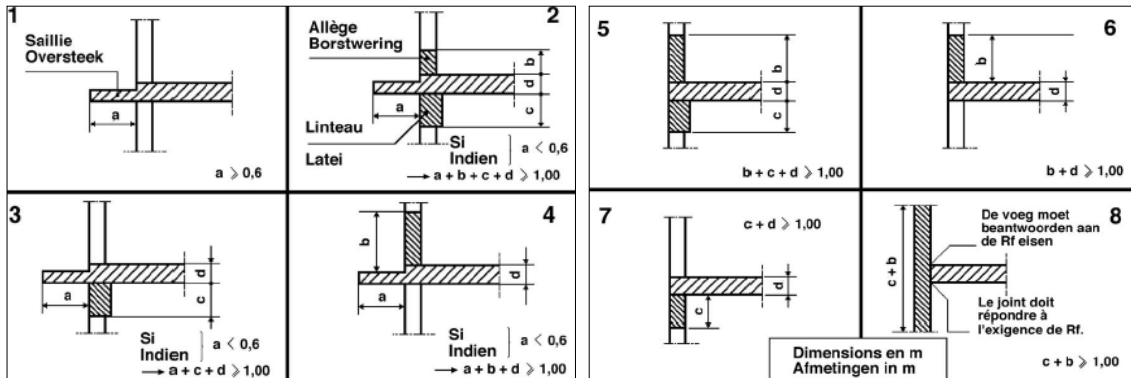
más avanzado en esta materia respecto a otros, pueden y deben servir de referente para continuar la construcción de un escenario normativo común.

En relación al control de la propagación exterior del fuego, en todos los países se determinan limitaciones en las propiedades de los materiales de los revestimientos (baja combustibilidad), también respecto a la resistencia de los muros de las fachadas y las medianeras, pero hay variaciones considerables en relación a los requisitos establecidos. Estos cambian generalmente en función de la altura del edificio, la superficie y el uso. En edificaciones de varias plantas las especificaciones más restrictivas sobre el uso de materiales de revestimiento están en las de las normativas de Inglaterra y Gales, y en general, las menos restrictivas están en las normativas de Francia, Bélgica y España.

Las normativas que abordan con mayor detalle los aspectos relacionados con las áreas no protegidas (cualquier superficie combustible o las aperturas de ventanas y puertas) distinguen diferentes niveles de requisitos en relación a: la altura de la fachada, el tipo de construcción y la distancia de la fachada respecto a límites relevantes, como pueden ser otros edificios. Este aspecto es muy importante porque limita el área de las aperturas, reduciendo potenciales fuentes de transmisión de calor radiante y de propagación a las edificaciones vecinas. Las normativas de Inglaterra y Gales consideran este aspecto de forma detallada. Otras normativas ni siquiera lo toman en consideración.

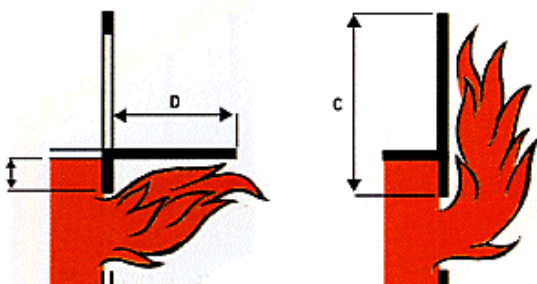
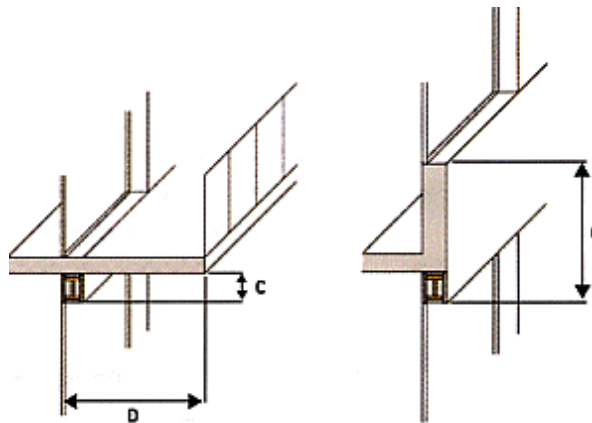
Respecto a las medidas para limitar la propagación vertical del fuego mediante la configuración geométrica de las fachadas encontramos que las normativas de Bélgica, Francia, Suecia y Noruega contemplan el uso de franjas verticales y de cuerpos salientes (balcones o aleros) para impedir la propagación vertical de las llamas entre las ventanas de una planta a otra. Las normativas de Bélgica y Francia estipulan que esta medida sea como mínimo de 1 m sin importar la proporción entre la franja vertical y el elemento horizontal (Fig. 3.26) por tanto la exigencia es la misma contemplada en el CTE español. La normativa de Suecia sólo se refiere a la distancia vertical entre ventanas de dos sectores de incendio de 1,20 m como mínimo. La normativa de Noruega también se refiere a elementos de 1,20 m pero pueden ser tanto franjas verticales como elementos o cuerpos salientes (balcones), además admiten una reducción de la clase de reacción al fuego de los materiales de revestimiento en función del elemento saliente.

En las normativas de Holanda y Suecia se da especial relevancia a evitar la propagación del fuego a las edificaciones vecinas. Tanto las especificaciones en referencia a los parapetos incombustibles en las cubiertas como las medianeras y muros de fachada (portantes) son más estrictas que en otras normativas.



La resistencia al fuego exigida es 1h.
Este requerimiento está contenido en el anexo 2 de la norma Belga (ver tabla 3.7).

(A)



$C + D \geq 1$ m si $M < 80$ MJ/m²
 $C + D \geq 1,30$ m si $M > 80$ MJ/m²
 $C + D = 0,60$ m si $M < 25$ MJ/m²
 M= Carga térmica (combustible) emitida.
 La resistencia al fuego exigida es de 1h.

Se aplica a edificios de planta baja +7 en adelante (tercera familia). También se aplica a fachadas acristaladas.
 Este requerimiento está contenido en el artículo 21 de la norma francesa (ver tabla 3.7).

(B)

Fig. 3.26 Control de la propagación exterior mediante franjas verticales y aleros.

(A) Normativa Belga. Fuente: Martin – Loncour, 2004
 (B) Normativa francesa. Fuente: Thomas – Archambault, 2005

Tabla 3.7

País	Normativa	Aspectos de interés de la normativa
Alemania	<ul style="list-style-type: none"> Musterbauordnung (2002) Código de la construcción última modificación (2008). Adicionalmente hay diferentes reglamentos en cada estado federal. 	<p>La normativa de SI forma parte del código nacional de construcción.</p> <p>Contiene un capítulo sobre la limitación de la propagación exterior de fuego. Determina materiales no combustibles en el aislamiento térmico y los revestimientos en edificaciones ≥ 3 plantas. Todo uso de materiales combustibles incluidas fachadas de madera requiere aprobación adicional. Se hace referencia a los sistemas de fachada ventilada y determina su compartimentación mediante barreras verticales y horizontales. También menciona la opción de incorporar barreras en los premarcos de las ventanas (telar de las ventanas).</p> <p>Cuenta con diversos documentos técnicos que sirven de guía en temas específicos de fachadas no convencionales (FV y DSF).</p>
Dinamarca	<ul style="list-style-type: none"> Byningreglement by- og Boligministeriet Código de la construcción (1995) (Subsequently amended 1999, 2000 and 20001). Bygningsreglement for småhuse: Udfædiget i medfør af 3,5 og 16, stk. 3-4 i byggeoven, jf. lovbekendtgørelsen nr. 452 af 24. Juni 1998. Reglamento de Construcciones para viviendas pequeñas BR-S (1998). 	<p>La normativa de SI forma parte del código nacional de construcción. Posee una normativa específica para viviendas unifamiliares separada de los edificios de varias plantas.</p> <p>Hace referencia a las restricciones en los materiales de revestimiento en función de las distancias con otras edificaciones. Las disposiciones sobre paredes medianeras, parapetos remarcan un especial control de la propagación del fuego a edificaciones vecinas. Hace referencia a los sistemas de fachada ventilada para considerar restricciones en el uso de materiales combustibles de revestimiento y aislamiento térmico.</p>
Bélgica	<ul style="list-style-type: none"> Legislación Federal: Arrêté royal (AR) du 07-07-1994. Normativa general de prevención contra el fuego y explosiones en edificios nuevos refrendada por AR du 19-12-1997 y posteriormente el 4 de abril del 2003. Los aspectos relacionados con el control de la propagación exterior del fuego están contenidos en el Anexo 2 de la norma. 	<p>La normativa de SI forma parte del código nacional de construcción. Sin embargo existen diversos niveles de competencia en la regulación de SI: hay autoridades federales, regionales, provinciales y comunales. Además cada región (Flamenca, francesa, holandesa) tiene su propia sub-regulación oficial, por tanto se percibe cierta dispersión en la regulación. Cada región cuenta con una dirección general de incendios (<i>Local Fireman</i>) que se encarga de revisar y certificar proyectos singulares, algunos, con soluciones basadas en prestaciones. El desarrollo de este tipo de soluciones está en una etapa preliminar.</p> <p>No cuenta con normativa de viviendas unifamiliares y no hay claridad respecto a los conceptos a aplicar en construcciones tradicionales.</p> <p>Se aplican las normativas generales de SI para fachadas ligeras (no convencionales) (FV y DSF). Se hace referencia al control de la propagación mediante franjas verticales y aleros o balcones (Fig. 3.26). Se prohíbe la disposición de conductos de basura por las fachadas. Hay un proyecto del Ministerio del Interior llamado "fachadas" destinado a crear un real decreto sobre PCI en las fachadas.</p>

Francia	<ul style="list-style-type: none"> Code de la Construction et l'Habitat (CCH). Arrêté du 31 janvier 1986 relatif à la protection contre l'incendie des bâtiments de habitació. Código de la construcción y la vivienda. 	<p>La normativa de SI forma parte del código nacional de construcción. Cuentan con un sistema de reglamentos individual según la función de los edificios: Viviendas, reglamento especial para edificios de gran altura, reglamento para establecimientos públicos etc. La normativa de viviendas divide los edificios de acuerdo a su altura y superficie en 4 "familias" y estipula requerimientos diferentes en cada caso. Posee también diversos reglamentos locales.</p>
	<ul style="list-style-type: none"> Arrêté du 15 juillet 1982 relatif à la protectio contre les riesques d' incendie dans le inmuebles de grande hauteur. Reglamento para la protección de edificios de gran altura. 	<p>Se aplican las normativas generales de SI para fachadas no convencionales como (FV y DSF). Las exigencias referentes al uso de materiales de revestimiento son las menos restrictivas en comparación a los países comparados. Las restricciones más importantes sobre los materiales de revestimiento se realizan en edificios ≥ 23 m. Se hace referencia al control de la propagación mediante franjas verticales y aleros o balcones (Fig. 3.26). Cuenta con documentos técnicos que incluyen medidas de protección para fachadas ligeras (ventiladas y muros cortina).</p>
Holanda	<ul style="list-style-type: none"> Bouwbesluit (Building Decree) (2001). Modificada (Scholten, 2004). 	<p>La normativa de SI forma parte del código nacional de construcción. En un solo Ministerio del gobierno se unifican todas las actividades de seguridad. Se realizan disposiciones adicionales en función de la carga de fuego. Se da relevancia al control de la propagación de los humos.</p>
	<ul style="list-style-type: none"> CIB-TG 37 modelo de sistema basado en prestaciones seguido en los códigos de edificación. 	<p>Desde los años 80 han venido desarrollando un modelo de normas basadas en prestaciones, mediante el cual se admiten soluciones alternativas que permitan una mayor libertad a los proyectistas. Cada propuesta es sometida a verificación por parte del (NEN) Instituto de regularización holandés o del Ministerio de normas.</p>
		<p>El enfoque basado en prestaciones se aplica a un pequeño porcentaje de proyectos en relación a los códigos prescriptivos. No hay un organismo oficial de inspección, la responsabilidad de los métodos aplicados recae sobre el proyectista y el dueño del inmueble.</p>

Tabla 3.8

País	Normativa	Enfoque de la normativa
Inglaterra y Gales	<ul style="list-style-type: none"> The building Regulations (statutory Instrument 2000) enmendada en 2003. Reforma regulatoria 2005 (seguridad contra incendios). <p><i>*Se considera que esta normativa es la más clara y mejor estructurada de las que se comparan en estas tablas.</i></p>	<p>La normativa de SI forma parte del código nacional de construcción. Tiene 5 capítulos uno de ellos dedicado al control de la propagación exterior del fuego. Cuentan con una autoridad nacional de seguridad contra incendios y jefes locales (chairman). En 2005 se publicó una reforma regulatoria que dio más poder de control a las autoridades locales de seguridad (Chairman- bomberos). Ellos son los encargados de aprobar y controlar que los proyectos cumplan con los requerimientos mínimos de seguridad. Es la única norma que determina medidas de protección en áticos.</p>
		<p>Cuenta con diferentes documentos técnicos de apoyo, muchos relacionados con el comportamiento del fuego en las fachadas ligeras (FV y DSF). Son guías de procedimientos técnicos, avaladas por institutos de investigación reconocidos en este ámbito.</p>
	<ul style="list-style-type: none"> BS 7974:2001; Application of fire safety engineering principles to the design of buildings. Code of practice; British Standards Institution / 24-Oct-2001. 	<p>Poseen un avanzado desarrollo y aplicación del enfoque basado en prestaciones, el cual vienen desarrollando desde 1985. Cuenta con una normativa realizada bajo criterios de ingeniería de protección contra incendios como guía de diseño de proyectos.</p>

<p>Suecia</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Boverkets Byggregler (BBR-94:3) BFS 1993:57 (1997). [Swedish Board of Housing, Building and Planning: Building Regulations]. • Posee una normativa obligatoria y recomendaciones generales sobre la capacidad portante de los edificios en caso de incendio. Design Regulations of the Board, BKR (BFS 1998:38). • Normativa de enfoque basado en prestaciones. National Board of Housing Building and Planning. BBR94. Los documentos guía son dos manuales: Fire Safety Engineering Guidelines and Guidelines on Fire Safety Design of HVAC Systems. 	<p>La normativa de SI forma parte del código nacional de construcción capítulo 5.</p> <p>Las secciones 5.4 y 5.6 abordan aspectos relacionados con la propagación exterior del fuego. En la mayoría de proyectos se aplican las disposiciones de carácter prescriptivo de la normativa. Se realizan disposiciones adicionales en función de la carga de fuego.</p> <p>Se hace referencia al control de la propagación mediante franjas de 1,2 m entre ventanas de una planta a otra. También mediante aleros ubicados en la parte superior de las ventanas.</p> <p>Se admite el uso de materiales de revestimiento combustible, como paneles de madera solo en edificaciones ≤ 2 plantas o solo en la planta baja de una edificación de más plantas o instalación de sprinklers o uso de revestimientos no combustibles.</p> <p>El enfoque basado en prestaciones se aplica a un pequeño porcentaje de proyectos en relación a los códigos prescriptivos. No existen un organismo oficial de inspección, la responsabilidad de los métodos aplicados recae sobre el proyectista y el dueño del inmueble.</p> <p>Los aspectos relacionados con los medios de protección activa como rociadores, alarmas, detectores etc., son supervisados por personal certificado y aprobados por los Servicios de Seguridad contra incendios.</p>
<p>Noruega</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Tekniske forskrifter til plan-og bygningsloven 1997 med endringer senest ved forkrift 13. Desember 1999 (Normas técnicas de planificación y construcción Act 1997 modificado 1999). • Experience in introduce performance based fire regulations. National Office of Building Technology and Administration, Norway. 	<p>La normativa de SI forma parte del código de construcción.</p> <p>Se realizan disposiciones adicionales en función de la carga de fuego.</p> <p>Se da relevancia al control de la propagación de los humos.</p> <p>Se aplican las normativas generales de SI para fachadas no convencionales (FV y DSF). Hace referencia al control de la propagación mediante franjas entre ventanas de una planta a otra y aleros, balcones o cualquier cuerpo saliente de 1,20 m de vuelo. La exigencia de reacción al fuego de los revestimientos se reduce en función de estos elementos.</p> <p>En 1999 se inició un proceso para desarrollar una normativa basada en prestaciones. Poseen un documento guía para desarrollar proyectos con este enfoque. Los proyectos deben ser debidamente documentados, probados y luego sometidos a verificación por parte de una autoridad competente.</p>
<p>SI seguridad contra incendios PCI protección contra incendios FV fachadas de vidrio (muros cortina) DSF fachadas de doble piel (Doble skin facade)</p> <p><i>*En relación al cálculo de la densidad de carga de fuego hay diferentes conceptos. Stollard & Abrahams (1991) señalan que hay dos componentes en la carga de fuego: los materiales de construcción y el contenido del edificio. Los acabados de las paredes y techos, junto con el mobiliario y complementos son probablemente los elementos que contribuyen en mayor medida a la propagación del fuego. Los elementos estructurales a menos que formen parte de los acabados interiores pueden tener poca implicación en la carga de fuego. En Holanda para el cálculo de la densidad de carga de fuego solo se toma en consideración la estructura del edificio y los elementos no portantes como paredes divisorias, descontando los elementos secundarios incluidos los falsos techos u otros elementos exigidos por otras normativas (por ejemplo la normativa acústica). En Suecia y Noruega es diferente porque aparte de la estructura específica, debe tenerse en cuenta todo material combustible contenido en la estructura o superficies interiores.</i></p>		

En la mayoría de normativas (incluido el CTE español) las medidas estipuladas sobre el control de la propagación exterior del fuego son genéricas, no aluden a ninguna tipología constructiva de fachadas y por lo tanto no hacen referencia a los requerimientos particulares de las fachadas ligeras. En muchos de los casos se justifican los proyectos mediante la aplicación de las medidas prescritas por la norma, aunque no sea posible determinar el nivel de seguridad que aportan (Waldner, 2007: 25). En otros casos se procede con la implementación del enfoque basado en prestaciones, estableciendo una estrategia de seguridad acorde con los requerimientos de cada proyecto.

La aplicación de estos principios de ingeniería de protección contra incendios es cada vez más frecuente en los países de la UE debido al aumento de proyectos singulares en los cuales es materialmente imposible aplicar las medidas de protección prescritas por la normativa. La complejidad de los proyectos ha ido incrementando espectacularmente de la mano de la creatividad de los arquitectos y de las posibilidades tecnológicas actuales. Las fachadas de vidrio se pueden encontrar en versión ondulada, inclinada, girada, redondeada, etc. La singularidad de los proyectos ha supuesto un replanteamiento de las estrategias de SCI y ha generado el escenario ideal para desarrollar en enfoque basado en prestaciones. También este concepto es una excelente opción para abordar la SCI en edificios patrimoniales respetando todo su valor artístico.

Algunos países como Reino Unido, Suecia y Alemania disponen de documentos técnicos realizados por centros de investigación reconocidos. En estos se aborda la problemática específica de las fachadas ventiladas y las FV (fachadas de vidrio) o muros cortina y sus distintas versiones. Las propias normativas remiten al usuario a dichos documentos para ampliar la información correspondiente o exponer un método alternativo a la normativa. La información contenida en estos documentos generalmente está respaldada por ensayos e informes técnicos en los cuales se realizan recomendaciones concretas en referencia a estos temas. Las tablas 3.7 y 3.8 recogen algunos aspectos relevantes sobre el enfoque de las normativas en los países que se han mencionado. Se hace especial énfasis en las disposiciones que contempla cada país sobre el control de la propagación exterior del fuego.

En la actualidad, en la mayoría de países considerados en esta exploración hay una clara tendencia a desarrollar e implementar el enfoque basado en prestaciones. La conciencia respecto a los riesgos y el conocimiento sobre la SCI han ido cobrando

importancia paulatinamente. También las limitaciones de las normativas prescriptivas se han hecho cada vez más evidentes en la medida que los proyectos complejos han ido aumentando en número en las grandes ciudades europeas.



(A)



(B)

Fig. 3.27 Imágenes del exterior y el interior de dos edificios singulares.

(A) Kunsthaus Graz, Austria. 2003. Arq. Peter Cook , Colin Fournier.

(B) 30 St Mary Axe 2003. Arq. Foster & Partners

Fuente imágenes: (A) <http://www.museum-joanneum.at> (B) <http://arquitecturasinlimite.blogspot.com.es>

En el ámbito de la UE fue adoptado mediante la Resolución del Consejo de 5 de mayo de 1985, el denominado “nuevo enfoque” en materia de regulación técnica. Este concepto entre otros objetivos ha pretendido generar una apertura del sector de la construcción a mercados más globales y a la difusión e intercambio de conocimiento y tecnología entre los países. Desde esta perspectiva no es de extrañar la predisposición a evolucionar por la vía prestacional, se podría considerar que este desarrollo y especialización en el ámbito de la SCI va alineado con los objetivos planteados por la UE en el marco del CEN y por ello puede ser una alternativa para la construcción de un escenario común en materia de SCI.

Al igual que en las normativas prescriptivas, en el enfoque basado en prestaciones se pueden apreciar diferencias entre países. Tanto el planteamiento como los parámetros de aplicación son diferentes y dependen en gran medida del nivel de desarrollo de este concepto que se tenga en cada país. En el caso de Reino Unido y Holanda este concepto se ha venido desarrollando desde 1985, Noruega comenzó en 1999 y algunos países como España y Bélgica se encuentran aún en una fase preliminar.

Algunos expertos consideran necesario un “cambio de paradigma”, lo que implica moverse del enfoque prescriptivo al basado en prestaciones, sin embargo hay opiniones encontradas al respecto porque este proceso demanda cambios sustanciales en la manera de entender la SCI y de hacer las normas [Bukowski, Babrauskas 1994]. No se trata de un proceso simple y requiere de una fase de transición en la cual es imprescindible realizar un esfuerzo en educación y cultura de la seguridad contra incendios [Morgan 1999] [Machado 2008]. Este aspecto será tratado en el siguiente apartado. Al final, los avances que se den en este sentido son responsabilidad de cada sociedad, algunas han avanzado mucho durante los últimos años y por tanto no está de más tomar nota de cómo afrontan la problemática del incendio.

3.6.2 Normativa de países referenciales

Como se ha mencionado antes, hay un grupo de países que han logrado despuntar en el ámbito de la SCI y por ello son considerados en la actualidad referente en esta material a nivel mundial. Este grupo de países está conformado principalmente por: Estados Unidos, Reino Unido, Nueva Zelanda, Australia, Canadá, Suecia y Japón.

La manera de afrontar el problema del incendio en estos países es fruto de muchos años de concienciación y reflexiones derivados de cuantiosos incendios que han sufrido durante su historia, muchos de ellos con desafortunados saldos de víctimas y grandes pérdidas materiales. En torno a ello ha ido creciendo una cultura de SCI en la que intervienen factores como:

- (1) el interés de reforzar la educación y el conocimiento en SCI, lo cual incluye la formación de expertos con conocimientos específicos en Ingeniería de protección contra incendios.
- (2) el refuerzo orientado a la concienciación de los usuarios sobre los riesgos, lo cual es posible mediante leyes de regulación de la conducta humana en casos de emergencia (en España se denomina plan de autoprotección).

(3) el fortalecimiento de la percepción del riesgo asociado a los diseños y a las prácticas constructivas, lo que se traduce en la incorporación de ciertos conocimientos en SCI en la formación de los arquitectos y otros profesionales del sector de la construcción.

(4) un cambio en el enfoque de la regulación para que sea más eficaz ante la problemática real de los incendios en la edificación. Este aspecto está muy vinculado a los esquemas administrativos y políticos de cada país.

Dentro de esta cultura de SCI el enfoque basado en prestaciones tiene un papel muy importante. Mediante este enfoque se ha demostrado que es posible implementar estrategias de protección contra incendios en proyectos arquitectónicamente complejos y con diversos riesgos asociados, respetando el diseño original y sin sacrificar las metas de seguridad plateadas (ver apartado 3.8). De forma paralela cuentan con unas normativas prescriptivas acordes con su entorno cultural y arquitectónico, las cuales, normalmente, cubren de forma eficiente los requerimientos de protección contra incendios en las edificaciones convencionales. Estas normativas pese a su enfoque prescriptivo se caracterizan por abarcar diversos aspectos con suficiente claridad; por ello suelen ser bien valoradas por los proyectistas.

Se ha considerado apropiado para esta investigación explorar con mayor detalle las normativas de EEUU, Reino Unido y Nueva Zelanda para evaluar lo que su punto de vista puede aportar a otros contextos normativos. Teniendo en cuenta la extensión y complejidad de los contenidos de cada una de estas normativas, se ha realizado una síntesis que recoge los aspectos de mayor interés en referencia a las disposiciones sobre el control de la propagación exterior del fuego y las medidas de protección en las fachadas.

Normativa de EEUU

El sistema de códigos y normativas de la construcción en EEUU es diferente al de la mayoría de países. La promulgación y desarrollo de este tipo de legislación no forma parte de las responsabilidades del gobierno federal de Estados Unidos, por lo tanto, son elaboradas por organizaciones privadas. La razón de ello está en los fundamentos de la constitución del país. Las organizaciones privadas más importantes dedicadas a desarrollar este tipo de normativas son:

- La *National Fire Protection Association* (NFPA)
- El *International Code Council* (ICC)

Los códigos elaborados por el comité de expertos de cada organismo se ponen a disposición de los gobiernos estatales y locales, y cada estado es libre de adoptar la legislación que considera adecuada. Por tanto, hay estados que de forma oficial aplican en sus proyectos las normativas de la NFPA y otros que adoptan las del ICC o de otros organismos como el *National Building Code* (NBC) creado por el *Building Officials Code Administrators* (BOCA), el *Uniform Building Code* (UBC) creado por la *International Conference of Building Officials* (ICBO), entre otros.

Esta panorámica en la que se identifican diferentes normativas, puede tener una lectura dispersa sobre el funcionamiento de la SCI en el país, no obstante, toda la responsabilidad y control está canalizada hacia una autoridad máxima en cada estado representada por la oficina de bomberos *Office of State Fire Marshall* (SFM) y la figura de la autoridad competente en temas de SCI está representada por el jefe de cada oficina estatal.

Estados Unidos es un país que ha contribuido durante años al desarrollo de la comunidad de SCI a nivel global. Sus centros de investigación, universidades y organismos reguladores han estimulado el desarrollo tecnológico y la comprensión científica del fenómeno del fuego y el control de los incendios. Cabe destacar, antes de entrar en su contexto normativo, instituciones ampliamente reconocidas como el *National Institute of Standard and technology* (NIST) y la *Society of Fire Protection Engineering* (SFPE).

NFPA

La NFPA fue formada en 1896 por un grupo de representantes de las empresas de seguros con el propósito de estandarizar el mercado de los sistemas de rociadores automáticos de extinción. Su ámbito de influencia fue creciendo rápidamente hacia los sistemas eléctricos y luego a todos los aspectos del diseño de la edificación y la construcción. En la actualidad supervisa el desarrollo y mantenimiento de más de 300 códigos.

La NFPA es reconocida alrededor el mundo como la máxima autoridad en conocimientos técnicos, datos, y recomendaciones para los profesionales y usuarios sobre la problemática de los incendios, su protección y prevención. A diferencia de otros organismos, la NFPA cuenta con el reconocimiento de *ANSI American National Standards Institute*, cuyo papel consiste en supervisar el desarrollo de normas de consenso para los productos, servicios, procesos, sistemas y personal en los Estados

Unidos. El enfoque de las normas de la NFPA es en su mayoría prescriptivo, pero ha desarrollado también una opción basada en prestaciones en algunas de ellas. Es de particular interés la opción basada en prestaciones de las normativas: NFPA 5000 Código de edificación y seguridad y la NFPA 101 Código de seguridad humana. El documento de cada norma incluye las dos opciones, de esta forma el usuario encuentra un espectro más amplio para aproximarse a las soluciones disponibles. Unos capítulos del documento de la norma están destinados a las medidas prescriptivas y otros explican el proceso y los parámetros para desarrollar la opción basada en prestaciones.

A continuación se exponen algunos aspectos relevantes contemplados por las normas de la NFPA en referencia al control de la propagación exterior del fuego.

Normas de la NFPA de Estados Unidos

Las exigencias de tipo prescriptivo contempladas para el control de la propagación exterior del fuego están contenidas mayoritariamente en la normativa **NFPA 5000** código de edificación y seguridad. Esta normativa determina un mínimo de requerimientos de diseño en la edificación para alcanzar los objetivos básicos de la seguridad establecidos por la NFPA. Está basada en diferentes normas existentes a las que hace referencia en los distintos apartados. El objetivo consiste en dar al usuario una orientación amplia sobre diferentes aspectos del diseño de la edificación desde la perspectiva de la seguridad. Su contenido abarca aspectos desde la fase de diseño del edificio hasta la fase de uso del mismo. El capítulo 5 de la normativa contiene todo lo referente a la opción basada en prestaciones, trata detalladamente los aspectos a considerar desde la ingeniería de protección contra incendios para desarrollar una estrategia de protección contra incendios con un enfoque prestacional (ver apartado 3.7.1). Incluye también los aspectos a tener en cuenta en edificios emblemáticos.

La normativa **NFPA 80A** también recoge diferentes recomendaciones relacionadas con la propagación exterior del fuego.

Todas las medidas consideradas por la normativa están determinadas por la superficie, el uso y los tipos de construcción de los edificios. La clasificación de tipologías constructivas considerada por la NFPA es la siguiente:

Tipo I: construcciones resistentes al fuego
Tipo II: construcciones no combustibles
Tipo III: construcciones convencionales
Tipo IV: construcciones pesadas de madera
Tipo V: construcciones ligeras de madera

• Restricciones en relación a los materiales de revestimiento NFPA 5000

En el Cap. 7 (7.2.3.2.12) la norma determina que los materiales de los revestimientos deben ser no combustibles o con un grado limitado de combustibilidad. En el Cap. 8 (8.14.3) hace referencia a la misma limitación, pero respecto a los materiales que están dentro de los espacios ocultos, tales con cámaras ventiladas de los muros y falsos techos. En los materiales de revestimiento de madera se admite el uso de tratamiento para ignifugar siempre que debido a su altura o ubicación no se le exija ninguna tasa de resistencia al fuego. Las opciones se pueden deducir de las tablas 7.2.1.1 y 7.3.2.1.

La normativa NFPA 285 contiene las especificaciones de ensayo para determinar la propagación de las llamas a través de las superficies.

• Resistencia al fuego de los muros exteriores NFPA 5000

Tabla. 3.9 Resistencia al fuego de muros exteriores portantes (hrs)
Según el tipo de construcción. Segmento de la tabla 7.2.1.1 contenida en NFAP 5000 Cap. 7.

	Type I		Type II			Type III		Type IV	Type V	
	442	332	222	111	000	211	200	2HH	111	000
Exterior Bearing Walls ^a										
Supporting more than one floor, columns, or other bearing walls	4	3	2	1	0 ^b	2	2	2	1	0 ^b
Supporting one floor only	4	3	2	1	0 ^b	2	2	2	1	0 ^b
Supporting a roof only	4	3	1	1	0 ^b	2	2	2	1	0 ^b

Determina unos periodos de resistencia en horas (hrs) de acuerdo al uso y tipo de construcción del edificio. Esta medida sólo se aplica a muros exteriores portantes. El tipo (*Type*) hace referencia a la altura del edificio y los números hacen referencia a la tipología de la edificación. (Ver anexo 2 de este documento).

Tabla 3.10 Resistencia al fuego de muros exteriores (hrs) Según el uso del edificio. NFPA 5000. Segmento de la tabla 7.3.2.1 contenida en NFAP 5000 Cap. 7.

Occupancy Classification	Horizontal Separation ft (m)				Opening Protectives
	0 to 5 (0 to 1.5)	>5 to ≤10 (>1.5 to ≤3)	>10 to ≤30 (>3 to ≤9)	>30 (>9)	
Assembly, educational, day care, health care, ambulatory health care, detention and correctional, residential, residential board and care, business, industrial, and storage occupancies with low hazard contents	1	1	0	0	See Table 7.3.5(a).

Determina unos periodos de resistencia en horas (hrs) en función del uso del edificio y considerando la distancia desde la fachada hasta un límite relevante (otra edificación). Esta medida está estipulada para muros exteriores portantes y no portantes. Está vinculada con la tabla que se explica a continuación.

Tabla 3.11 Máximo porcentaje (%de la fachada) permitido de áreas no protegidas y aperturas Según el uso del edificio. **NFPA 5000**. Tabla 7.3.5 (a) contenida en NFAP 5000 Cap. 7.

Horizontal Separation (ft)	Maximum Area of Exposing Building Face (ft ²)																		
	100	150	200	250	300	400	500	600	700	800	900	1000	1500	2000	2500	3500	5000	10,000	≥20,000
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	9	8	8	8	8	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
5	12	11	10	9	9	9	8	8	8	8	8	8	7	7	7	7	7	7	7
6	18	15	13	12	11	10	10	9	9	9	9	8	8	8	8	7	7	7	7
7	25	20	17	15	14	12	11	11	10	10	10	9	9	8	8	8	8	7	7
8	33	25	21	19	17	15	14	13	12	11	11	11	10	9	9	8	8	7	7
9	43	32	27	23	21	18	16	15	14	13	12	12	11	10	9	9	8	8	7
10	55	40	33	28	25	21	19	17	16	15	14	13	12	11	10	9	9	8	7
>10	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Para SI (sistema internacional) 1ft= 0,35 m 1ft² = 0,093 m²

Esta medida se aplica en edificios de riesgo especial bajo, dentro de los que se consideran los de uso residencial público y privado, centros de salud ambulatorios, oficinas, edificaciones industriales y de almacenamiento con actividades de bajo riesgo. Indica el porcentaje permitido de áreas de aberturas en función de la distancia a otras edificaciones. Así, una fachada con una superficie de 400 (ft²) (37,17 m²) puede tener un 21% de superficie de aberturas no protegidas cuando está a una distancia de 10 (ft) (3,05 m) de otra edificación.

La limitación del tamaño de las áreas no protegidas (aberturas de ventanas y puertas) es de gran importancia para controlar la propagación exterior del fuego hacia las plantas superiores del propio edificio o hacia edificios vecinos. La tabla determina un máximo de área no protegida (%) en función de la superficie de la fachada y de la distancia desde ésta a un límite relevante (otra edificación). A mayor distancia desde un límite relevante hay menor riesgo, por tanto el porcentaje del área no protegida aumenta.

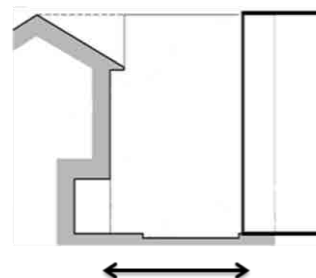


Fig. 3.28 A mayor distancia mayor % de apertura es permitido.

No hace consideraciones respecto a la distribución o forma de las áreas no protegidas.

• **Configuración de la fachada NFPA 5000**

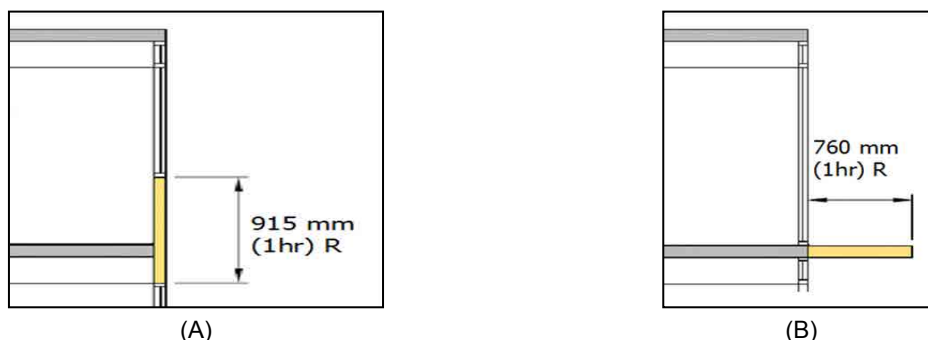


Fig. 3.29 Medidas de control de la propagación vertical.

La norma en el Cap. 37 (37.1.4.1 y 37.1.4.2) determina que toda edificación ≥ 4 plantas que no esté dotada de instalación de rociadores automáticos de acuerdo a la NFPA 13 (normativa de instalación de rociadores) y esté ubicada en un radio menor de 1525 mm respecto a otro edificio, deberá controlar la propagación vertical del fuego a través de las ventanas mediante:

- Un panel o muro de 915 mm de altura con 1 hora de resistencia al fuego (Fig. 3.29A) o
- Una proyección horizontal interpuesta entre las ventanas de 760 mm de vuelo con 1 hora de resistencia al fuego (Fig. 3.29B).

Las medidas estipuladas para cada elemento son independientes, es decir no se compensa el tamaño de la franja en función del tamaño del alero. Toda edificación ≥ 4 plantas sin uno de los dos elementos deberá tener instalación de

Tabla 3.12 Exigencias para otros elementos de la fachada. NFPA 5000.

Cap.37	Elemento	Exigencia
37.1.2	Dinteles	Deberán estar protegidos contra el fuego los elementos de fijación, placas o ángulos de soporte de los dinteles siempre que la luz de la abertura ≥ 1830 mm.
37.2.1	Cornisas y aleros	Todo elemento ornamental que sobresalga de la línea de la fachada deberá estar sujeto de la estructura del edificio y cumplir los requerimientos exigidos al muro al que pertenecen de acuerdo al tipo de construcción (tipos I-V). Si son elementos de madera se admite tratamiento para ignifugar.
37.2.2	Ventanas mirador, terrazas, balcones	Todo elemento de estas características ubicado a una altura inferior a 12 m deberá estar conforme a la tasa de resistencia exigida a los muros a los que pertenecen según las tablas 7.2.1.1 y 7.3.2.1. Si los elementos son de madera se admite tratamiento para ignifugar.

• **Recomendaciones NFPA 80A**

La NFPA 80A Prácticas recomendadas para la protección del edificio frente a la exposición exterior del fuego. Es una normativa que aporta métodos de cálculo para determinar las distancias recomendables, porcentaje de apertura de las ventanas en función del nivel de severidad de los incendios. Éste nivel de severidad a su vez es determinado por el uso y contenido combustible de los edificios. La norma también realiza recomendaciones de protección para reducir las distancias que se obtienen a través de los cálculos y ofrece ejemplos de casos prácticos.

Algunas de las recomendaciones para reducir la transmisión de flujo de calor radiante desde un recinto de incendio son:

- Tener en cuenta las distancias recomendadas en las tablas de acuerdo a los aspectos mencionados antes (ver anexo 2).
- Reducir el tamaño de las aperturas de las ventanas siempre que sea posible.
- Emplear materiales no combustibles en los revestimientos.
- Hacer uso de una instalación de rociadores automáticos siempre que se usen materiales de revestimiento combustible, si fuera el caso considerar que la instalación de los rociadores sea tipo cortina de agua de descarga directa sobre la fachada conforme a las disposiciones de la NFPA 13.
- Considerar el uso de vidrios armados y también de mecanismos de cierre automático o mecánicos de las aberturas.
- Aplicar tratamientos de ignifugación en las superficies combustibles.

• Barreras cortafuego en los muros cortina NFPA 101 Y NFPA 5000

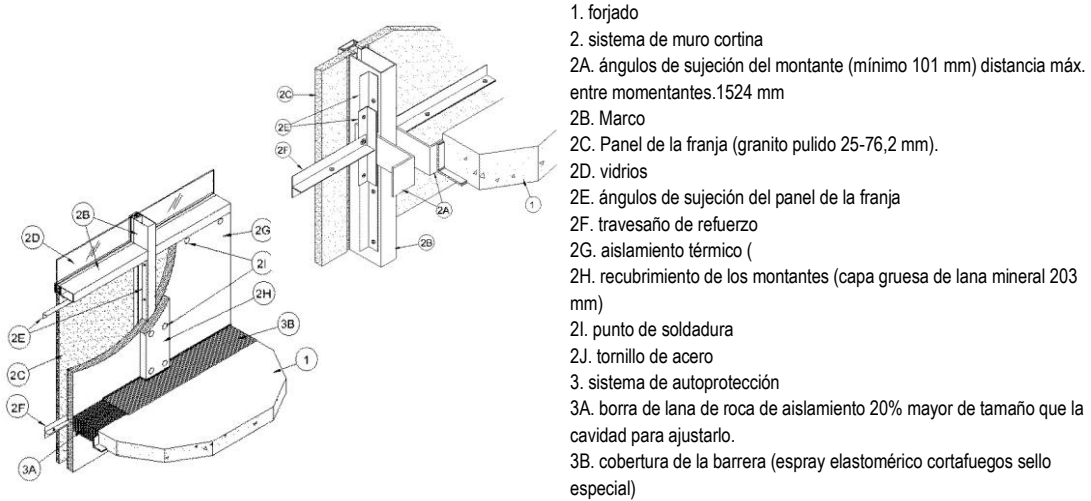


Fig. 3.30 Detalle constructivo exigido para muros cortina. XHDG.CW-S-2057. Certificado por UL *Underwriters Laboratories Inc.* Ensayado según la norma: ANSI / UL 2079

La **NFPA 5000** 8.9.3 se refiere al control del paso de las llamas y los gases calientes de una planta a otra a través de la cavidad perimetral del encuentro entre el forjado y el muro cortina. El tamaño de la franja es el mismo que se considera en el Cap. 37 y se mencionó antes en relación a la configuración de la fachada.

Las normas **NFPA 101** 8.5.6 y **NFPA 5000** 8.9.3 determinan que todo material y método empleado para evitar el paso de las llamas deberá ser ensayado según la norma ASTM E1966 ó ANSI/ UL 2079.

• Ensayo mediante la norma ASTM E2307

Esta norma de ensayo es una versión mejorada del ensayo ANSI/UL 2079 en el cual se caracterizan de forma más cercana a la realidad los elementos evaluados: un elemento clasificado (forjado) y un elemento sin clasificación (fachada). Este tipo de ensayos tiene el propósito de evaluar la capacidad de los sellos para evitar el paso de las llamas y gases calientes, no considera las franjas.

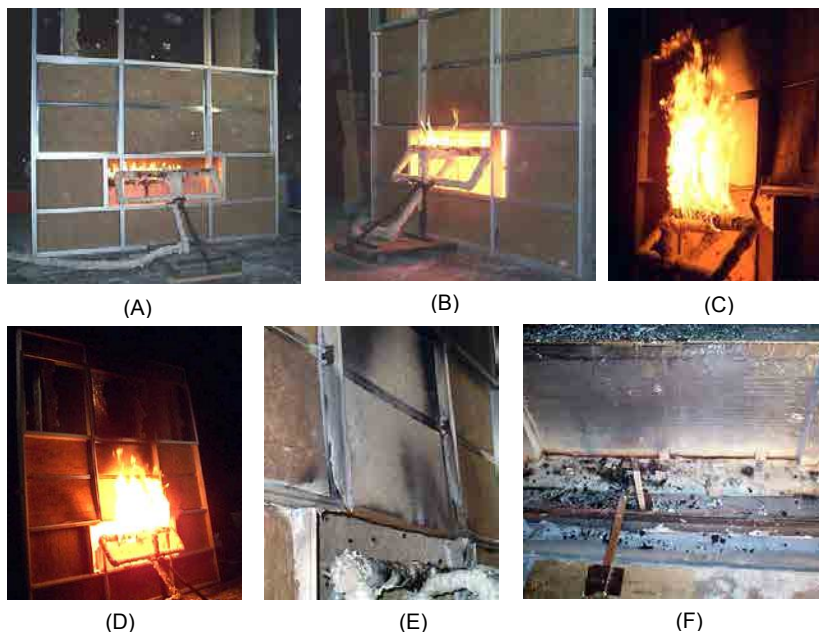


Fig. 3.31 Imágenes del ensayo ASTM E2307 (A) Inicio (B) 15 min (C) 45 min (D) 2 horas (E) Imagen del fallo del montante (F) Imagen del sello cortafuegos visto desde el interior del modulo de ensayo. Fuente: IFC International Firestop Council.

Normativa de Reino Unido

El Reino Unido es uno de los estados del mundo en donde está más consolidada la cultura de la SCI. Las medidas de prevención contra el fuego más antiguas fueron instauradas en Londres como consecuencia de los incidentes asociados al gran incendio de Londres de 1666.

Al igual que en otros países de Europa, la normativa vigente de SCI en REINO UNIDO forma parte de los códigos de la edificación. Estos reglamentos son instrumentos legales creados por la Secretaría de Estado y aprobados por el artículo 1 de la Ley de Construcción de 1984 y son aplicados en Inglaterra y Gales. Aunque la legislación británica aplica en todo el Reino Unido en su conjunto, cada gobierno es responsable de su jurisdicción y por tanto Inglaterra y Gales comparten una misma legislación en este ámbito, pero Escocia e Irlanda del Norte tienen sus propias versiones de legislación con ligeras diferencias adaptadas a su contexto. Hecha esta salvedad, en adelante al hablar de normativa británica se estará haciendo referencia únicamente a las normativas de Inglaterra y Gales cuyo documento principal es The building Regulations 2000 (Statutory Instrument 2000 N° 2531) Part B Fire Safety. La última enmienda fue realizada en el año 2006 y entró en vigor en abril de 2007.

El planteamiento de la normativa británica se enmarca dentro de una categoría diferente de las dos que se han venido mencionando, es decir, los enfoques prescriptivo y prestacional. Se considera que ésta tiene una formulación puramente funcional [Pedro et al. 2010]. El enfoque funcional, es una vía intermedia entre el enfoque prescriptivo y el prestacional en el cual se definen claramente unos objetivos y los requisitos para abordarlos, pero no se llega a determinar un método para comprobar el nivel de rendimiento necesario para lograr dichos objetivos, tal como lo hace el enfoque basado en prestaciones (apartado 3.7.1). En términos prácticos, esto se traduce en un documento que propone unos objetivos concretos de rendimiento frente al incendio y ofrece un conjunto amplio de opciones de protección para abordarlos. Los objetivos planteados por la normativa pueden ser satisfechos de dos formas:

(1) Siguiendo las recomendaciones establecidas en el documento aprobado B, el cual a su vez hace referencia a: Las normas británicas de regulación, las normas europeas (armonizadas) y a publicaciones técnicas y científicas realizadas por prestigiosos centros de investigación como el Building Research Stablishment (BRE) o el Center For Window and Cladding Technology (CWCT).

(2) Mediante la adopción de un enfoque alternativo como el uso de técnicas de ingeniería de protección contra incendios. Para implementar esta opción se dispone de dos códigos: el BS 9999:2008 código de buenas prácticas de seguridad contra incendios en el diseño, gestión y uso de los edificios y el BS 7974 aplicación de los principios de ingeniería de seguridad contra incendios en el diseño de los edificios - código de buenas prácticas.

Aunque no existe una razón imperiosa de adoptar las recomendaciones formuladas en el documento B, este se representa como el enfoque más empleado, en especial para edificios pequeños y de construcción convencional. Sin embargo, las técnicas de ingeniería de protección contra incendios tienen cada vez mayor acogida para el desarrollo de proyectos grandes o complejos.

Antes de 1985 la normativa británica al igual que en la mayoría de países había sido prescriptiva. A partir de ese año comenzó un proceso hacia una orientación prestacional motivada principalmente por la “relajación” que se percibía en el cumplimiento de los reglamentos y normativas existentes [Morgan 1999]. De forma paralela se contaba con el apoyo de normativas con un enfoque totalmente prescriptivo aplicable a las tipologías constructivas más comunes. Pasados unos años, con la entrada en vigor de la normativa de 1992 se reconoció oficialmente el empleo de un enfoque alternativo en el diseño de estrategias de SCI.

Durante este proceso se hizo evidente que este cambio de concepto requería mayores esfuerzos destinados a la formación de los diseñadores, reguladores, redactores de normas y reglamentos, etc. Las iniciativas promovidas en torno a este interés, dieron lugar en 1993 al primer plan de estudios en Ingeniería de protección contra incendios a nivel nacional, contaron con la colaboración de diversos organismos gubernamentales y académicos y también de instituciones profesionales tales como: la Asociación de Ingenieros de Protección contra el Fuego, el Instituto de Seguridad contra Incendios, el cuerpo de bomberos, entre otros. El plan profesional se fue consolidado con la ayuda de distintas universidades como la Universidad de Lancashire, Universidad de South Bank (Londres), Universidad de Leeds, Universidad de Hong Kong y la Universidad de Edimburgo. El nuevo enfoque de la normativa y la especialización del ámbito de la SCI estuvo acompañado de un cambio gradual por parte de profesionales y usuarios frente a los riesgos y el peligro de los incendios en la edificación.

Con el tiempo se vio que la educación, aunque era importante no era suficiente, y se comenzó a trabajar en la unificación de criterios desde el punto de vista de la Ingeniería de protección contra incendios. Gracias a este trabajo se cuenta en la actualidad paralelamente con las normativas de SCI en la edificación y con códigos cuyo propósito es guiar al usuario a través de todos los aspectos que pueden influir en el diseño de las estrategias de protección contra incendios vista desde un enfoque prestacional.

A continuación se hace un breve repaso de los aspectos más relevantes del documento B de seguridad contra incendios en la edificación. Las secciones del documento que tienen mayor interés en esta investigación son los capítulos: B3 y B4 los cuales tratan aspectos relacionados con el control de la propagación exterior del fuego y las medidas de protección a considerar en las fachadas.

Normas de Inglaterra y Gales -The Building Regulations

El capítulo B4 de la normativa recoge las medidas estipuladas para el control de la propagación exterior del fuego. El objetivo principal es prevenir la propagación del incendio de un edificio a otro como consecuencia de la radiación de flujo de calor o por a través de brasas volantes. Determina que este objetivo se puede alcanzar mediante:

- (1) El control de las superficies exteriores de paredes y techos
- (2) la prestaciones de los muros exteriores resistentes al fuego, cuando sea el caso.

El capítulo B3 contiene otros aspectos relacionados con la propagación a través de las fachadas, se trata del control de la propagación a través de espacios ocultos tales como las cámaras de las fachadas ventiladas.

Los aspectos a considerar en relación a la capacidad de propagación de las llamas a través de las ventanas está definidos por:

- La intensidad del incendio
- La distancia entre edificios
- La protección que ofrece la propia fachada
- El riesgo que pueden generar a las personas en otros edificios

Los requerimientos previstos para controlar el riesgo de propagación dependen del uso del edificio, el tamaño, la distancia a los límites relevantes (que hace referencia a otra edificación) y en algunos casos la altura. El límite mínimo considerado como aceptable es 1 m a partir de esta distancia se determinan diferentes medidas.

Los techos con ángulos de inclinación superiores a 70° se consideran parte de las fachadas.

• Restricciones en relación a los materiales de revestimiento

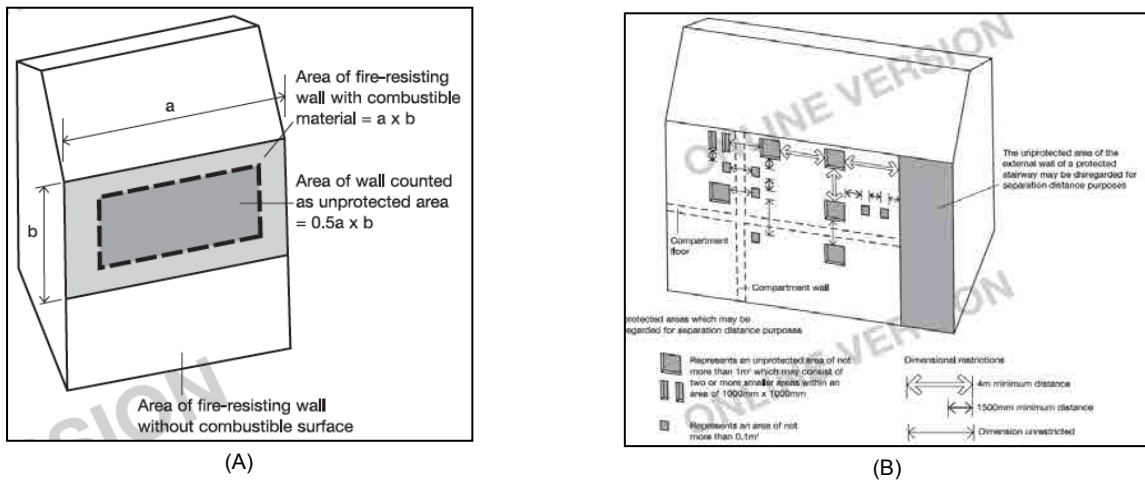


Fig. 3.32 Consideraciones sobre las áreas no protegidas. (A) Áreas no protegidas sobre una superficie de material combustible (B) Áreas no protegidas que pueden ser ignoradas en función de la distancia al límite relevante.

Extraído de la sección B4 diagramas 43 y 44.

Tabla 3.13 Áreas no protegidas según el Método 1

Extraído de la sección B4 diagrama 46.

Minimum distance (A) between side of building and relevant boundary (m)	Maximum total area of unprotected areas (m ²)
1	5.6
2	12
3	18
4	24
5	30
6	No limit

Tabla 3.14 Porcentajes de áreas no protegidas.

Extraído de la sección B4 tabla 16.

Minimum distance between side of building and relevant boundary (m)	Maximum total percentage of unprotected area %
1	8
2.5	20
5	40
7.5	60
10	80
12.5	100

Las superficies de revestimientos que se encuentran ≤ 1 m respecto al límite relevante (una edificación vecina) deben tener una clase de reacción al fuego B-s3, d2 ó mejor. La cantidad de material combustible está relacionado con las áreas no protegidas que se permitan, este aspecto puede variar dependiendo de diferentes situaciones algunas de ellas son:

- Cualquier parte de un muro exterior con menos resistencia de la determinada en la Tabla A1. se considera un área no protegida aunque los revestimientos sean no combustibles.
- Cualquier muro exterior con la apropiada resistencia al fuego pero con revestimiento combustible se cuenta como área no protegida la mitad de dicha superficie combustible (Fig. 3.32A).
- Si la distancia al límite relevante (edificación vecina) es inferior a 1 m debe cumplir las siguientes condiciones:
 - (1) La extensión de áreas no protegidas no debe exceder lo especificado en el gráfico (Fig. 3.32B).
 - (2) El resto del muro debe ser resistente por ambas caras.

Métodos para calcular el área no protegida

Cuando la distancia al límite relevante es ≥ 1 m se puede considerar los datos de las tablas que ilustran los métodos 1 y 2.

- método 1: aplica para edificaciones ≤ 3 plantas ó ≤ 24 m altura (C).
- método 2: aplica para edificaciones ≤ 10 m (D).

Si hay instalación de rociadores automáticos la distancia al límite relevante puede ser la mitad y las áreas no protegidas pueden ser el doble de las determinadas, de acuerdo a las recomendaciones de la norma BS 9251.

Información adicional relacionada con métodos de cálculo de áreas no protegidas:
BRE External Fire Expread. Building Separations and boundary distances (BR 187-BRE1991).

• **Otras consideraciones sobre los revestimientos en edificios de varias plantas**

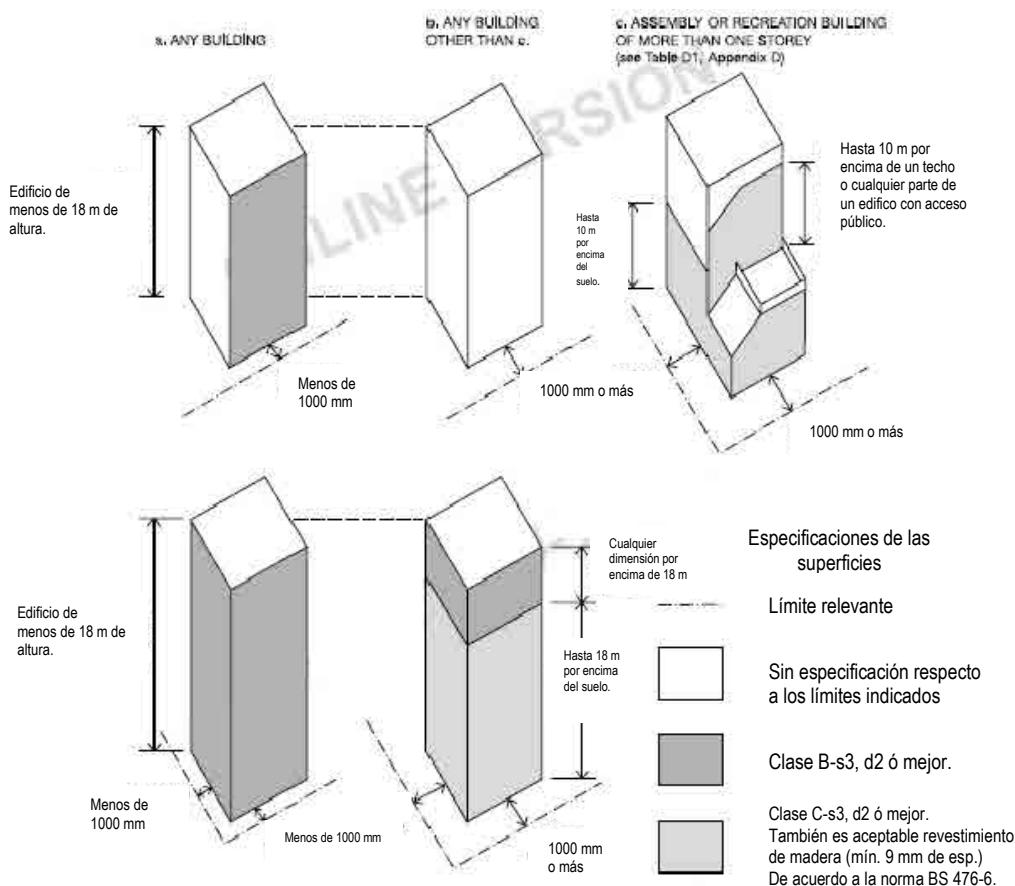


Fig. 3.33 Especificaciones para superficies exteriores de los edificios.
Extraído de la sección B4 diagrama 40 (textos traducidos).

El documento B4 sección 13 se refiere a la clase de reacción al fuego de los revestimientos de las fachadas en edificios de varias plantas. La clase de reacción al fuego de los materiales de revestimiento depende de: La distancia al límite relevante y la altura de la edificación.
 Cuando la distancia es menor a 1 m la clasificación del material de revestimiento es B-s3, d2 ó mejor sin importar la altura del edificio. Cuando la distancia es de 1 m o más, los revestimientos pueden ser de una clase de reacción menos limitada C-s3, d2 ó mejor. Sin embargo a partir de 18 m debe ser de nuevo B-s3, d2. Esta situación se repite hasta una altura de 10 m en zonas del edificio accesibles desde una cubierta o una azotea.

Las medidas contempladas en referencia a la clase de reacción de los materiales no difiere mucho del criterio empleado en el CTE español, con la diferencia que en éste no se tiene en cuenta la distancia respecto a otros edificios.

● **Resistencia al fuego de los muros exteriores**

Tabla 3.15 Especificaciones de resistencia al fuego de los elementos
 Segmento de la tabla A1 contenida en el documento B Anexo A.

Part of building	Minimum provisions when tested to the relevant part of BS 476 ⁽¹⁾ (minutes)			Minimum provisions when tested to the relevant European standard (minutes) ⁽²⁾	Method of exposure
	Loadbearing capacity ⁽³⁾	Integrity	Insulation		
5. External walls					
a. any part less than 1000mm from any point on the relevant boundary;	See Table A2	See Table A2	See Table A2	REI see Table A2	Each side separately
b. any part 1000mm or more from the relevant boundary ⁽⁴⁾ ;	See Table A2	See Table A2	15	RE see Table A2 and REI 15	From inside the building
c. any part adjacent to an external escape route (see paragraph 2.10 and 2.15 and Diagram 7).	30	30	No provision ⁽⁴⁾⁽⁷⁾	RE 30	From inside the building
10. Cavity barrier	Not applicable	30	15	E 30 and EI 15	Each side separately

La tabla A2 (mencionada en la tabla A1) hace referencia a muros exteriores portantes:
 Si pertenecen a una edificación de ≤ 5 plantas requiere: REI 30
 Si pertenecen a una edificación de ≥ 5 plantas requiere: REI 60

● **Configuración de la fachada**

Efecto del elemento saliente:
 En relación a la geometría de la fachada determina una distancia al límite relevante (edificación vecina) de al menos 2 m cuando exista un elemento saliente que pueda desviar la trayectoria de las llamas hacia una edificación vecina.

La normativa no hace referencia a los elementos de la fachada como medio de control de la propagación exterior del fuego, por ejemplo, a diferencia de muchas normativas no menciona el uso de franjas ni aleros.

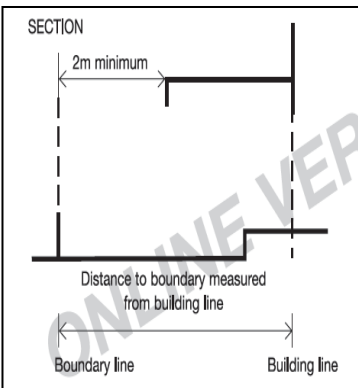


Fig. 3.34 Distancia con otro edificio.
 Extraído de la sección B4 diagrama 45.

• **Barreras cortafuegos en espacios ocultos (cámaras ventiladas)**

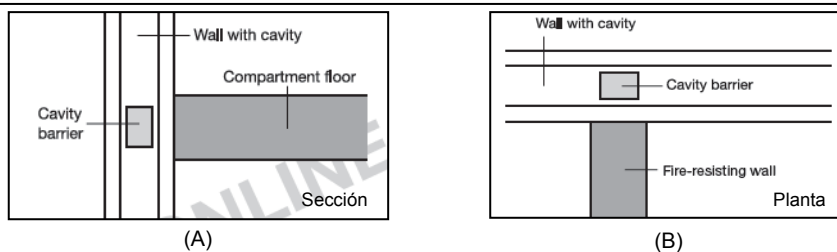
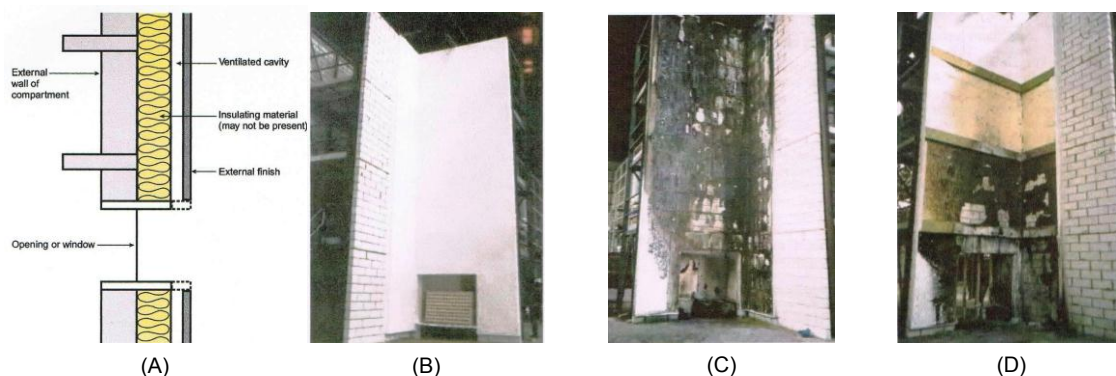


Fig. 3.35 Gráfico de las barreras cortafuegos verticales y horizontales en cámaras ventiladas. Extraído de la sección B3 diagrama 31.

En la sección 6 del documento B3 son tratados algunos aspectos relacionados con las cámaras ventiladas de las fachadas como parte del apartado dedicado a los espacios ocultos. Los cuales se refieren a todo espacio que puede facilitar una ruta de propagación del fuego, ya sea horizontal o vertical. La norma determina el uso de barreras que impidan el paso de las llamas y los humos a través de la cámara ventilada.

Tabla 3.16 Características de las barreras cortafuego para fachadas ventiladas.

Resistencia del elemento constructivo	Las barreras cortafuegos deben estar en disposición de resistir al menos 30 min, o tener en cuenta lo determinado en la tabla A1 ítem 10.
Disposición	<ul style="list-style-type: none"> • Barreras horizontales cada 3,5 m de acuerdo a BRE 135 (criterio de comportamiento de las barreras) norma de ensayo BS 8414-1:2002 (Fig. 3.35A) • Barreras verticales (Fig. 3.35B) • Barreras enmarcando las aberturas (ventanas o puertas)
Materiales	<ul style="list-style-type: none"> • Acero por lo menos piezas de 0,5 mm de espesor. • Madera por lo menos de 38 mm de espesor • Lana mineral, dispuesta a compresión en su instalación. • Tableros de silicato cálcico, cemento, o yeso de al menos 12 mm de espesor.
Sistema de fijación	La sujeción ha de ser directamente a la estructura del edificio mediante fijación mecánica.
Materiales del aislamiento térmico	<p>Los materiales ubicados en el interior de la cámara deben cumplir los mismos requisitos estipulados para los revestimientos según el esquema 40 del documento B4. Por tanto en edificaciones de 18 m o más se exige un material de aislamiento térmico de clase B-s3, d2 ó mejor. En edificaciones de menos de 18 m sólo se exige esta clase resistente si la distancia del edificio al límite relevante no es al menos de 1 m.</p> <p>Para edificaciones de más de 18 m consultar las recomendaciones del BRE 135 Fire performance of external insulation for walls of multi-storey buildings, según norma de ensayo BS 8414-1:2002.</p>



Sellos o barreras cortafuego en los muros cortina

La sección 7 del documento B3 se centra en las protecciones requeridas en las cavidades. Trata aspectos relacionados con la penetración del fuego a otras plantas debido al paso entre forjados de tuberías, ductos de ventilación, basuras etc., pero no hace referencia a sellos cortafuego en las cavidades del encuentro entre los forjados y las fachadas de vidrio o muros cortina.

Para otro tipo de sellos la norma sugiere consultar la ASFP (*Association for Specialist Fire Protection*) Red Book.

Fig. 3.36 Ensayo BS 8414-1:2002. Sistemas de fachada ventilada con aislamiento térmico (EPS) poliestireno expandido. (A) Detalle de la muestra (B) Módulo antes del ensayo (C) Módulo después del ensayo sin barreras cortafuegos (D) Módulo después del ensayo con barreras cortafuegos en cada planta.

Fuente: Colwell – Martin, 2003

Normativa de Nueva Zelanda

El progreso de Nueva Zelanda en el campo de la SCI ha sido particularmente rápido comparado con el de otros países. Hasta 1992 había tenido unas normas de tipo prescriptivo que no cubrían con solvencia diversos aspectos importantes [Moss 1990]. A partir de la edición en 1992 del Código de la Edificación de Nueva Zelanda (NZBC) (New Zealand Buildign Code) se introdujo el enfoque basado en prestaciones conservando paralelamente el prescriptivo, cuyas disposiciones ofrecían “soluciones de protección aceptables” frente a los requerimientos de la edificación. Podría decirse que Nueva Zelanda ha hecho un buen ejercicio de observación de otros modelos normativos y adaptación a su propio ámbito [Bukowski 1995]. Las normativas de la NFPA de EEUU y las normativas británicas han servido de referente en este proceso, sin embargo han desarrollado su propio sistema de normas y su cultura en torno a la SCI. La Universidad de Canterbury ha tenido una gran influencia en este proceso de consolidación, no sólo por impulsar la formación de especialistas en ingeniería de seguridad contra incendios (Máster en ingeniería de incendios), sino por su contribución en la investigación y la divulgación científica del fuego y la problemática de los incendios. La primera guía de ingeniería de protección contra incendios (*Fire Engineering Design Guide*) fue realizada con la colaboración del Centro de Ingeniería Avanzada (*Centre for Advanced Engineering*) de la Universidad de Canterbury. En la actualidad Nueva Zelanda es conocido dentro de la comunidad de protección contra incendios, como uno de los países con unos códigos prestacionales más avanzados. La NZBC es un documento redactado por el Ministerio de Obras Públicas y Vivienda, comprende un primer anexo sobre la edificación aprobado en 1992. Las cláusulas C1, C2, C3 y C4 son las correspondientes a la seguridad contra incendios. La primera edición de esta parte del documento es del año 2000, desde entonces se han realizado diferentes modificaciones, la última de ellas en el año 2010. Esta normativa es de tipo funcional, define un esquema claro en el cual plantea unos objetivos de seguridad, unos requerimientos y determina unos planteamientos de rendimiento para alcanzar los objetivos. En la parte inicial del documento se especifica que las medidas estipuladas en la normativa se consideran soluciones aceptables, pero que no constituyen un procedimiento único para alcanzar la seguridad en la edificación. Los métodos que se indican son particularmente apropiados para edificaciones básicas y edificios bajos. En el caso de proyectos singulares se anima a desarrollar diseños específicos de ingeniería de incendios para lograr resultados mejores y más económicos.

Normas de Nueva Zelanda - New Zealand Building Code (NZBC)

El documento está dividido en 4 grandes partes:

- C1 Incendio declarado
- C2 Medios de escape
- C3 Propagación del fuego
- C4 Estabilidad estructural durante el incendio

En cada una de estas partes se especifican unos objetivos, se determinan unos requerimientos funcionales para abordarlos y las características de rendimiento que se han de cumplir para alcanzar dichos objetivos. Esta descripción de la estructura del documento define el carácter funcional de la normativa.

Control de la propagación exterior del fuego Principios generales

Los muros de las fachadas deben estar contruidos de manera que se evite:

- (1) la propagación vertical del fuego en el propio edificio
- (2) la afectación a edificaciones vecinas
- (3) la afectación de las rutas de evacuación

La normativa contempla un amplio número de variables en función de las cuales determina unas medidas de protección, algunas de las variables consideradas son:

- Categorías de peligro de incendio FHC (Fire Hazard Category). Dependen de los grupos de uso.
- Cargas de ocupación, usuarios /m² (Occupant Densities). Dependen de los grupos de uso.
- Grupos de uso (*purpose groups*) Se refiere al uso de los edificios en el cuadro 2.1. se ha realizado una simplificación del cuadro de la normativa.
- Criterios de compartimentación. Dependen de los grupos de uso, la carga de ocupación y la altura de los edificios.
- Altura de evacuación.
- Distancias de separación con respecto a los límites relevantes. La normativa considera diferentes localizaciones y geometrías de los edificios para considerar las distancias a los límites relevantes. La distancia de referencia a dichos límites es 1 m.
- Las aberturas de los muros de las fachadas y las áreas no protegidas permitidas.
- La presencia de instalación de rociadores automáticos.

Tabla 3.17 Grupos de uso.
Simplificación de la Tabla. 2.1. Parte 2.

Grupos de uso (según el uso del edificio)	
CS,CL,CO,CM	Actividades públicas (Crowd activities) Incluye teatros, auditorios, cines etc.
SC,SD,SA,SR,SH	Actividades dormitorio (Sleeping activities) Incluye hoteles, hospitales, viviendas plurifamiliares etc.
WL,WM,WH,WF	Actividades de trabajo, negocios y almacenamiento (Working, business, or storage activities) Incluye bancos, oficinas, almacenes, comercios etc.
IE,IA,ID	Actividades intermitentes (Intermittent activities) Incluye garajes, lavanderías, industrias etc.

Tabla 3.18 Categorías de peligro.
Extraído de Sección 2.2.1.3 Parte 2.

Fire Hazard Category	Range of FLED (MJ/m ²)	Design Value of FLED (MJ/m ²)
(Note 1)	(Note 2)	(Notes 2, 3)
1	0 - 500	400
2	501 - 1000	800
3	1001 - 1500	1200
4	> 1500	
Column 1	2	3

FLED: Densidad de energía de carga de fuego
(Fire Load Energy Density).

● Restricciones en relación a los materiales de revestimiento

Tabla 3.19 Materiales de revestimiento de las fachadas.
Extraído de la Tabla. 7.5. Parte 7.

Building height	Distance to relevant boundary			
	Less than 1 m	1 m or more		
	All purpose groups	Purpose groups SC, SD	Purpose groups SA, SR	All other purpose groups
Single storey	A	-	-	-
Up to 7 m	A	B	-	-
Up to 25 m	A	A	B	B (Notes 1, 2)
Over 25 m	A	A	A	B

Key:
The **external wall** cladding system shall have a peak rate of heat release and a total heat released not greater than given below for the applicable performance level (Note 3).

	Peak Rate of Heat Release (kW/m ²) (Note 4)	Total Heat Released (MJ/m ²) (Note 4)	
A	100	25	(The smaller the heat release value the more stringent the requirement.)
B	150	50	
-	No requirement	No requirement	

Notes:
1. See Paragraph 7.11.4 for SH purpose group concession.
2. Where the building is fully sprinklered in accordance with NZS 4541 or NZS 4515 (as applicable), there is no requirement.
3. See Paragraph 7.11.3 for permitted variation over the wall height where a building contains different purpose groups.
4. Determined by testing to AS/NZS 3837 at an irradiance of 50 kW/m² for a duration of 15 minutes (see Appendix C)

Parte 7. La norma determina dos clases de materiales en función de su velocidad de liberación de calor HRR.
Tipo A: Cuyo pico máximo de HRR es 100 (MJ/m²)
Tipo B: Cuyo pico máximo de HRR es 150 (MJ/m²)

De acuerdo a la tabla la restricción en el uso de superficies combustibles depende de la altura, el grupo objetivo (uso del edificio) y la distancia a otros edificios. En general se considera que no hay restricción en viviendas unifamiliares a menos que la distancia al límite relevante sea inferior a 1 m. A partir de 25 m de altura los revestimientos deben ser tipo A excepto para usos diferentes a actividades dormitorio, en estos puede ser tipo B si la edificación tiene instalación de rociadores automáticos.

En las notas especifica las normas de ensayo empleadas para su comprobación.

Sección 7.11.3 Los materiales no combustibles como el hormigón, el ladrillo, el vidrio y el acero cumplen con los Tipo A y B. Los revestimientos tipo de fibras de celulosa y cemento de menos de 1.0 mm espesor, normalmente cumplen con los Tipo A y B, pero requieren certificado mediante ensayo. Los productos de madera convencionales normalmente no cumplen con los Tipo A y B.

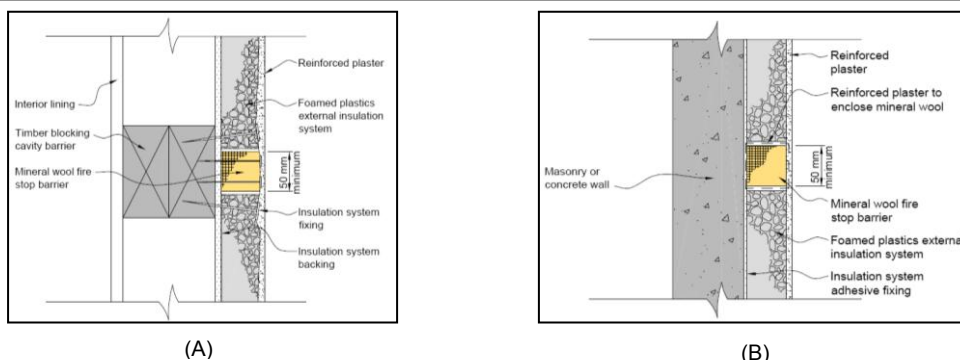


Fig. 3.37 Métodos para proteger componentes de la fachada.

Gráficos 7.12 contenidos en la Parte 7 de la norma.

Sección 7.9.18 Hace referencia al mejoramiento del material de aislamiento térmico tipo espuma plástica (combustible) mediante revestimiento de yeso reforzado. Esta especificación va orientada a sistemas de fachada con aislamiento exterior EWI (External Wall Insulation).

- Sistema con cámara: las barreras deben disponerse cada dos plantas como mínimo (Fig. 3.37A).
- Muro convencional (hormigón o ladrillo) (Fig. 3.37B).

• Resistencia al fuego de los muros exteriores

La resistencia al fuego de los elementos constructivos (FRR) está determinada por tres características fundamentales: Estabilidad/integridad/aislamiento en función del tiempo. Por tanto el FRR (*Fire Resistance Rating*) se expresa como: /30/30/30.
 La resistencia al fuego establecida para las fachadas depende en gran medida de las variables expuestas antes. En el cuadro siguiente se consideran algunas de las especificaciones generales sobre este aspecto, otras variables consideradas se pueden consultar en el anexo 2 de esta investigación.

Tabla 3.20 Exigencia de resistencia al fuego según el uso y ocupación del edificio.
 Información extraída de las tablas 4.1 – 4.5. Parte 4.

Tipo de edificación	FRR
Vivienda aislada unifamiliar o unidades de vivienda compuestas por dos viviendas (de dos plantas máximo).	30/30/30
Toda edificación cuya distancia al límite relevante no sea al menos de 1 m.	30/30/30
Las edificaciones que superan 25 m de altura deben consultar las tablas que especifican los requerimientos según el uso y la categoría de peligro.	Tablas 41-45. Parte 4 de la norma

• Configuración de la fachada

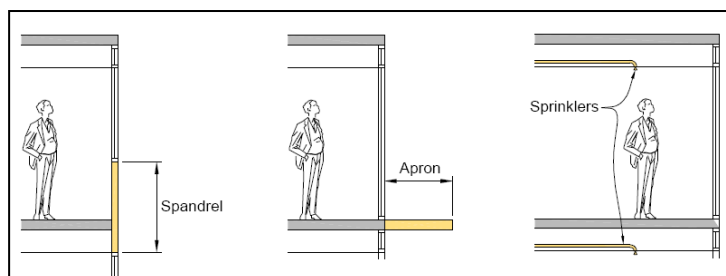


Tabla 3.21
 Extraído de la sección 7.9.12. Parte 7.

Apron projection P (m)	Spandrel height H (m)
0.0	1.5
0.3	1.0
0.45	0.5
0.6	0.0

Fig. 3.39 Medios de control de la propagación vertical.
 Gráficos 7.2 contenidos en la Parte 7 de la norma.

Sección 7.9.12 El uso de franjas verticales (*spandrel*) y aleros (*apron*) es considerado uno de los medios de prevenir la propagación del fuego. En la tabla 7.1 se aprecian las combinaciones determinadas de sus dimensiones. La resistencia al fuego de estos elementos debe ser la misma exigida a la del muro al que pertenecen. Si existe instalación de rociadores automáticos (*sprinklers*) se puede prescindir de estos elementos. Los *sprinklers* deben instalarse según la NZS 4541.

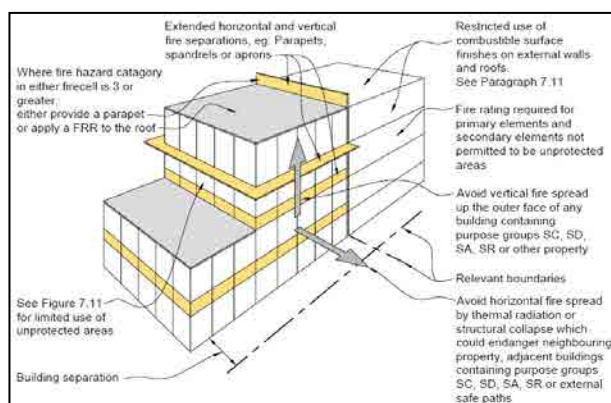


Fig. 3.40 Consideraciones sobre el control de la propagación vertical.
 Gráfico 7.1 contenido en la Parte 7 de la norma.

Sección 7.1.2 La protección necesaria debe ser alcanzada mediante la combinación de:

- La separación entre edificios (distancia a límites relevantes).
- La restricción del uso de materiales combustibles de revestimiento.
- La limitación de áreas no protegidas (incluye puertas, ventanas y lucernarios en los techos).
- La provisión de parapetos (techos) distancia vertical entre ventanas (franjas), y elementos salientes (aleros).
- El uso de vidrios resistentes al fuego

Toda solución alternativa, incluida la instalación de rociadores automáticos de ventanas queda sujeta a un diseño específico de ingeniería de protección contra incendios.

• Barreras y sellos cortafuegos

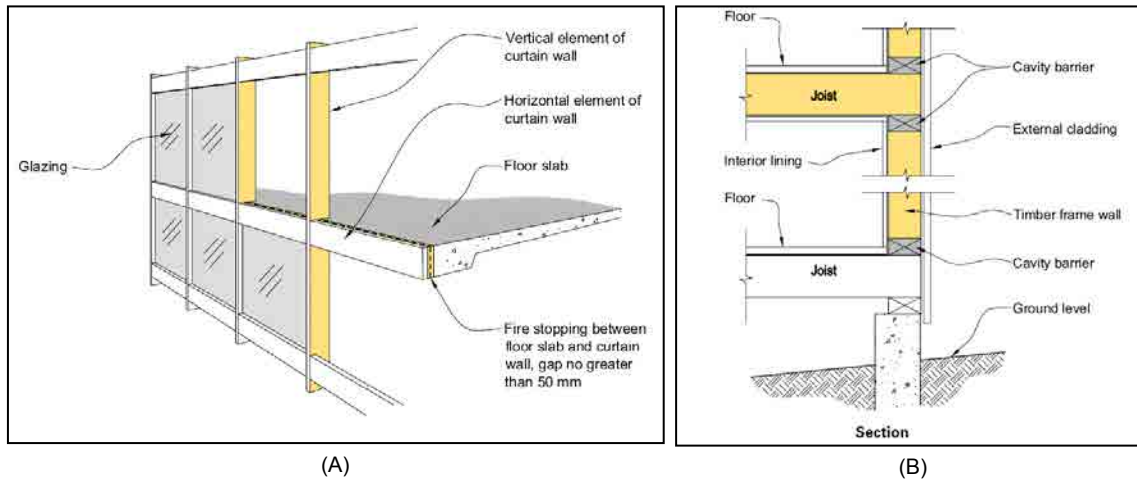


Fig. 3.41 Disposiciones para la protección de las fachadas ligeras. (A) Sellos en muros en la cavidad perimetral del encuentro forjado – muro cortina (B) Barreras en fachadas con cámara.

Gráficos 6.11 y 6.12 contenidos en la Parte 6 de la norma.

En la parte 6 del documento la norma se refiere a los espacios ocultos. Todo espacio oculto que pueda constituir una ruta de propagación ya sea dentro de las paredes o de los falsos techos debe tener una barrera o un sello cortafuegos.

Hace énfasis en la importancia de evitar la propagación vertical del fuego a través de cavidades en los edificios de varias plantas.

Incluye dentro los de espacios ocultos:

- la cavidad el encuentro del forjado y un muro cortina (Fig. 3.41A)
- cámaras ventiladas entre los muros (Fig. 3.41B)

Las recomendaciones se explican en el cuadro siguiente.

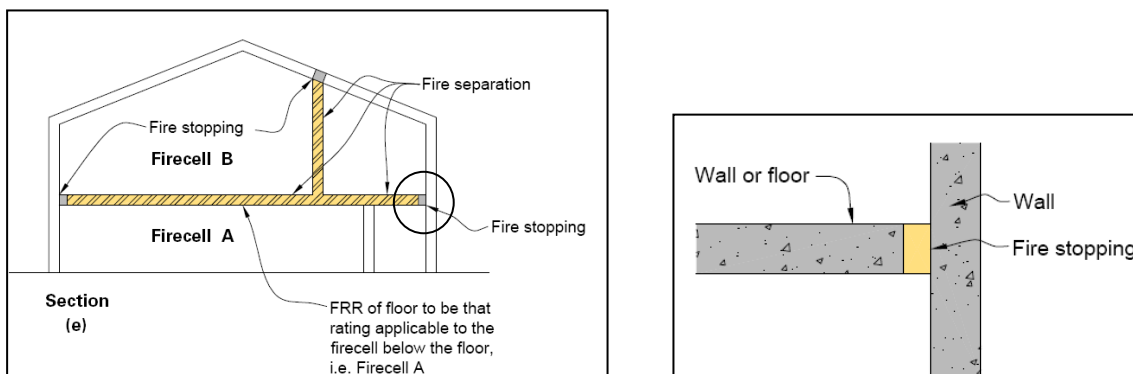


Fig. 3.42 Consideraciones sobre las barreras cortafuegos.

Dibujos contenidos en el gráfico 6.4. Parte 6 de la norma.

Tabla 3.22 Requisitos de las barreras corta fuegos.

Resistencia del elemento constructivo	Debe garantizar la continuidad de la resistencia al fuego del elemento dentro del cual está situada la barrera.
Sistema de fijación	La barrera deberá estar sujeta firmemente a la estructura fija del edificio mediante fijación mecánica. Se deberán usar materiales que permitan el movimiento de los elementos, debidos a hundimientos, cambios térmicos, cargas de viento o colapso de alguna parte del elemento.

3.7 Más allá de los códigos prescriptivos

A lo largo de este capítulo hemos visto que en el marco normativo existen diferentes enfoques para aproximarse al problema del incendio en la edificación. Se ha puesto de manifiesto que algunos requerimientos estipulados por las normas presentan limitaciones para abordar con solvencia la protección contra incendios en proyectos singulares. El conjunto de medidas que proponen las normas prescriptivas puede ser adecuado en proyectos convencionales, pero resulta insuficiente o difícil de adaptar a proyectos con cierta complejidad.

Los países con mayor desarrollo en este campo poseen un conjunto de medidas prescriptivas y funcionales que reflejan una preocupación por evolucionar al ritmo de los sistemas constructivos. De esta forma cubren diversas cuestiones derivadas del proyecto, bien sea en sus documentos básicos, o mediante información técnica complementaria. Aún así, su apuesta por el desarrollo e implementación del diseño basado en prestaciones es decidida, este concepto forma parte importante de su filosofía de SCI y ha ido configurando su propio campo profesional.

El enfoque basado en prestaciones se presenta como una respuesta desde la ingeniería de protección contra incendios capaz de cubrir los distintos retos planteados por cada proyecto, tratando adecuadamente los temas científicos y técnicos relacionados con el incendio y respetando las premisas del diseño del edificio.

3.7.1 Diseño basado en prestaciones

El diseño basado en prestaciones tiene una metodología bien establecida encaminada a diseñar estrategias de seguridad en cualquier entorno. Se basa en el planteamiento de unas metas concretas, unos objetivos de diseño a implementar, unos criterios de eficacia, unos escenarios de incendio y unos fuegos de diseño cuantificados.

Las metas son normalmente declaraciones de intenciones de alto nivel relacionadas con la seguridad de las personas, la protección de bienes, la interrupción de las operaciones, la protección del medio ambiente, o la protección del patrimonio histórico o artístico.

Los objetivos son declaraciones más detalladas que describen cómo las metas pueden ser alcanzadas, típicamente presentadas en términos funcionales o de ingeniería. Los

critérios de aceptación son parámetros que pueden ser estimados, medidos o calculados para demostrar el cumplimiento de los objetivos de diseño, por ejemplo: temperatura máxima, mínimo nivel de la capa de humos sobre el suelo, límites de visibilidad, límites de toxicidad, etc.

Los escenarios de incendio describen los posibles incendios que pueden desarrollarse, desde la ignición hasta la extinción, teniendo en cuenta las características de los combustibles, las características del edificio o el medio de transporte, los sistemas de protección contra incendios y las características de los ocupantes.

Los incendios de diseño cuantificados son las "cargas" utilizadas para evaluar, cualitativa y cuantitativamente, la eficacia de los sistemas de protección contra incendios y contrastarla con los criterios de aceptación fijados.

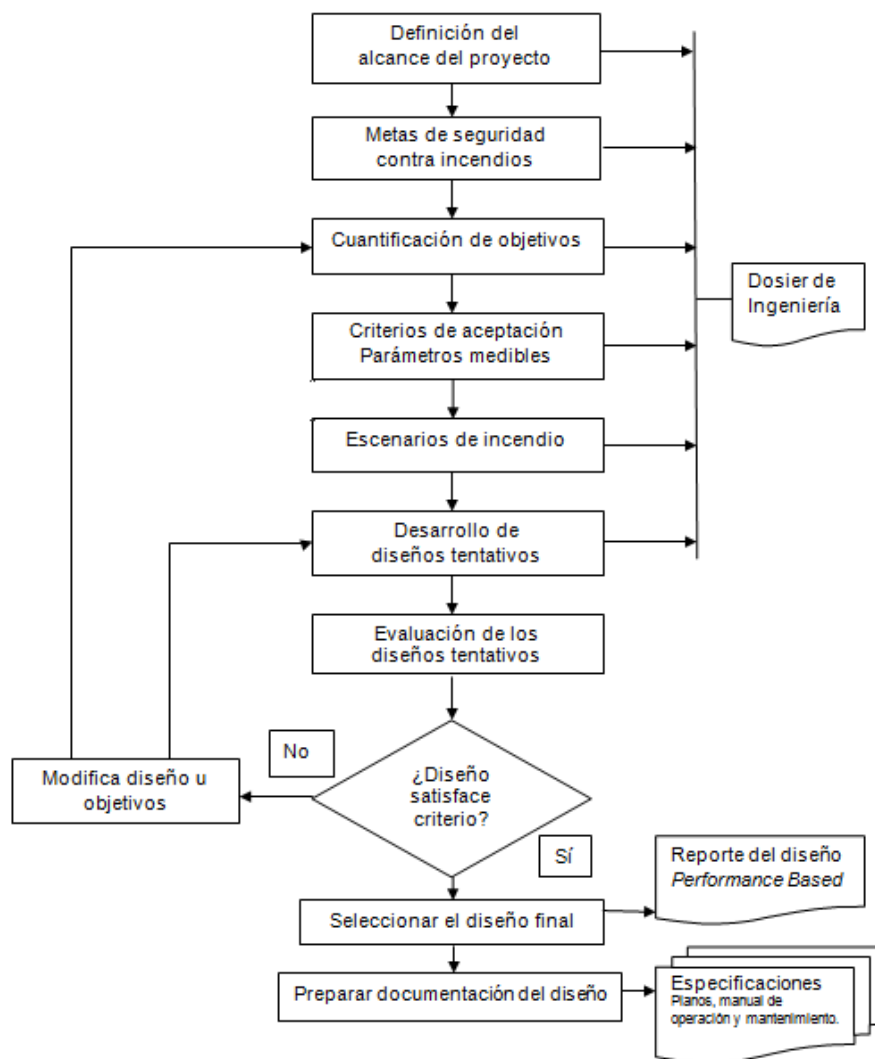


Fig. 3.43 Esquema de la aplicación del enfoque basado en prestaciones.
Fuente: elaboración propia basada en esquema de Tubbs – Meacham, 2007 (textos traducidos).

En general se percibe que un diseño basado en prestaciones puede significar mayores costes por el requerimiento de personal especializado, sin embargo, sin duda es económicamente menos viable destinar costes a una actividad que realmente no aporta seguridad pero que se aplica por cumplir los requerimientos establecidos por la normativa.

El uso de modelado y simulación computacional es cada vez más habitual en el desarrollo de este tipo de proyectos de seguridad contra incendio. La tecnología ha avanzado y con ella las técnicas de modelado y simulación, las cuales ofrecen cada vez una mejor aproximación al fenómeno del incendio. La simulación permite estudiar el problema de seguridad a resolver considerando distintos escenarios a un coste muy asumible. Es importante apuntar también que la obtención de resultados fiables a partir de estas técnicas precisa de un alto conocimiento no solo del programa informático, sino de los fenómenos físico-químicos asociados. El capítulo 5 de este documento se centra en precisar el alcance y funcionamiento de estas técnicas mediante las cuales es posible evaluar distintos aspectos del fenómeno del fuego.

3.7.2 Estrategias de protección contra incendios

El planteamiento de una estrategia de protección contra incendios consiste en definir el conjunto de medios requeridos para garantizar la seguridad de la edificación frente a los posibles riesgos a los que se enfrenta. Idealmente una estrategia de seguridad ha de ir precedida de un análisis de riesgos en el cual se determinan los potenciales peligros asociados al proyecto. Este tipo de análisis está emarcado en campos del conocimiento especializados y se puede desarrollar mediante diferentes métodos y enfoques. Profundizar en los fundamentos de estas técnicas no forma parte de los propósitos de esta investigación, pero si se considera importante saber su papel respecto a la seguridad de la edificación.

Marshall (1980) (citado por Tuhtar, 1990: 12) define el peligro como una situación física con potencial de afectación sobre el ser humano, mientras que el riesgo se puede definir como una evaluación cuantitativa de la frecuencia con que se presenta un peligro. Normalmente la metodología empleada para predecir el riesgo de fallo de un sistema (p. ej. un sistema de protección contra incendios) está basada en la construcción de un “árbol de fallos” con múltiples puertas “y” y “o” para la identificación de eventos peligrosos. Los diferentes enfoques empleados para evaluar el riesgo tendrán relación con el tipo de actividad que se desarrolla en la edificación. Los

peligros asociados a una industria suelen ser considerablemente distintos a los asociados a una edificación residencial, ya sea un hotel o una vivienda plurifamiliar.

Uno de los enfoques más aceptados en el planteamiento de estrategias de protección contra incendios es el desarrollado por el NFPA *Committee on System Concepts for Fire Protection in Structures* (Comité NFPA sobre conceptos sistémicos para la protección contra incendios en estructuras) Connelly y Harvey (1986) (citado por Tuhtar, 1990: 13). En éste se recomienda que el diseño del edificio incorpore la seguridad contra incendios como un subsistema más y al mismo nivel que los restantes subsistemas que actualmente se contemplan: estético, funcional, estructural, eléctrico y mecánico. El esquema organizativo del sistema está basado en un árbol de decisiones con la misma lógica y estructura que el árbol de fallos que describe los elementos e interrelaciones de la estrategia de seguridad. El árbol completo es complejo porque tiene muchas ramificaciones, sin embargo, la secuencia lógica de eventos a considerar para lograr objetivos predeterminados de seguridad contra incendios garantiza un elevado grado de protección cuando se evalúa en las etapas preliminares del diseño del edificio. La Fig. 3.44 muestra el árbol simplificado con las consideraciones principales de la estrategia de protección.

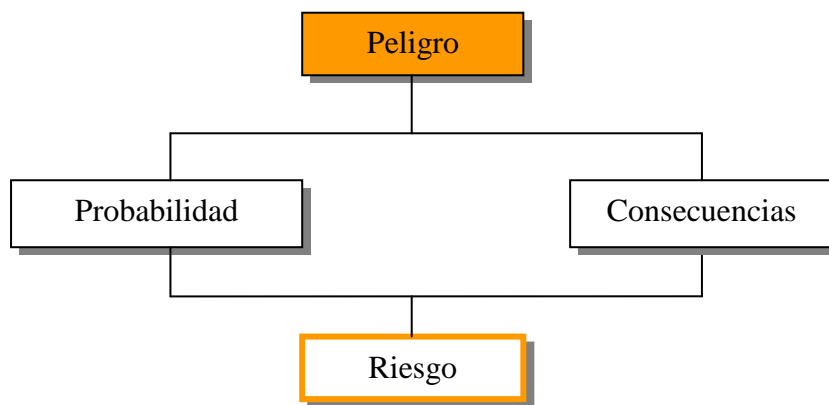


Fig. 3.44 Esquema que define un análisis de riesgos
Fuente: APICI (Asociación de Profesionales de Ingeniería de Protección Contra Incendios)

Las medidas y acciones definidas para brindar el adecuado nivel de protección deben evitar en primera instancia que el incendio tenga lugar, por tanto consisten en evitar situaciones de peligro. Si el incendio ocurre, los medios dispuestos deberán estar en capacidad de controlarlo el mayor tiempo posible evitando su propagación. Finalmente, si el control no es posible, se procede a abordarlo con los medios de extinción procurando su decrecimiento o supresión total. En una estrategia de protección se combinan convenientemente las medidas de protección activa y pasiva.

El criterio aplicado en el planteamiento de la estrategia define las prioridades en el uso de los medios de protección. El diseño basado en prestaciones viene a ser el instrumento por medio del cual se implementa una estrategia de protección contra incendios eficaz. Abordar el problema de la seguridad mediante un enfoque basado en prestaciones es sinónimo de diseñar aplicando técnicas de Ingeniería de Incendios en su sentido más amplio, es decir, diseñar aplicando fundamentos de la ingeniería tales como la termodinámica, la mecánica de fluidos, la química de la combustión, la hidráulica, el cálculo de estructuras, la estadística, el comportamiento humano, etc. En este proceso resulta fundamental el trabajo interdisciplinario, puesto que la implementación de las medidas de protección entra a formar parte integral del diseño del proyecto. La fachada de la edificación viene a ser una parte no menos importante que las otras en el conjunto de la estrategia de protección y por ello también tiene una función determinada dentro de ésta.

Uno de los esquemas más utilizados para definir estas estrategias se encuentra en la NFPA 550 - Guía para la Seguridad contra Incendios. Esta norma presenta sus estrategias en la forma de un árbol con un número de ramas que representan las estrategias individuales.

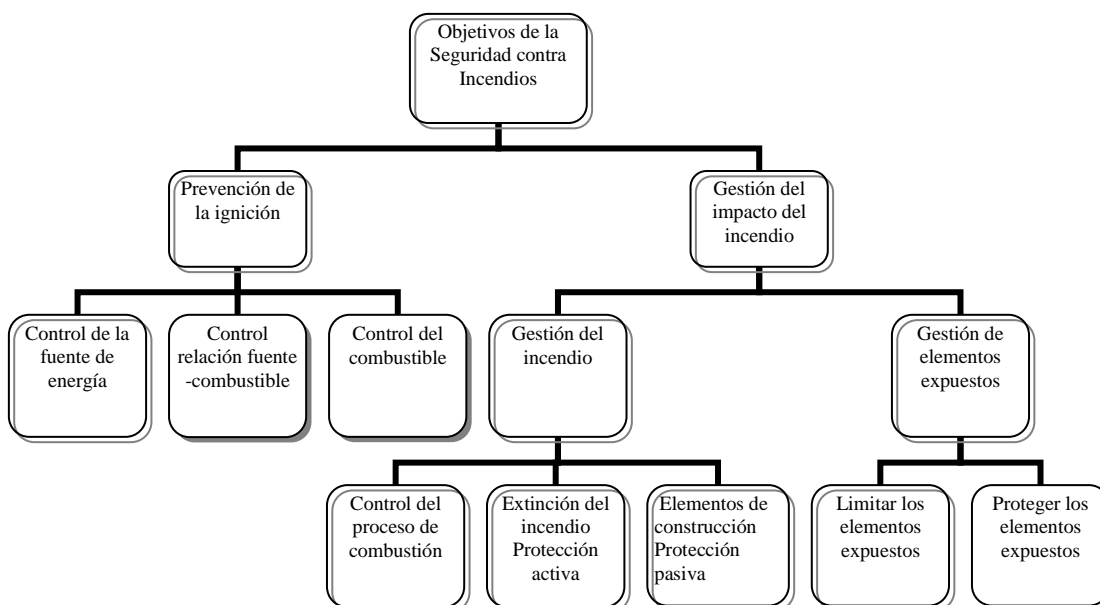


Fig. 3.45 Esquema que define una estrategia de protección
Fuente: Norma NFPA 550

La protección pasiva contra incendios comprende todos aquellos materiales, sistemas y técnicas, diseñados para prevenir la aparición de un incendio, impedir o retrasar su propagación, y facilitar, por último, su extinción. La protección activa comprende todo lo relacionado con la instalación y el mantenimiento de los sistemas de detección y alarma, supresión y control de incendios. El desarrollo de una estrategia óptima de

seguridad contra incendios comprende el planteamiento coordinado de los dos tipos de medidas de protección.

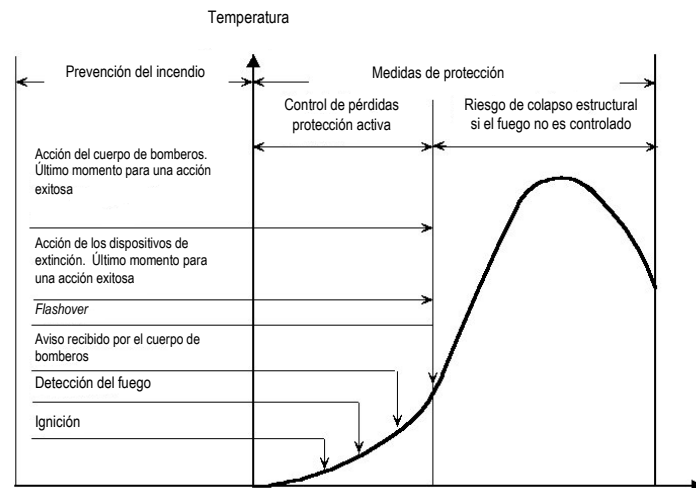


Fig. 3.46 Esquema de las medidas de prevención y control del incendio.
Fuente: Tubbs - Meacham, 2007 (textos traducidos).

Según la NFPA, un edificio se considera completamente protegido, con adecuada y completa resistencia al fuego, cuando la totalidad de su contenido soporta el incendio previsiblemente. Para que este propósito esté lo más cerca posible de la realidad es preciso que el análisis integral de la seguridad contra incendios del edificio forme parte del proceso de elaboración y diseño del proyecto arquitectónico y ha de ser considerado desde una estrategia global en la que se tienen en cuenta todos los segmentos del edificio. Dentro de esta estrategia global la fachada tendrá un papel determinado de acuerdo al análisis de riesgos que se efectúe.

3.8 Casos de estudio

A continuación se exponen los casos de cuatro edificios que ejemplifican la aplicación de estrategias de protección contra incendios para alcanzar un nivel de seguridad óptimo. Los tres primeros son edificios con un diseño de fachada singular el cual ha requerido de un conjunto de medidas de protección para garantizar su integridad y prevenir riesgos al resto de la edificación. El cuarto caso consiste en un edificio en el que se han aplicado las medidas de protección estipuladas por el CTE- DB SI2 en referencia a la franja resistente de 1 m como separación entre sectores de incendio de una planta a otra. Su particularidad radica en el diseño geométrico empleado para resolver, por un lado, la franja estipulada por la norma, y por otro, crear un elemento capaz de desviar la trayectoria del fuego en caso de propagación a través de la fachada. Éste último forma parte de los escenarios probados en la fase experimental de esta investigación y que se explica en el capítulo 6.

CASOS DE ESTUDIO



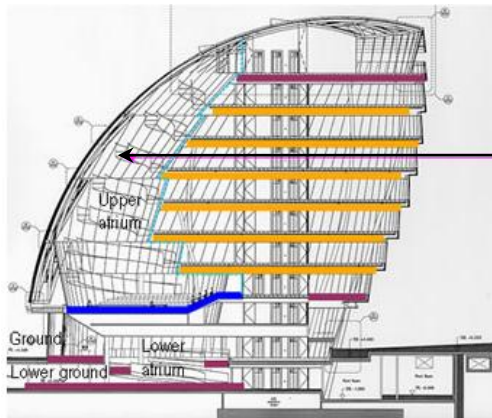
3.8.1 London City Hall



Localización: Londres
 Altura: 45 m
 Plantas: 10 (más un sótano)
 Arquitectos: Foster & Partners
 Año: 2002
 Tipo de fachada: Muro cortina
 Proyecto de SCI: Arup Fire
 Estrategia principal para la fachada: Diseño de ventilación natural (disipación térmica)



Fig. 3.47 Vista interior de la cámara de asambleas desde la rampa.
 Fuente: Foster&Partners
<http://www.fosterandpartners.com>



En el atrio se desarrolla una escalera en espiral que cuelga de la fachada y de cada placa de entresuelo.

Fig. 3.48 Sección del edificio.
 Se aprecian las zonas que componen el conjunto: el atrio, la zona de oficinas, las salas en la zona baja y el espacio de usos múltiples en la zona alta.
 Fuente: Arup Fire

Descripción general

El City Hall es un edificio de uso administrativo que alberga la oficina de la primera autoridad de Londres y su personal de apoyo. Cuenta con una cámara de asambleas para la GLA (*Greater London Authority*) y varias salas de reuniones. También es un edificio público con acceso general a dicha cámara, a zonas de reunión, espacios de exposición y una gran zona de usos múltiples ubicada en la planta superior del edificio. El conjunto cuenta con dos accesos, uno a nivel de la calle y otro subterráneo. La cámara es un espacio abierto con vistas al río Támesis que configura la base de un atrio que se eleva hasta el techo del edificio. A lo largo de dicho atrio se desarrolla una escalera en espiral que sirve a cada planta.

El City Hall es un edificio innovador en el que se han incorporado diversos principios de diseño para lograr un conjunto energéticamente eficiente. Su forma de esfera inclinada le ha convertido en un icono representativo de la ciudad. La envolvente de vidrio que la define es un aspecto fundamental en su diseño, el cual ha tenido como objetivo principal reducir la superficie de vidrio requerida para conformar su cerramiento. El interior está formado por un núcleo de hormigón que configura la caja de escaleras y ascensores, y sirve de soporte a los forjados de hormigón que conforman cada planta. Los grandes voladizos de los forjados se apoyan en sendas estructuras metálicas compuestas por jácenas y pilares metálicos que quedan a la vista.

Estrategia de protección contra incendios

Dada la singularidad de este proyecto la aplicación del enfoque basado en prestaciones ha sido una valiosa herramienta en el planteamiento de los distintos requerimientos de la edificación, y dentro de ellos las medidas de protección contra incendios como parte integral del proyecto. Arup desarrolla en este tipo de edificios singulares lo que denominan una estrategia holística, que equivale al concepto de diseño basado en prestaciones. Según este concepto todos los aspectos que conforman la edificación son vistos de forma global, de esta forma, se intenta sacar el máximo rendimiento en las distintas actividades partiendo del conocimiento de sus interrelaciones. En este caso la estrategia de protección contra incendios está muy relacionada con el diseño del sistema de ventilación natural que a su vez es fundamental en la estrategia energética del edificio.



Fig. 3.49 Vista del atrio y la rampa desde la cámara de asambleas.
Fuente: Arup Fire

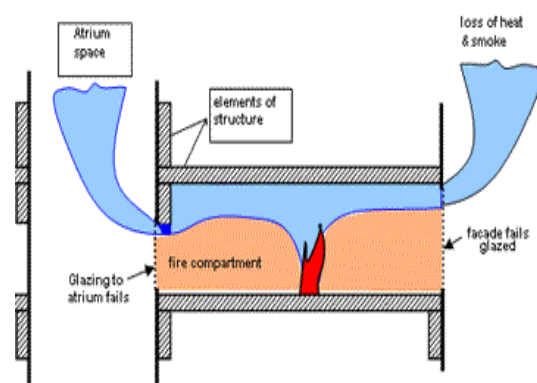


Fig. 3.50 Esquema de la ventilación natural en una situación de propagación vertical del fuego.
Fuente: Arup Fire

Los atrios son uno de los escenarios de incendio que requieren mayor atención dados los riesgos que suponen. Su configuración propicia el efecto chimenea, lo cual ayuda a una rápida propagación del fuego y circulación ascendente de los humos. Este efecto es más acusado cuanto mayor es la altura del atrio debido a que el volumen de humo producido aumenta por la presión. Las plantas superiores son las que sufren los peores efectos a causa de la acumulación de humos [Faller 2003].

En Inglaterra existe un código que trata de forma específica la seguridad contra incendios en edificios con atrios BS 5588-7:1997. Este código se basa en principios de ingeniería de protección contra incendios e identifica como su objetivo principal: proporcionar medidas "que aseguren que la incorporación de un atrio en un edificio no representa un riesgo añadido para la vida como consecuencia de la propagación del fuego y el humo". Aunque este documento trata de forma particular la problemática de los atrios aclara que los requerimientos previstos son de tipo orientativo, por tanto cada proyecto ha de ser estudiado tomando en consideración sus características concretas.

Como se ha dicho en el apartado anterior, los objetivos de seguridad planteados en un proyecto pueden ser alcanzados mediante una estrategia o conjunto de estrategias de protección. En muchas ocasiones existe una estrategia central, que gira en torno al aspecto que reviste mayor peligro, y distintas estrategias complementarias relacionadas con esta primera. A continuación se exponen las principales estrategias de protección planteadas para alcanzar un nivel de seguridad óptimo en este edificio.

- **Sistema de ventilación natural**

En edificios altos con atrio y cuyo cerramiento es una gran fachada de vidrio (no protegida), como es el caso del City Hall, la estrategia de protección principal suele estar definida por una adecuada disipación térmica y evacuación de los humos. Para este propósito se ha diseñado un sistema de ventilación natural capaz de limitar la temperatura de las capas de humo que se acumulan en el atrio. El sistema consta de unos dispositivos de apertura automática en la parte superior del atrio (Fig. 3.49) encargados de remover el humo y los gases tóxicos. En la zona baja del atrio se han dispuesto una serie de rejillas de ventilación que cumplen dos funciones diferentes:

(1) Suministran aire frío cuando los dispositivos superiores están abiertos creando una circulación de aire fresco en todo el volumen del atrio. Este mecanismo está calculado para limitar la temperatura del atrio y preservar su integridad durante un tiempo

indefinido suponiendo una velocidad de sesión de calor (HRR) hasta de 2,5 MW [O’Meagher – Ferguson 2004].

(2) Extraen los humos y gases calientes si el incendio se genera en la parte baja del edificio, evitando que estos invadan la zona alta del edificio.

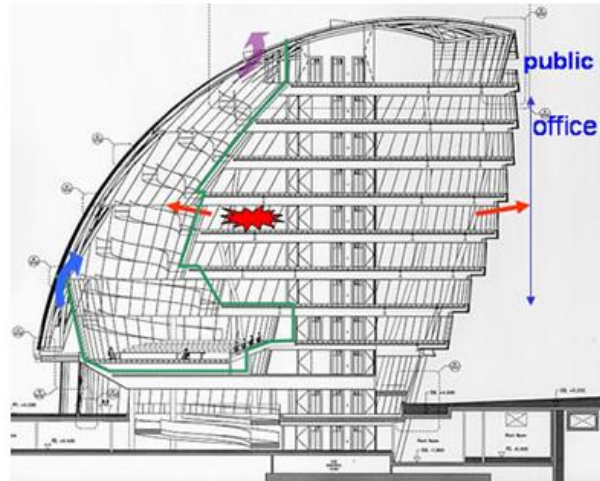


Fig. 3.51 Sección del edificio. Se pueden apreciar las zonas que componen el conjunto: el atrio, la zona de oficinas y las salas en la zona baja.

Fuente: Arup Fire

- **La envolvente del edificio**

Fachada norte

De acuerdo al documento B de la normativa británica los cerramientos de los sectores de incendio deben tener un porcentaje limitado de superficies no protegidas, el cual varía en función de la altura, superficie y uso del edificio. En ningún caso puede tener como cerramiento una superficie totalmente no protegida como ocurre es el caso del muro cortina que reviste el atrio en este edificio (Fig. 3.51). Esta condición puede ser modificada siempre que se justifique a través de una estrategia de protección. El sistema de ventilación diseñado, a través del cual se limita la temperatura del atrio, ha permitido justificar el uso de la fachada acristalada como elemento limitante del sector de incendio sin que fuera necesario incorporar resistencia frente al fuego a la fachada, mediante elementos como antepechos o franjas.



(A)



(B)

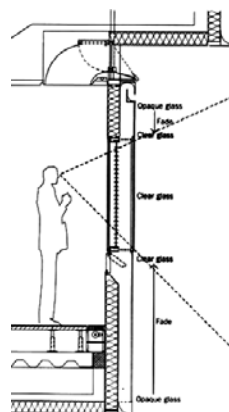
Fig. 3.52 Fachada norte (A) Vista diurna (B) Vista nocturna.
Se aprecia que la fachada del atrio es un muro cortina totalmente no protegido
Fuente: Foster&Partners

Fachadas sur, este y oeste

Las fachadas sur, este y oeste presentan un tratamiento distinto a la fachada norte. En este caso la fachada si forma parte de los elementos de compartimentación de los sectores de incendio, por tanto se han dispuesto paneles que conforman franjas de protección de 1,20 m. La razón de controlar el tamaño de las aperturas y por ende de las superficies no protegidas, no es solo el control de la propagación exterior del fuego, también se debe al control de la temperatura general en esta zona del edificio que recibe una exposición solar permanente. Por ello los paneles que forman las franjas tienen un revestimiento reflectante que controla la incidencia de los rayos del sol y a su vez mantienen la apariencia de un revestimiento acristalado, estos paneles con aislamiento están revestidos de una capa de vidrio (Fig. 3.53B) [Merkel 2003].



(A)



(B)

Fig. 3.53 Fachada sur
(A) Vista de los forjados generando voladizos sobre la fachada.
(B) Sección de la fachada sur.
Fuente: Arquitectura record

El cerramiento es un muro cortina solo que en esta parte de la fachada no es continuo, se trata de un muro cortina tipo panel. Los forjados se extienden hacia la fachada generando voladizos escalonados en cada planta hasta configurar la inclinación de 30° que caracteriza el edificio (Fig. 3.53A). El desplazamiento de los forjados da lugar a elementos salientes que funcionan como elementos de control solar y que en una situación de incendios pueden ser útiles para desviar la trayectoria de las llamas hacia el exterior (ver apartado 4.5).

- **La estructura del edificio**

En este tipo de edificios los requerimientos estipulados por la normativa (Documento B norma británica) en relación a la resistencia al fuego de los elementos estructurales son bastante conservadores. Lo cual se debe a los parámetros con los cuales son determinados. Tradicionalmente, las curvas de fuego nominales han sido desarrolladas para tener una referencia única y normalizada en los ensayos experimentales. Sin embargo, cuando se trata de dar una representación realista del desarrollo de un incendio, estas curvas proveen en la mayoría de los casos un resultado muy lejano de la realidad. En un recinto bien ventilado la duración y la intensidad del incendio es generalmente menor que la que determina la curva normalizada. La influencia de la ventilación y de la carga de fuego en la intensidad de los incendios se ilustra en la Fig. 3.54.

Debido a esto cuando se considera la seguridad de la edificación desde el enfoque basado en prestaciones se realiza un análisis del comportamiento de la estructura frente al fuego en el cual se tienen en cuenta un conjunto de factores que influyen en el comportamiento del incendio como son:

- La carga de fuego (tipo y cantidad).
- La geometría del recinto.
- Las propiedades térmicas de los materiales de superficies de acabados, si es que son aislantes o tienen inercia térmica.
- La ventilación natural del recinto.

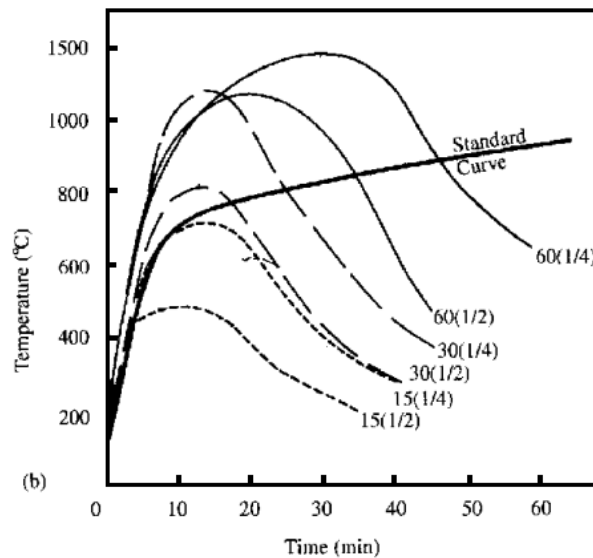


Fig. 3.54 Las curvas ilustran ensayos realizados bajo diferentes condiciones de carga de fuego y ventilación respecto a la curva normalizada.

Las densidades de carga de fuego kg/m^2 (15, 30, 60);
la proporción de apertura respecto a la fachada ($\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$).

Fuente: Arup Fire

En relación a este aspecto el sistema de ventilación vuelve a ser muy importante porque permite justificar una reducción importante del periodo de resistencia de los elementos estructurales frente al fuego, en este caso la reducción ha sido de 1 h, lo cual repercute favorablemente en: (1) reducción de costes de materiales, mano de obra y equipos (2) reducción de la sección de los elementos constructivos, lo cual es importante si se considera el transporte de elementos y ejecución de los trabajos. También ha sido posible justificar que los elementos estructurales metálicos sean vistos según lo expresado en el diseño. Para ello se ha protegido cada elemento estructural en todas sus caras expuestas con pintura intumescente dando un acabado de alta calidad.

- **Medios de evacuación del edificio**

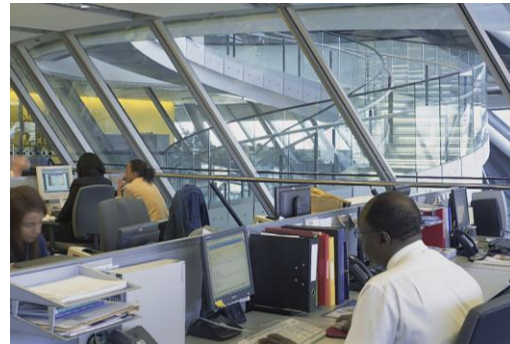
La estrategia de evacuación en un proyecto de estas características es un aspecto muy importante para alcanzar los objetivos de seguridad planteados. El plan de evacuación en este proyecto se ha realizado en colaboración con las autoridades de la edificación, de planeación de emergencias y el cuerpo de bomberos de la ciudad. Se han tenido en cuenta además de los temas técnicos, aspectos del comportamiento humano relacionados con la multiculturalidad de los ocupantes. Está previsto que las zonas públicas sean evacuadas simultáneamente, mientras que las oficinas dependen de un protocolo mediante el cual se determina el orden de evacuación según la

ubicación del foco del incendio. Hay dos escaleras de evacuación presurizadas a través de las cuales pueden evacuar hasta 300 personas a la vez. Junto a las escaleras hay un área de refugio en cada planta dotada de teléfono y de instrucciones sobre los protocolos de seguridad a seguir. El edificio está provisto de un ascensor para uso de los equipos de emergencia.

El control de la carga de fuego es una estrategia cada vez más empleada en edificios administrativos. En la actualidad se encuentran en el mercado diversas opciones de muebles con baja combustibilidad o con retardantes de llama. En este caso se ha limitado la densidad de carga de fuego de la sala de asambleas ubicada en la base del atrio (Fig. 3.55A).



(A)



(B)



(C)

Fig. 3.55 (A) Cámara de asambleas (B) Zona de oficinas (C) Zona pública. Se aprecian los rociadores automáticos en el falso techo.

Fuente: Inside City hall. www.london.gov.uk

Rociadores automáticos

Todas las zonas públicas y las oficinas cuentan con dotación de rociadores automáticos. Debido a esto es poco probable que un incendio crezca lo suficiente como para llegar al atrio. Gracias a ello ha sido posible emplear vidrio laminado común como separación de las oficinas y el atrio, en lugar de vidrio resistente al fuego, lo cual ha supuesto una reducción de costes en este concepto.

3.8.2 Parc de la recerca Biomèdica de Barcelona



Localización: Barcelona
 Altura: 32 m
 Superficie construida: 35.000 m²
 Plantas: 9 (más 3 sótanos)
 Tipo de fachada: Fachada de doble piel
 Arquitectos: Manel Brullet y Albert Pineda
 Año: 2007
 Proyecto de SCI Instalaciones: JG Ingenieros S.A.
 Estrategias de protección: Oficina Técnica de Bomberos de Barcelona.
 Estrategia principal para la fachada:
 Protección activa (rociadores tipo cortina).

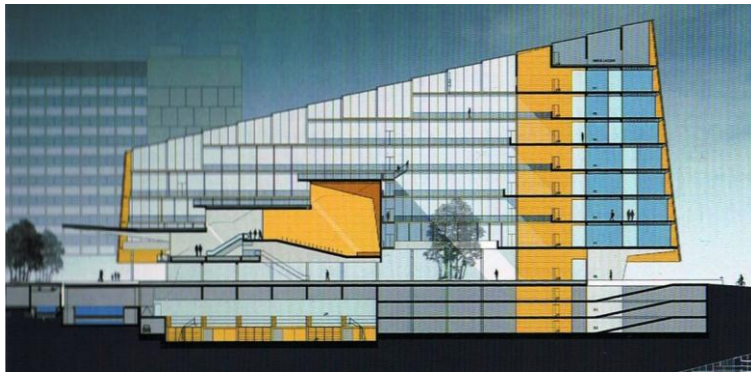


Fig. 3.56 Sección longitudinal del edificio.
 Fuente: Brullet – Pineda, 2007

Descripción general

El Parc de la Recerca Biomèdica de Barcelona (PRBB) es un edificio destinado a la investigación científica principalmente en las áreas de biomedicina y ciencias de la salud. Es el primer centro científico de alto nivel realizado en la ciudad de Barcelona.

Se trata de un edificio con una configuración en U y una forma troco-cónica y elíptica. Cuenta con despachos, laboratorios, áreas de investigación y diagnóstico, auditorio, polideportivo, piscinas para talasoterapia etc. Las zonas públicas están situadas en la planta baja y comprenden una cafetería, un restaurante y una plaza exterior que hace las veces de gran vestíbulo abierto.

El diseño del edificio responde al objetivo de crear un edificio singular, capaz de proyectar una imagen de levedad y fluidez, liberando la planta baja de soportes. Para

conseguir este efecto se decidió realizar una estructura basada en pantallas centrales, pilares metálicos y grandes jácenas en el perímetro superior del edificio de las cuales cuelga la estructura que sostiene los voladizos de los forjados.

Estrategia de protección contra incendios

El planteamiento del conjunto medidas que conforman la estrategia de protección contra incendios en este edificio estuvo presente desde la fase de proyecto. Su desarrollo fue el fruto de seis años de planificación y coordinación de actividades interdisciplinarias en las cuales la Oficina Técnica de Prevención de Los Bomberos de Barcelona tomó parte activa.

En este proyecto fueron tenidas en cuenta las medidas de protección contra incendios estipuladas por la normativa NBE CPI 96 y la OMCPÍ (Ordenanza Municipal de Condiciones de Protección Contra incendios de Barcelona), que eran las normas vigentes durante el desarrollo del proyecto. Dadas las características singulares del diseño del edificio fue necesario revisar algunos aspectos concretos e incorporar medidas de protección adicionales para garantizar un óptimo nivel de seguridad. En este sentido los retos más importantes del proyecto fueron el planteamiento estructural y el diseño de la fachada. La estrategia para abordar estos y otros aspectos de protección se basaron en la implementación conjunta de medidas de protección pasiva y activa. A continuación se mencionan algunos de los aspectos más relevantes abordados dentro de la estrategia de protección.

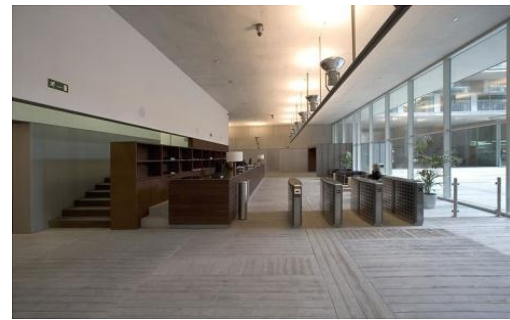
- **Medios de evacuación y sectorización**

Como se ha indicado antes, los requerimientos de protección contra incendios fueron tenidos en cuenta desde la fase de proyecto del edificio, por tanto forman parte del diseño del mismo de la edificación. Esto es especialmente favorable en el planteamiento de las medidas de protección pasiva, debido a su relación con el diseño y la distribución del edificio. Las rutas de evacuación son uno de estos aspectos que dependen en gran medida de la configuración del edificio. En su planificación se han de considerar, el ancho de los pasillos, su longitud, la incorporación de medios de protección para que las rutas sean seguras, la ubicación y características de las escaleras para que faciliten la evacuación etc. En el caso de este edificio la evacuación se resolvió mediante cinco escaleras protegidas con salida directa al exterior. El diseño de la planta baja integra el edificio con dos grandes zonas

exteriores, el claustro y la plaza de acceso, este planteamiento permite alcanzar rápidamente una zona exterior segura desde cualquiera de los puntos de evacuación.



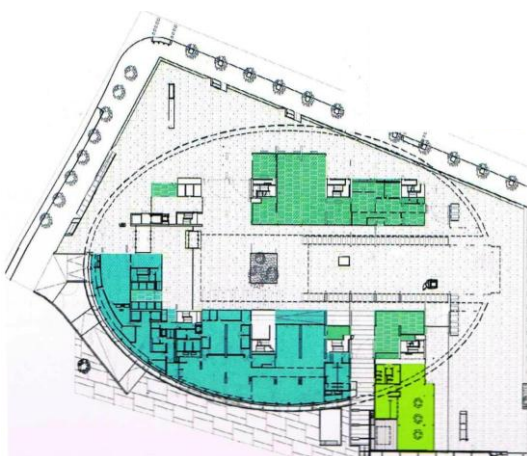
(A)



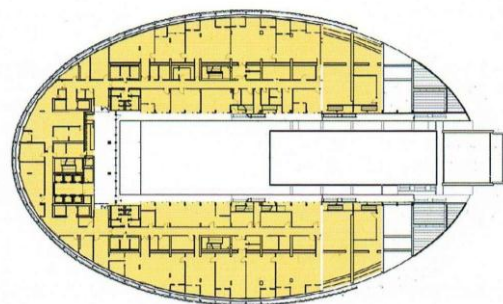
(B)

Fig. 3.57 (A) Vista general (B) Vestíbulo
Fuente: Brullet – Pineda, 2007

Una de las premisas planteadas en el diseño de las zonas de despachos era crear espacios flexibles, de manera que cada recinto pudiese ampliarse o dividirse según los requerimientos de cada grupo de investigación. Este objetivo no supuso mayor problema para la sectorización del edificio debido a que cada planta constituye un sector de incendios. Cada planta se ha provisto de instalación de rociadores automáticos. Según la normativa los sectores de incendio no deben superar los 2.500 m², y en promedio cada planta del edificio tiene una superficie útil de 3.500 m². Sin embargo, cuando un recinto dispone de rociadores automáticos su superficie puede ser hasta de 5.000 m². El único inconveniente para asegurar que el sector de incendio estaba debidamente compartimentado lo constituía la fachada del edificio, su diseño no permitía cumplir las condiciones establecidas, por tanto fue necesario plantear una estrategia de protección especial para garantizar que no representaba peligro.



(A)



(B)

Fig. 3.58 (A) Planta baja del edificio. (B) Planta sexta.
La distribución del edificio facilita el planteamiento de la evacuación y la sectorización.
Fuente: Brullet – Pineda, 2007

- **La fachada del edificio**

Se trata de una fachada de doble piel que consta de una piel interior de vidrio transparente situada entre forjados (muro cortina tipo panel), encargada de satisfacer la estanquidad, luminosidad y la ventilación natural; y una piel exterior formada por listones horizontales de madera de cedro rojo del pacífico, que proporciona protección solar y el aspecto estético del edificio (Fig. 3.60). La subestructura de la fachada es muy compleja. Está compuesta por elementos de acero que conforman una subestructura primaria y una secundaria. La subestructura primaria es a su vez el sistema de cuelgue que soporta los voladizos de cada forjado. Está compuesta por unas ménsulas HEB- 280 ó tetones de cuelgue ubicadas en cada forjado cada 3,60 m, y tirantes de tubo de acero de \varnothing 72 mm. La subestructura secundaria consta de unas anillas formadas por tramos de tubo de acero de \varnothing 14 cm que dan la forma elíptica a la piel, y unos montantes de acero verticales que van anclados a las anillas y sobre los cuales se fijan los listones de madera (Fig. 3.59).



Fig. 3.59 Detalle de tirantes exteriores, tetones exteriores de cuelgue de forjados y tetones superiores de cuelgue exterior.

Fuente: Brullet – Pineda, 2007

Desde el punto de vista de la seguridad contra incendios se trata de una fachada que constituye un enorme riesgo de propagación del fuego. Su peligrosidad está definida en primer lugar, por el efecto chimenea que puede ocurrir entre las dos pieles y en segundo lugar, por la gran carga de fuego que supone una superficie de 8.000 m² de listones de madera de pequeña escuadría y sin tratamiento ignífugo, lo que equivale a una clasificación de reacción al fuego muy desfavorable D-s2, d0. Teniendo en cuenta esta situación se planteó una estrategia de protección fundamentada en una medida de protección activa y apoyada por una medida de protección pasiva. La solución consiste en la instalación de un sistema de rociadores tipo cortina de agua dispuestos entre las dos pieles. Las bocas de cada rociador están dispuestas cada 3 m y en cada planta. La instalación se acciona mediante un sistema de detección que rodea el edificio que trabaja de forma coordinada con el sistema de rociadores automáticos del interior del edificio. De esta forma, un incendio que se produzca en el interior puede

ser extinguido por la red de rociadores ubicados en cada planta y en caso de que llegue a la fachada se activa el sistema de cortina de agua de la fachada. Para justificar esta propuesta la Oficina Técnica del Cuerpo de Bomberos de Barcelona exigió un ensayo a escala real en el que se pusiera a prueba el sistema de extinción en un prototipo de fachada a escala real (Fig. 3.61).

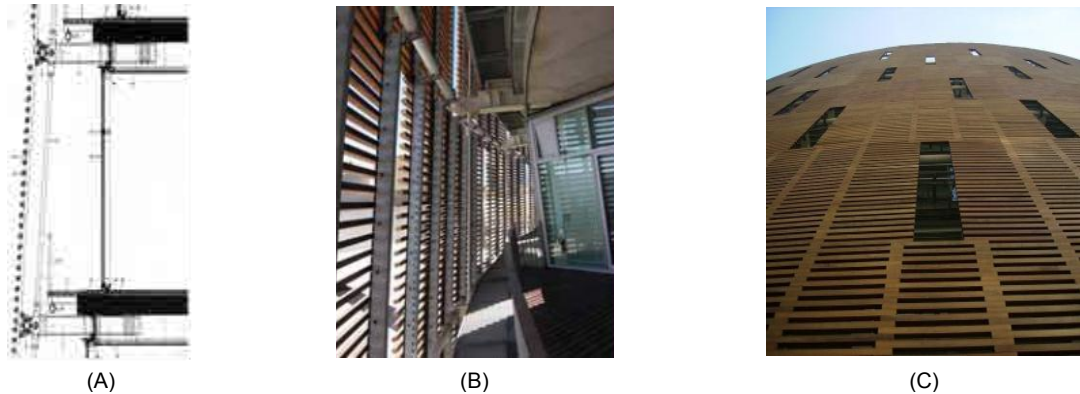


Fig. 3.60 Detalles de la fachada:
 (A) Sección (B) Imagen de la interfaz entre pieles de la fachada
 (C) Huecos para acceso de los bomberos.

Fuente: Brullet – Pineda, 2007

De forma complementaria se tomó una medida de protección pasiva protegiendo con pintura intumescente la subestructura primaria de la fachada, teniendo en cuenta su importante papel estructural en el conjunto del edificio. Así se garantiza una resistencia frente al fuego de 120 minutos. En la subestructura secundaria no se consideró necesario proteger con pinturas, de acuerdo a lo observado durante el ensayo. La acción de los rociadores impide que la temperatura ascienda por encima de los 200°C. Para facilitar la accesibilidad de los equipos de rescate y extinción se realizaron una serie de huecos en la fachada, aunque por temas de seguridad solo se exigía uno cada 25 m, por razones compositivas se realizaron cada 6 m. Sólo algunos tienen la marca característica del punto rojo exigida por los bomberos para señalar el punto de acceso para el personal de rescate.



Fig. 3.61 Imágenes del ensayo realizado para probar la efectividad del sistema de extinción.

Fuente: Brullet – Pineda, 2007

3.8.3 Edificio Mare Nostrum



Localización: Barcelona
 Superficie construida: 47.000 m²
 Sistema de fachada: Muro cortina
 Arquitectos: Enric Miralles
 Año: 2007
 Proyecto de SCI: Projectes S.A.
 Estrategia principal para la fachada: Protección activa
 (rociadores de ventana)



Torre
 Altura: 86 m (más 3 sótanos)
 Plantas: 21
 Longitud del voladizo: PB – 7 (ménsula 26m)

Portaaviones
 Altura: 41.20 m
 Plantas: 10
 Longitud del voladizo: PB – P9 30 -40 m

Fig. 3.62 Vista exterior del conjunto.
 Fuente: P. Giraldo, 2009

Descripción general

Es la sede del grupo Gas Natural, por su diseño singular se ha ido constituyendo en un símbolo de la ciudad. La estructura principal está compuesta por unos núcleos de hormigón donde se apoya una estructura metálica, la fachada es en su totalidad un muro cortina. El edificio cuenta con un avanzado sistema de instalaciones: climatización VRV, sistemas de BT y MT, redes de telecomunicaciones, gestión técnica, sistemas de seguridad y CCTV, redes de agua potable, detección y extinción de incendios. El conjunto arquitectónico está formado por dos edificios llamados: la torre y el portaaviones. Estos se conectan en las plantas octava y novena mediante un puente que se prolonga en vertical por encima del portaaviones hasta la planta 12.

La torre

Se trata de un edificio con distribución vertical cuya característica singular, además de su altura, es que dispone de un apéndice en voladizo que va creciendo desde la planta baja hasta llegar a la planta siete donde alcanza su longitud máxima.

El portaaviones

Se trata de un edificio con distribución horizontal cuya característica singular, además de su particular forma, es que desde las plantas quinta a novena la mitad del edificio está completamente en voladizo.

Estrategia de protección contra incendios:

El edificio Mare Nostrum puede considerarse uno de los edificios mejor provisto en cuanto a medidas de protección activa y pasiva contra incendios en la ciudad de Barcelona. La estrategia de seguridad del proyecto se ha diseñado con un amplio margen por encima de los mínimos aceptables, por tanto las medidas aplicadas superan en muchos aspectos las estipuladas por el CTE. El edificio está provisto de sofisticados equipos de detección, alarma y extinción. Cuenta con un protocolo de evacuación simultánea con ruta a través de escaleras presurizadas ubicadas en cada bloque del edificio. Cuenta con dotación general de rociadores automáticos, zonas de refugio con cierre automático de puertas y teléfono (Fig. 3.63). En caso de emergencia tiene un ascensor especial presurizado para el personal de bomberos, tomas de columna seca en cada planta, equipos de comunicación por megafonía, BIES de 25 (mangueras) extintores de polvo seco y de CO₂ etc.

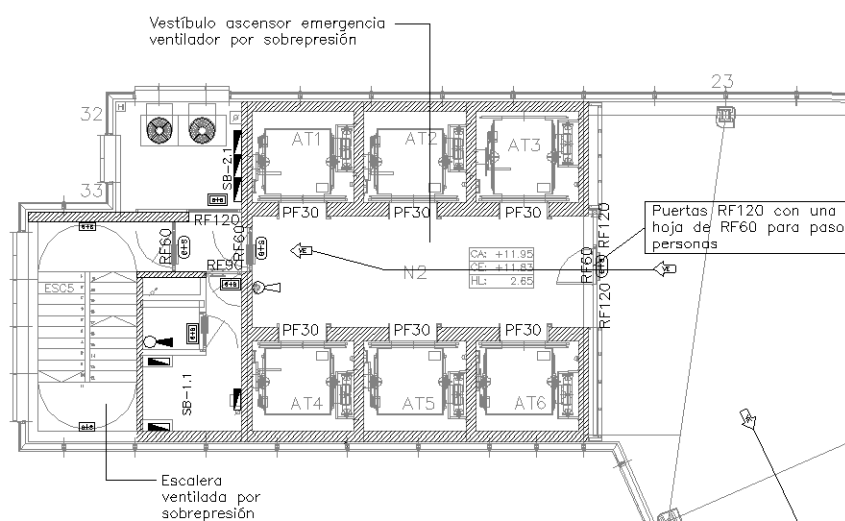


Fig. 3.63 Vista en planta de la zona de refugio.
Fuente: Projectes S.A

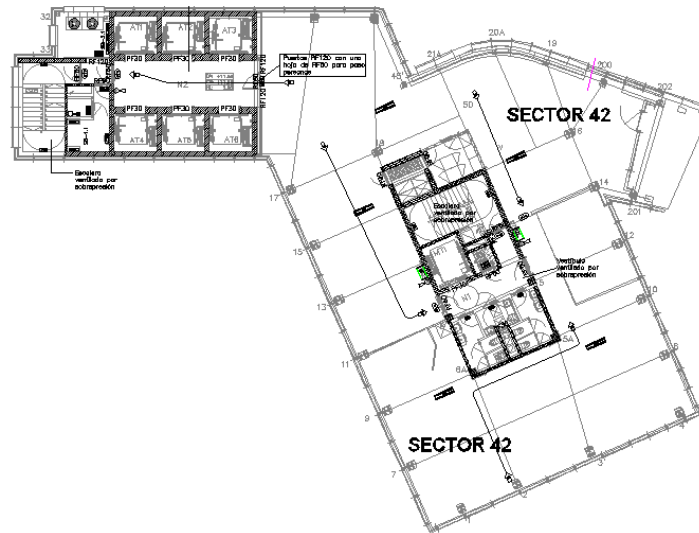


Fig. 3.64 Distribución de los sectores de incendio.
Fuente: Projectes S.A

- **La fachada del edificio**

La fachada de este edificio es la primera de tipología de muro cortina en la ciudad de Barcelona que no justifica ante la oficina técnica de bomberos su estabilidad frente al fuego mediante una franja resistente de 1 m; por tanto la separación entre plantas es solamente la altura del forjado, es decir, 50 cm. Mediante este planteamiento se asume que la fachada es un elemento débil frente al fuego, por tanto no se pretende reforzar o mejorar con medidas de protección pasiva esta condición. Como contrapartida se propone incorporar una medida de protección activa que garantice la estabilidad de la fachada los 120 minutos que determina la normativa para edificios de esta altura. La medida implementada consiste en la instalación de rociadores de ventana ubicados cada 1,50 m en el perímetro de las fachadas de cada planta a partir 23 m de altura (Fig. 3.65). Para la aprobación de esta propuesta la oficina de bomberos de Barcelona solicitó un ensayo que certificara la eficiencia de la medida. El ensayo fue realizado en un laboratorio de EEUU el cual emitió la certificación de resistencia de 120 minutos.

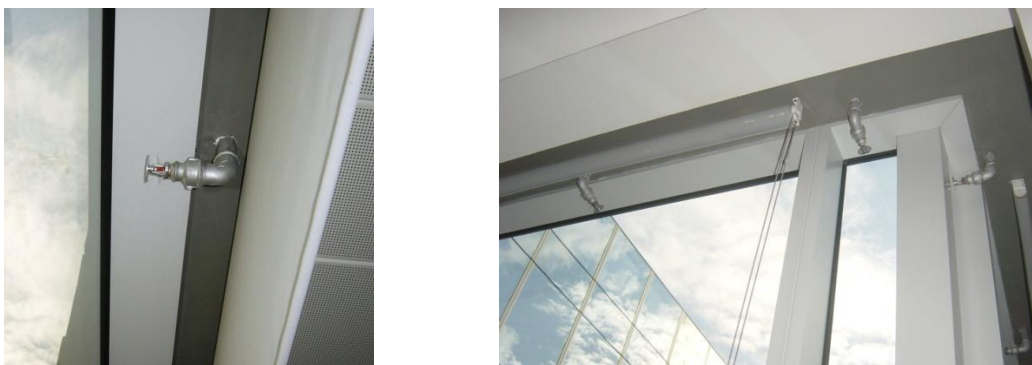


Fig. 3.65 Rociadores de ventana situados cada 1,50 m.
Fuente: Projectes S.A.

3.8.4 Edificio Génova



Localización: Madrid
 Altura: 21 m
 Plantas: 7
 Sistema de fachada: Muro cortina
 Arquitectos: Estudio Lamela
 Año: 2003
 Superficie construida: 19.000 m²
 Ingeniería de fachadas: Xavier Ferrés
 Estrategia principal para la fachada: Franja de 1 m estipulada por la normativa.

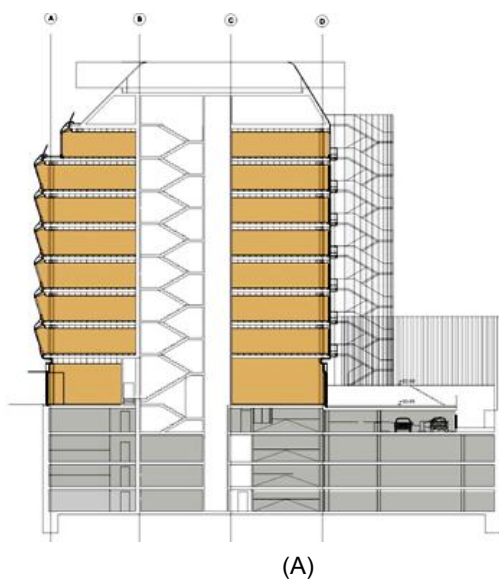


Fig. 3.66 (A) Sección del edificio (B) Modelo 3D de la reforma del edificio.
 Fuente: Lamela arquitectos

Descripción general

Se trata de la reforma integral de un edificio construido en 1973. La fachada en el proyecto original, en plena crisis del petróleo, buscaba la “climatización natural y autoprotección”, lo que se plasmó en la inclinación de los vidrios buscando el mayor control solar posible. Se prestó especial atención a los aspectos medioambientales, logrando un significativo ahorro de energía y control de la radiación lumínica. La idea de la reforma era en primer lugar cambiar la proporción hueco-vano manteniendo el mismo concepto del control solar y cambiando el tono de color del vidrio.

Estrategia de protección contra incendios

El proyecto se ciñe a los requerimientos de la normativa entonces vigente, la CPI 96. La fachada del edificio no es la excepción, por tanto la medida de protección aplicada se basa en la incorporación de la franja resistente de 1 m exigida por la normativa. Lo interesante en este caso es que se realiza analizando la problemática que se debe resolver, es decir, la propagación exterior del fuego y se procede en consecuencia. El resultado es un juego geométrico que no solo permite cumplir con lo estipulado por la normativa, en relación a las franjas resistentes, sino que además convierte la propia forma de la fachada en un elemento capaz de cambiar la trayectoria del fuego, evitando o minimizando la propagación vertical del incendio. La geometría de esta fachada forma parte de los casos estudiados en la fase experimental de esta investigación, se pueden apreciar los resultados en el apartado 6.5.1.

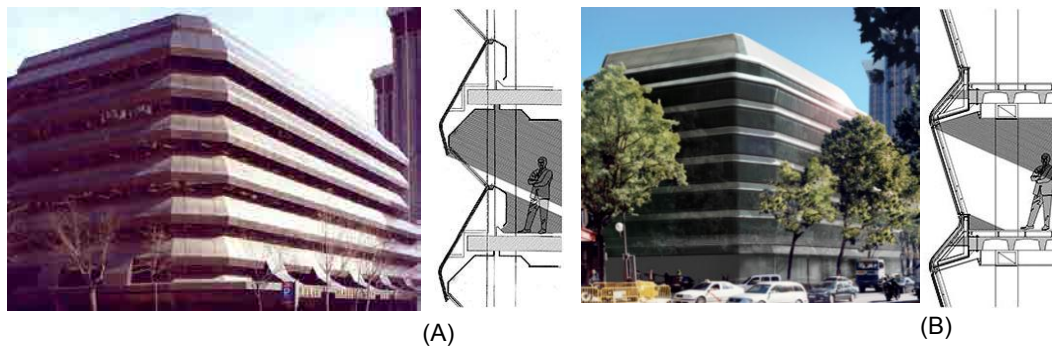


Fig. 3.67 Imágenes y secciones de la fachada. (A) Edificio original (B) Edificio reformado.

Fuente: Lamela arquitectos

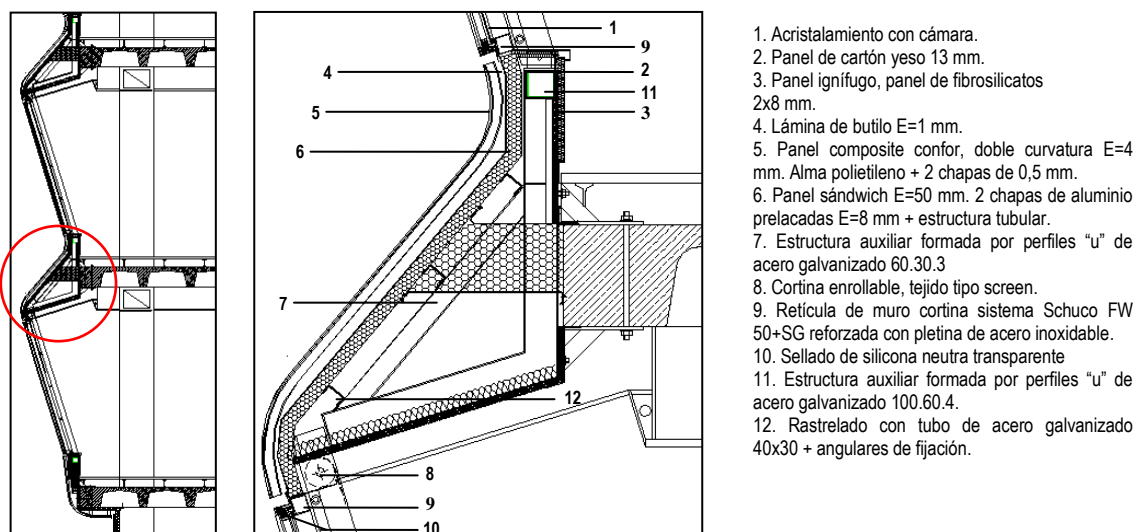


Fig. 3.68 Detalle de la fachada

Fuente: Arq. Xavier Ferrés. Ferrés Arquitectos

3.9 Conclusiones parciales

En este capítulo se ha realizado una exploración del contexto normativo de protección contra incendios en diferentes países centrada en los aspectos relacionados con el control de la propagación exterior del fuego. El propósito ha sido determinar la situación de la normativa española respecto a la de otros países de Europa y también respecto a un grupo de países considerados líderes a nivel mundial en materia de seguridad contra incendios, entre los que están EEUU, Reino Unido y Nueva Zelanda.

Al inicio del capítulo se ha hecho un repaso de la evolución de la normativa española hasta el actual CTE. De acuerdo a ello se ha podido establecer que en relación a las medidas para el control de la propagación exterior del fuego no se ha avanzado desde el año 1996. El CTE no presenta cambios sustanciales respecto a las medidas contempladas por la NBE CPI 96, 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 hacia fachadas activas, fachadas multifunción, con paneles para acumular energía solar o con dispositivos para el control lumínico, térmico, de ventilación, etc.

Uno de los aspectos más discutibles es la franja de 1 m exigida por la norma como única medida de control de la propagación vertical del fuego. El problema no radica en la franja en sí misma, pues es evidente que la propagación del fuego a través de las fachadas sería más destructiva si no existiera; se trata del planteamiento generalizado que hace la norma de ésta. Lo que significa que toda fachada, ya sea un muro cortina, una fachada de doble piel, ventilada o convencional debe cumplir esta exigencia.

Se percibe un vacío generalizado de pautas y orientaciones respecto a las medidas de protección a adoptar en las fachadas, el cual se hace más evidente en las tipologías de fachada ligera y muros cortina. Esta situación traslada una enorme responsabilidad a los profesionales e industriales involucrados en los proyectos, lo cual se considera que puede dar lugar, en determinadas situaciones, a una inadecuada definición de los requerimientos de protección contra incendios.

En el documento básico SI sección 1 se encuentra la única referencia que hace la norma sobre las fachadas ventiladas. Se trata de un breve comentario sobre la compartimentación de las cámaras ventiladas que no aporta información suficiente para prevenir el riesgo de propagación vertical del fuego a través de este elemento.

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. Esto supone una ausencia de parámetros de protección para una tipología con un riesgo de propagación potencialmente elevado.

En cierta medida la situación de los muros cortina ha cambiado desde el año 2003 con la entrada en vigor de la UNE EN 13830:2004 y la obligatoriedad del marcado CE para los muros cortina. Sin embargo, estas disposiciones solo 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 priman los requisitos establecidos por la normativa nacional, es decir, la franja de protección de 1 m. Las normas de ensayo exigidas para comprobar la resistencia al fuego del sistema y obtener la marca CE son la UNE-EN 1364-3:2008 y la UNE-EN 1364-4:2008. Cabe decir que estos ensayos se realizan en laboratorios en condiciones muy diferentes a las que se puede ver sometida una fachada en una situación de incendio real.

Otro aspecto importante relacionado con las condiciones de ensayo de los productos son las pruebas que se realizan para clasificar los materiales de fachada. En la actualidad en el conjunto de la Unión Europea no se cuenta con un escenario de referencia para probar los elementos de fachada. El Comité Europeo de Normalización (CEN) estableció cinco ensayos para cuantificar los parámetros establecidos por las Euroclases de reacción al fuego y determinar el comportamiento de los materiales. Ninguno de estos ensayos considera la situación real a la que queda expuesto un elemento de fachada.

En referencia a las normas de los países europeos considerados (Alemania, Dinamarca, Bélgica, Francia, Holanda, Reino Unido (Inglaterra y Gales), Suecia y Noruega) se percibe una gran dispersión en las medidas y requerimientos exigidos en cada contexto. En el tema de la seguridad contra incendios, más que en otros aspectos relacionados con la edificación, existen distintos reglamentos y normas locales que configuran un panorama legislativo difícil de comparar. Las diferencias sociales, culturales y las diversas formas de construir y entender la seguridad en la edificación explican en gran parte esta situación. 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. En general, los países con un mayor desarrollo en la aplicación del enfoque basado en prestaciones también tienen un conjunto de normas prescriptivas muy amplio y detallado. 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.

El Comité Europeo de Normalización (CEN) ha venido trabajando durante varios años en la construcción de un marco común europeo a través de iniciativas como: el establecimiento de las euroclases de reacción y resistencia al fuego (reguladas por la Directiva de Productos de la Construcción DPC), la incorporación gradual de los eurocódigos estructurales, la unificación de la certificación energética como requisito exigible a las edificaciones, entre otros. Aunque se trata de un proceso lento que se encuentra en una fase preliminar se vislumbra como una oportunidad para el desarrollo de mejores normativas comunes, fruto de la investigación colaborativa y la transferencia de conocimiento entre países. Se considera que esta situación debería ser aprovechada por los países cuyas normas presentan lagunas en algunos aspectos, como es el caso de la normativa española.

En este estudio las normas de PCI de EEUU, Reino Unido y Nueva Zelanda se han tomado como modelo por ser consideradas de referencia a nivel mundial. En estos países han desarrollado un conjunto de normas con dos enfoques distintos: uno prescriptivo o funcional y otro prestacional. El primero está destinado a resolver de la forma más amplia y clara posible la problemática de los incendios en edificaciones convencionales y el segundo permite abordar los retos específicos que plantean los proyectos singulares. Los tres países tienen un conjunto de normas prescriptivas (EE UU) y funcionales (Inglaterra y Nueva Zelanda) que consideran un amplio número de aspectos sobre la protección de las fachadas en distintos escenarios. Las normativas 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. Las normas de Reino Unido y Nueva Zelanda tocan algunos temas importantes sobre las fachadas ligeras y remiten al usuario a diferentes guías técnicas sobre temas

específicos. La norma de EEUU en su código de la construcción 5000 trata de forma específica el tema de los sellos cortafuegos de los muros cortina. En contraste con las normas de estos países se puede considerar que el CTE cubre de forma exigua los aspectos relacionados con la protección exterior del fuego. La poca información que aporta la normativa en este ámbito da lugar a la libre interpretación de las disposiciones. Ello hace difícil establecer el grado de seguridad que se alcanza mediante las medidas exigidas para diferentes casos. En este contexto, 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. Una manera de abordar con más detalle la problemática sería vincular al CTE documentación técnica de apoyo como hace por ejemplo la norma británica. Ello permite resolver con solvencia diversos aspectos particulares de la PCI en distintas tipologías de fachadas que no están incluidos en los documentos básicos de las normas.

También cabe destacar la importancia que se da en estos países a la aplicación del enfoque basado en prestaciones o PBD (*Performance Based Design*). La práctica de este concepto, debido a las diversas variables técnicas que comporta, requiere de la intervención de expertos en ingeniería de protección contra incendios y también de un alto grado de trabajo interdisciplinario coordinado desde la fase de diseño del edificio. Se considera que el PBD es el método idóneo para abordar proyectos complejos. Gracias a su aplicación es posible alcanzar un alto nivel de seguridad contra incendios en edificios con un evidente riesgo asociado a la vulnerabilidad de su cerramiento, según se ha podido ver en los casos de estudio considerados. El desarrollo de códigos prestacionales en estos países punteros se ha consolidado como parte de una cultura de la seguridad contra incendios. Alcanzar tal logro demanda 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.

La entrada en vigor del CTE en el año 2005 ha marcado un cambio importante en la legislación española que ha servido para entrar en sintonía con el resto de Europa. El punto más relevante ha sido permitir la armonización del mercado de productos de la construcción. También ha posibilitado una lectura alternativa a las normas prescriptivas mediante el enfoque basado en prestaciones. Sin embargo, esto no es una garantía de que se esté caminando en la dirección deseada.

La reflexión que cabe hacer es que el problema del incendio en España no ha tomado la dimensión que merece. La sociedad lo percibe como un tema poco relevante por tratarse de un hecho eventual que se intuye como remoto. Este desinterés social se traduce en un desinterés por parte del legislador.

La dispersión administrativa también es un 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 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. En este sentido, cabe resaltar la publicación del documento “Víctimas de incendios en España 2010” realizada por la Asociación Profesional de Técnicos de Bomberos (APTB) y el apoyo de la Fundación MAPFRE, se trata de la primera publicación realizada en España de estas características. Otro aspecto relacionado con el tema de la cultura de la seguridad es el reconocimiento de los profesionales especialistas en protección contra incendios. España es uno de los países en los que no se encuentra regulada la profesión de ingeniero de protección de incendios. Por el momento no se dispone de universidades que impartan este currículo profesional. Sin personal cualificado en las distintas áreas de actuación es difícil conseguir que los niveles de seguridad contra incendios mejoren de forma sensible en una sociedad. La intervención de los ingenieros de PCI en un grupo multidisciplinar de profesionales es fundamental para definir las estrategias de protección de las edificaciones desde la fase de proyecto.

Consideramos que ha sido de utilidad la observación y comprensión de los conceptos y normas en torno a la seguridad de estos países para abordar el objetivo de este capítulo.

Bibliografía:

[Bento 2010] M. Bento Fernández, Los sistemas de cerramiento de fachadas ventiladas y el CTE, ConArquitectura nº 35, pp.73-83, julio 2010.

[Bukowski 1995] R. W. Bukowski, International Activities for Developing performance-based Fire Codes, Building an Fire Research Laboratory, NIST. Mini-Symposium Building Research Institute, Tsukuba, Japan, 12 junio, 1995.

[Bukowski 1996] R. W. Bukowski, Fire Risk or Fire Hazard as the Basis for Building Fire Safety Performance Evaluation. Institut de Securite. Fire Safety Conference on Performance Based Concepts. Proceedings. Zurich, Switzerland, October 15-17, 1996.

[Bukowski – Babrauskas 1994] R. W. Bukowski; V. Babrauskas, Developing Rational, Performance-based Fire Safety Requirements in Model Building Codes, Fire and Materials, 18, pp.173-191, 1994.

[Brullet – Pineda 2007] M. Brullet; A. Pineda, A. De Luna, Parc de la Recerca Biomèdica de Barcelona, Edicions de l'Eixample, 2007, ISBN 8486279542.

[Capote 2001] J. A. Capote, La Seguridad Contra Incendios en la Concepción y el Diseño de los Edificios Civiles e Industriales, Universidad de Cantabria, pp.6, 2001. <http://grupos.unican.es/gidai/web/asignaturas/ISCIE/SCI%20EN%20EDIF%2001.pdf>.

[Cote – Bugbee 1993] A. Cote, P. Bugbee, Principios de Protección contra Incendios, National Fire Protection Association, Cepreven, Madrid, pp.3, 1993.

[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.

[Faller 2003] G. Faller, Seguridad contra incendios en edificios con atrio, Informes de la construcción Vol 55 Nº 285, mayo-junio 2003.

[Fernández 2009] R. Fernández, Desarrollo de las normas de incendio en España, Texto de la revista Cercha nº 99, Madrid, España, pp.56-62, abril 2009.

[Fitzgerald 2004] R. W. Fitzgerald, Building fire performance Analysis; John Eiley & Sons, Ltd. London, 2004.

[Larrea et al. 2011] J. Larrea, V. Malagón, I. Bezos, A. Buriticá, et al. Víctimas de incendios en España 2010, Asociación de Profesional del Técnicos de Bomberos (APTB), Fundación Mapfre, 2011.

[Machado 2008] R. Machado, Prescriptive codes Vs. Performance-Based codes: Which one is the best fire safety code for the Brazilian context? Safety Science Monitor; Vol 12, Article 3, 2008.

[Martin – Loncour 2004] Y. Martin, Xavier Loncour, Les Doubles Façades Ventiées, exigences en matière de sécurité incendie, Centre Scientifique & Technique de la construction, Belgique, 2004.

[Merk – Winter 2010] M. Merk, S. Winter, Fire safety constructions of multi-storey wooden facades using biogenic materials up to eight storeys, Technical University or Munich, World Conference Timber Engineering, 2010.

[Merkel 2003] J. Merkel, City Hall, London, England, Architectural Record, p.114 febrero 2003.

[Morgan 1999] H.P. Morgan, Moves Towards Performance-Based Standards In The U.K. And In The European Committee For Standardisation, (Cen) International Journal on Engineering Performance-Based Fire Codes, Volume 1, Number 3, p.98-103, 1999.

[Moss 1990] A.G. Moss, Facade Fire Spread in Multi-storey Buildings, Study Report N° 32; BRANZ The Resource Centre for Building Excellence, New Zealand, 1990.

[NFPA 1991] Manual de protección contra incendios. Introducción a Confinamiento del fuego en edificios. Sección 6 Capítulo 6, J. A. Campbell, NFPA, 1991. ISBN 8471006456.

[O’Meagher – Ferguson 2004] T.O’Meagher ; A. Ferguson, Fire engineering on the GLA (Greater London Authority) Building (London City Hall), ARUP Fire recurso on line: <http://www.mace.manchester.ac.uk/project/research/structures/strucfire/CaseStudy/steelComposite/default.htm>.

[Pedro et al. 2010] J. B Pedro, F. Meijer, H. Visscher, Technical building regulations in EU countries: a comparison of their organization and formulation; CIB World Building Congress 2010.

[Sheridan et al. 2003a] L. Sheridan, Dr. Ir H.J Visscher, Dr. F.M. Meijer, Building Regulations on Fire Safety In Europe, Proceedings of the CIB-CTUH International Conference on Tall Buildings, Malasia, 8-10 Mayo 2003.

[Sheridan et al. 2003b] L. Sheridan, H. J. Visscher, F. M. Meijer and Bos, Building regulations in Europe part 2, A comparison of technical requirements in eight European Countries, Delft University Press, Delft, 2003.

[Stollard – Abrahams 1991] P. Stollard, J. Abrahams, Fire from first principles: a design guide to building fire safety, editor E. & F.N. Spon, London, 1991, ISBN 0442313233.

[Thomas – Archambault 2005] L. Thomas, G. Archambault, Sécurité Incendie, Arcelor, Luxembourg, 2005.

[Tubbs - Meacham 2007] J. Tubbs, B. Meacham, Egress Design Solutions: A Guide to Evacuation and Crowd Management Planning, Arup. John Wiley & Sons, INC. EEUU, 2007.

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

[Waldner et al. 2007] R. Waldner, G. Flamant, S. Prieus, H. Erhorn-kluttig et al, Bestfacade: Best Practice for Double Skin Façade, Intelligent Energy Europe, 2007.

Normas:

España:

Ministerio de Vivienda. Código Técnico de la Edificación (CTE). Documento Básico de seguridad en caso de incendios (SI). Secciones 1, 2 y 4. Texto modificado por RD 1371/2007, de 19 de octubre (BOE 23/10/2007) y corrección de errores (BOE 25/01/2008).

Estados Unidos:

National Fire Protection Association. Norma 101 Live Safety Code. NFPA, 1 Batterymarch Park, Quincy, MA, EEUU, 2003 edition.

National Fire Protection Association. Norma 5000 Building Construction and Safety Code. NFPA, 1 Batterymarch Park, Quincy, MA, EEUU, 2006 edition.

National Fire Protection Association. Norma 80 Standard for Fire Doors and Other Opening Protectives, NFPA, 1 Batterymarch Park, Quincy, MA, EEUU, 1999 edition.

National Fire Protection Association. Norma 80A Recommended Practice for Protection of Buildings from Exterior Fire Exposures. the Technical Committee on Exposure Fire Protection and acted on by NFPA at its May Association Technical Meeting held in Anaheim, CA, May 13–17, 2001.

Nueva Zelanda:

Department of Building and Housing. Compliance Document for New Zealand building Code, Fire Safety, Clauses C1,C2, C3, C4. PO Box 11-846, Wellington, 2005.

Reino Unido:

Office of the Deputy Prime Minister, The Building Regulations 2000, Approved Document B Fire Safety, B4 External fire spread, amendment 2006.

Unión Europea:

European Standard Eurocódigo 1: Actions on structures EN 1991 part 1-2:2002. General actions – Actios on structures exposed to fire.

Notas:

¹ La NFPA (National Fire Protection Association) es una organización creada en Estados Unidos, encargada de crear y mantener las normas y requisitos mínimos para la prevención contra incendio, capacitación, instalación y uso de medios de protección contra incendio, utilizados tanto por bomberos, como por el personal encargado de la seguridad. Sus estándares conocidos como National Fire Codes recomiendan las prácticas seguras desarrolladas por personal experto en el control de incendios.

² Ingeniería de Protección Contra incendios IPCI o FPE por sus siglas en inglés Fire Protection Engineering. Es un campo profesional en el que se emplean principios científicos y de ingeniería para proteger las personas y los bienes del peligrosos derivados de los incendios. Estudian el comportamiento del fuego (inicio, crecimiento y propagación) y sus efectos, a fin de desarrollar sistemas críticos que permitan prevenir el incendios y sus consecuencias. Algunas modalidades dentro del campo profesional de los IPCI incluyen: el diseño de los sistemas de control, alarma y extinción de incendios y el desarrollo de planes de evacuación, la determinación de medidas de protección contra incendios en las estructuras, la investigación de siniestros de incendio para determinar sus causas etc. En España actualmente no se imparte enseñanza reglada sobre los fundamentos que soportan la ingeniería de protección de incendios.

³ Desde la Asociación Profesional de Técnicos de Bomberos (APTB) se advierte de la problemática asociada a la dispersión administrativa en materia de seguridad en caso de incendios en España.

Artículo "Podía pasar". <http://www.belt.es/expertos/experto.asp?id=2470>

Javier Larrea. Secretario General de la Asociación Profesional de Técnicos de Bomberos en España (APTB), Presidente de la Comisión de Comportamiento Humano en Incendios, Miembro de la Comisión de AENOR de Certificación de Productos de Protección Pasiva Contra Incendios y miembro del Comité

Organizador de la Feria Internacional de Seguridad "Sicur" del Instituto Ferial de Madrid, autor del Manual Básico de Protección Contra Incendios en la Industria.

⁴ Al igual que otras comunidades autónomas españolas la comunidad de Madrid cuenta con normativas locales que regulan diferentes aspectos de las edificaciones paralelamente al Código Técnico de la Edificación (CTE) que es la normativa de obligatorio cumplimiento en todo el territorio nacional, estos reglamentos locales pueden ser aplicados siempre que no desestimen o mejoren lo dispuesto en los documentos básicos del CTE. El Reglamento de Prevención de Incendios de la Comunidad de Madrid era la normativa local vigente cuando ocurrió el incendio del edificio Windsor. Este reglamento fue derogado desde el 6 de junio de 2006 sin carácter retroactivo. En la actualidad la normativa local vigente en la comunidad de Madrid es la OPI Ordenanza de Prevención de Incendios del Ayuntamiento de Madrid. (Acuerdo Plenario de 28 de junio de 1993).

⁵ En el marco de la Unión Europea (UE) han sido aprobadas distintas "Directivas" con el objetivo básico de unificar criterios. En este caso se refiere a la Directiva 89/106/CEE sobre productos de la construcción, conocida como la Directiva de Productos de la Construcción (DPC). Estas Directivas deben ser transpuestas a cada país mediante los correspondientes decretos que obligarán a la adecuación de la normativa interna de cada estado miembro a los parámetros comunes de la UE. En el caso de España esta Directiva fue transpuesta mediante el RD 1630/1992.

⁶ Texto contenido en la introducción del documento RD 314/2006 del 17 de marzo por el que fue aprobado el Código Técnico de la Edificación (CTE).

⁷ Información extraída de la página web del Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (IETcc) que es el organismo oficial de certificación de materiales y productos de la construcción en el territorio nacional. <http://www.ietcc.csic.es>

⁸ La Información sobre el comportamiento al fuego de los paneles de aluminio y las fachadas en referencia a los ensayos determinados por el Comité Europeo de Normalización (CEN) forman parte del artículo redactado por Tecnifuego- Aespi en el marco del Programa de Afiliados de la Construpedia. http://www.construmatica.com/construpedia/Ensayos_del_Single_Burner_Item_%28SBI%29

⁹ BestFacade es un proyecto de investigación europeo en el que participan ocho países, su propósito es investigar, mejorar y difundir el uso de los sistemas acristalados de doble piel en el ámbito de la UE. En el proyecto participan ocho países y cuenta con el apoyo del proyecto Intelligent Energy Europe. <http://www.bestfacade.com/index.html>

4

PROPAGACIÓN EXTERIOR DEL FUEGO



4.1 Introducción a la dinámica del fuego

La dinámica del fuego describe procesos en los cuales participan disciplinas como la dinámica de fluidos, la transferencia de calor y materia o la cinética química. Estos procesos definen un ámbito del conocimiento de gran complejidad y engloban un amplio número de conceptos.

En este capítulo se realiza una aproximación a los procesos más relevantes que definen el comportamiento del fuego con el fin de adquirir una mejor comprensión del fenómeno del incendio y su análisis.

4.1.1 El fuego y el incendio

No es fácil encontrar una definición precisa del fuego. Algunos autores definen en una sola idea el fuego y la combustión, pero se puede entender que no son exactamente lo mismo porque si bien es cierto que todo fuego es consecuencia de una combustión, no todas las combustiones desprenden fuego.

- **El fuego**

Es un fenómeno físico-químico que se caracteriza por el desprendimiento de luz y de calor que se da como consecuencia de la combustión de un material, ya sea este sólido, líquido o gaseoso. También es considerado como la manifestación visible de la combustión.

- **La combustión**

Es una reacción química de óxido-reducción que ocurre a una velocidad suficiente para liberar energía en forma de calor y algunas veces de luz. Cuando ocurre el fenómeno exento de luz se trata de una reacción incandescente (sin llama).

En general, es común hablar del fuego y del incendio sin hacer una distinción entre los dos términos. En la literatura técnica se hace referencia indistinta de ambos términos, también a lo largo de este documento de investigación, pero conviene aclarar que se trata de dos conceptos diferentes. Un incendio puede definirse como el accidente o efecto de un fuego no deseado (UNE-78.010). También se puede entender con mayor

claridad a partir de los tipos de combustión que existen y que se explican a continuación.

-Combustión por pre mezcla

En este tipo de combustión se mezclan equilibradamente el combustible y el oxígeno del aire a temperaturas bajas de manera que la mezcla se comporta como meta estable. La reacción no tiene lugar hasta que entra en contacto con una fuente de calor. Sólo entonces se desencadena localmente la reacción, que se propaga al resto de la mezcla. Este tipo de combustión es la que ocurre en los mecheros Bunsen o en los quemadores domésticos de gas natural (Fig. 4.1A).

-Combustión por difusión

En este tipo de combustión el combustible y el oxígeno del aire están inicialmente por separado y la reacción tiene lugar al mismo tiempo que la mezcla de los reactantes, en una delgada capa de reacción a la que llegan el combustible y el oxígeno desde lados opuestos de la llama [Liñan – Liñan 2001]. Este tipo de combustión es la que se produce en la combustión de flujos de gas, de combustibles sólidos y líquidos (Fig. 4.1B), por tanto es la que interesa a efectos del análisis de los incendios.



(A)



(B)

Fig. 4.1 (A) Combustión por pre mezcla, quemador de cocina
(B) Combustión por difusión, llamas de una hoguera.

Fuente: <http://es.123rf.com>

Es conocido que para que tenga lugar la combustión han de coincidir de forma simultánea tres factores: un combustible (sustancia que arde), un comburente (sustancia en la que arde el combustible) y una fuente de energía (aporte de energía suficiente para que ocurra la ignición); es lo que se conoce como triángulo del fuego. Si se puede ejercer control sobre cualquiera de los elementos que componen el triángulo de fuego (combustible, comburente y fuente de energía) no es propio hablar de incendio (Aznar, 1999: 347). Esto equivale a la situación que se explicó antes, al hablar de la combustión por pre mezcla, en la cual hay claramente una situación de fuego pero no de incendio.

Lavoisier (1775) [1] sentó las bases sobre el conocimiento del fenómeno de la combustión tal como lo entendemos hoy. Por muchos años se aceptó que eran necesarios tres elementos: combustible, comburente y fuente de energía (triángulo de fuego), para que la combustión tuviera lugar. Sin embargo algunos fenómenos no podían explicarse totalmente a partir de esta idea, hasta que surgió un “nuevo factor”: la reacción en cadena. Por tanto el triángulo sirve para representar un tipo de combustiones incandescentes (sin llama) y el tetraedro para representar las combustiones con llama. Estas representaciones simplificadas del fenómeno también definen los métodos de extinción, basta que falte cualquiera de los elementos para que el fuego se apague.

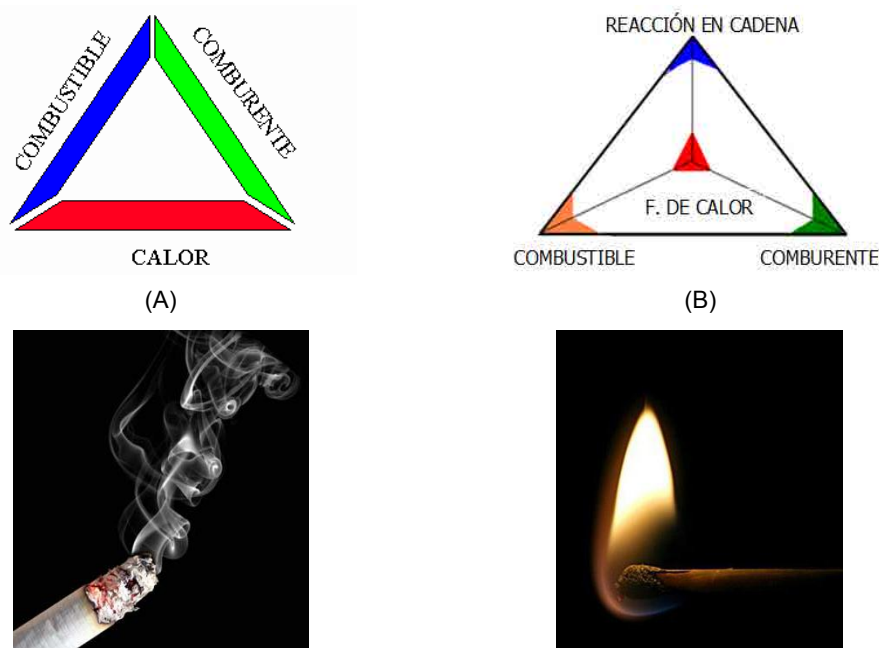


Fig. 4.2 (A) Triángulo de fuego, representa una combustión sin llama.
 (B) Tetraedro de fuego, representa una combustión con llama.

Fuente: (A) Página Web de voluntarios de protección civil.
<http://www.pcvoluntarios.es/t/El-fuego.htm> (B) Pons I Grau, 2002

El comburente generalmente es el oxígeno del aire (también llamado oxígeno molecular O_2), el cual se encuentra en la atmósfera en una proporción del 21%. Basta una proporción mínima del 16% para que ocurra la combustión. Sin embargo el oxidante no siempre es el oxígeno. Existen otros agentes oxidantes menos usuales, como el nitrato sódico ($NaNO_3$) o el clorato de potasio ($KClO_3$), los cuales pueden liberar oxígeno en condiciones favorables, de ahí su carácter de oxidante. También se pueden dar reacciones de combustión en ausencia de oxígeno como el hidrógeno que puede arder en una atmósfera de cloro.

4.1.2 Fases del incendio

Los tipos de incendios que interesa describir a efectos de esta investigación son aquellos que ocurren en el interior de un recinto (*compartment fires*). Este tipo de incendio puede desarrollarse en múltiples vías diferentes, lo cual dependerá fundamentalmente de las características del recinto, la ventilación, las propiedades de los materiales combustibles, su forma y distribución, etc.

Aunque el incendio es un fenómeno que se desarrolla de forma aleatoria, se ha establecido una secuencia descriptiva de los incendios según la cual se pueden distinguir cinco fases en su evolución:

- (1) Fase de ignición
- (2) Fase de crecimiento
- (3) *Flashover*
- (4) Fase de pleno desarrollo
- (5) Fase de declive

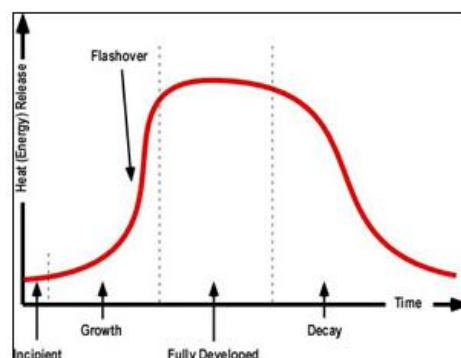


Fig. 4.3 Curva que representa la evolución de un incendio natural.
Fuente: CFTB-US LLC. <http://cftb-us.com/>



(1)



(2)



(3)



(4)

Fig. 4.4 Fases de evolución del incendio.
Fuente: Basset, 2009

Fase de ignición

Es la fase que marca el inicio de la combustión de un elemento. Para que esto ocurra es necesario que los reactivos (comburente y combustible) se encuentren en unas condiciones favorables en las que pueda producirse la reacción. La energía necesaria para que la reacción se inicie se denomina energía de activación y la proporcionan las fuentes de ignición. La facilidad o dificultad para que un material alcance su punto de ignición determina una de las propiedades más importantes a considerar para definir su grado de peligrosidad (tabla. 4.1). Durante la fase de ignición hay un exceso de oxígeno en relación al proceso de combustión que ha iniciado, por tanto se considera que el incendio depende del combustible y se le llama “incendio controlado por el combustible”. La ignición es considerada una etapa incipiente en la cual el incendio podría ser controlado con facilidad.

Tabla 4.1 Valores de punto de ignición de algunos materiales.
Fuente: Quintiere, 1998

Ignition Data from ASTM E-1321 per Quintiere		
Material	T_{ig} [°C]	$k\rho C$ [(kW/m ² K) ² s]
Wood fiber board	355	0.46
Wood hardboard	365	0.88
Plywood	390	0.54
PMMA	380	1.00
Flexible foam plastic	390	0.32
Rigid foam plastic	435	0.03
Acrylic carpet	300	0.42
Wallpaper on plasterboard	412	0.57
Asphalt shingle	378	0.70
Glass-reinforced plastic	390	0.32

Fase de crecimiento

Tras la ignición el fuego crece por acción de los mecanismos de transferencia de calor. En esta fase la llama gana altura por efecto de la flotabilidad, los gases calientes que produce son rodeados por gases fríos del entorno y por diferencia de densidad suben los gases calientes y descienden los menos calientes en un flujo convectivo permanente. Este flujo de flotabilidad en el que fluyen las llamas se denomina penacho de fuego, pluma de fuego o penacho del incendio. De forma paralela se producen una variedad de gases y humos tóxicos y no tóxicos, los cuales constituyen uno de los mayores riesgos de los incendios para los ocupantes. El incendio en esta etapa puede crecer de forma rápida o lenta, dependiendo de las propiedades del combustible y las características de contorno del recinto, lo cual incluye el factor de ventilación. Durante este proceso se produce una estratificación del recinto, en la cual se distinguen dos zonas, una capa superior caliente cercana al techo y una capa inferior con

temperaturas más bajas. A medida que la cantidad de humo aumenta, también aumenta la temperatura y la capa superior, por tanto la interfaz de las dos zonas cada vez se sitúa en una cota más baja. Este aumento de la capa superior repercute en un decrecimiento de la capa inferior y de la cantidad de oxígeno en el recinto. Cuando el penacho de fuego se ha hecho tan grande que alcanza a incidir sobre el techo, se da un efecto de flujo circular conocido en inglés como: *ceiling jet*, el cual es fundamental en la transmisión del calor a todo el recinto. Llega un momento en el cual la temperatura de la capa superior es tan alta que puede radiar calor hacia otros elementos presentes, propiciando un estado en el que todos los combustibles del recinto se inflaman simultáneamente, dando lugar al evento conocido como *Flashover*.

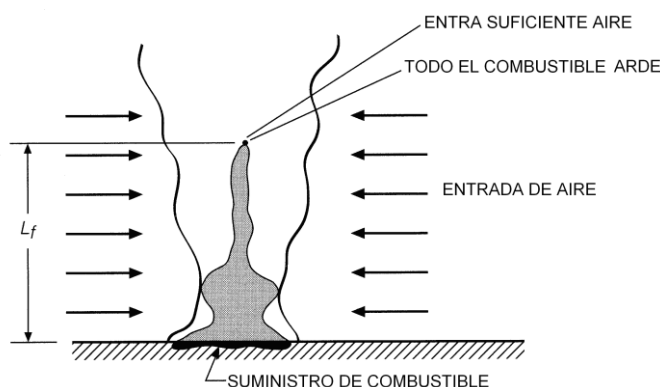


Fig. 4.5 Crecimiento del penacho de fuego.
Fuente: Alvear et al., 2007

Flashover (combustión súbita generalizada)

El *flashover* se podría considerar como la transición de un fuego localizado a un fuego generalizado que compromete todas las superficies combustibles presentes en el recinto. Define un evento que ocurre entre dos periodos del proceso del incendio: el *pre flashover* y el *post flashover*. Normalmente se determinan como señales características de un *flashover* que la temperatura en el recinto ronde los 600°C, que el flujo de calor por radiación en el suelo del recinto esté alrededor de los 20 kW/m² o que el fuego emerja a través de las ventanas (Drysdale, 1985: 279-203).

Fase de total desarrollo del incendio

Tras el *flashover*, el incendio alcanza su total desarrollo. En esta etapa todos los materiales combustibles presentes arden simultáneamente con una tasa de combustión que depende de su naturaleza, su disposición y la ventilación del recinto. La duración de esta fase puede variar en función de la cantidad de combustible.

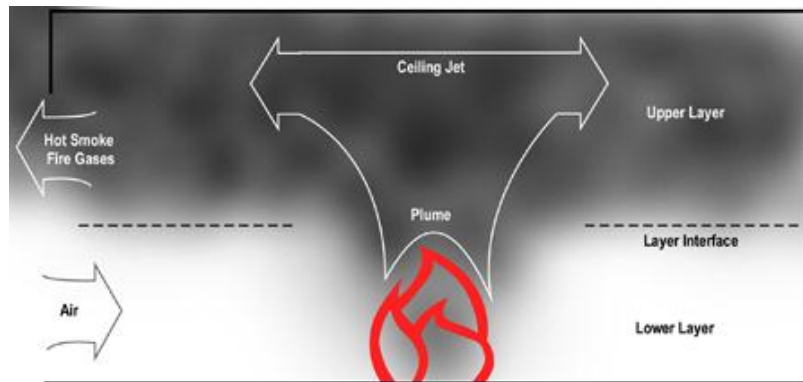


Fig. 4.6 Recinto del incendio capa fría y capa caliente.
Fuente: CFTB-US LLC <http://cftb-us.com/>

En esta fase hay un exceso de combustible por tanto se considera que el fuego depende de la cantidad de oxígeno (del comburente). A esto se le llama “incendio controlado por la ventilación”. Todos los parámetros importantes del incendio alcanzan en esta fase su máxima magnitud, algunos de estos son: la velocidad de cesión del calor HRR , la temperatura, la generación de calor, la velocidad de combustión, la producción de humo, la altura de las llamas etc. Una de las características más importantes de esta fase la constituye la propagación del fuego a otras estancias del edificio a través de las puertas, o hacia el exterior del edificio a través de las ventanas. A efectos de esta investigación el periodo *post flashover* es el que tiene mayor interés.

Fase de declive

Una vez se agota el combustible comienza a darse un paulatino decrecimiento del incendio.

4.1.3 Mecanismos de transferencia de calor

Los mecanismos de transferencia de calor juegan un papel muy importante en el desarrollo y propagación del incendio. La transmisión del calor puede ocurrir por tres mecanismos distintos: por conducción, por convección y por radiación.

Conducción

La transmisión de calor por conducción es el paso de calor de un cuerpo a otro por contacto directo de dos cuerpos o a través de un medio conductor. Se da de molécula a molécula, sin desplazamiento visible de sus partículas. En muchas ocasiones se debe al movimiento libre de electrones, lo cual es de especial interés en los metales, pues es responsable de la elevada conductividad calorífica de estos.

La cantidad de calor transmitida y su rango de transferencia dependerán de la conductividad del material a través del cual se da el paso de calor. La conductividad de los materiales varía según su naturaleza. Los metales como el aluminio, el acero o el cobre son buenos conductores de calor, mientras que los materiales fibrosos, tales como la tela, la madera y el papel son deficientes conductores.

Convección

La convección es la transferencia del calor que ocurre por el movimiento de masas de gases o líquidos calientes. En el caso de los gases, al ser calentados se expanden haciéndose más livianos, lo cual crea un desplazamiento ascendente, a su vez el aire frío desciende tomando su lugar. Cuando se añade calor a un gas o un líquido se activa este movimiento macroscópico dentro del propio fluido.

Este mecanismo de transferencia de calor tiene especial relevancia en el estudio de la propagación vertical del fuego en las edificaciones. El aire caliente tiende a expandirse y a ascender debido a la diferencia de densidades de las moléculas (el aire caliente es menos denso), por este motivo el fuego que se propaga por convección es casi siempre ascendente, aunque las corrientes pueden arrastrar el calor en cualquier dirección. Las corrientes convectivas explican, en la mayoría de los casos, el paso del flujo de calor de un recinto a otro, también la propagación del incendio por cajas de escaleras, escaleras y de ascensores, por conductos de aire, entre paredes, y a través de las fachadas son principalmente causadas por la convección de corrientes calientes.

Radiación

La transmisión de calor por radiación no requiere de un medio material como vehículo. Todos los materiales tienen la capacidad de radiar energía calorífica en forma de ondas electromagnéticas. La energía radiada sobre un cuerpo, puede ser parcialmente reflejada, transmitida a través del propio cuerpo o absorbida. Esta última es la que se manifiesta en forma de calor en el cuerpo. La radiación es mejor absorbida por los elementos oscuros que por los claros, y por los opacos más que por los brillantes. Habitualmente esta es la forma más común de propagación del fuego sobre el mismo plano.

4.1.4 Carga de fuego

El concepto de carga de fuego o carga combustible en un edificio hace referencia a la energía latente disponible en caso de incendio. Se define como la 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).

El cálculo de la carga de fuego referida a un recinto con una función y unas características determinadas va asociado a otro concepto: la densidad de carga de fuego que se define como la 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) [2]. La densidad de carga de fuego definido según la ecuación [4.1] es un concepto que conviene emplear como parámetro de referencia para obtener datos sobre el riesgo potencial del incendio, teniendo en cuenta que hay otros factores que pueden en determinadas situaciones ser más importantes en el desarrollo del incendio que este parámetro. En el apartado 4.7 se tratan estos factores.

$$Q_s = \frac{\sum_{i=1}^n G_i q_i C_i}{A} R_a \quad [4.1]$$

Donde:

Q_s = Densidad de carga de fuego, ponderada y corregida del sector de incendio, en MJ/m² o Mcal/m².

A = Superficie construida del sector de incendios, en m².

G_i = Masa, en Kg, de cada uno de los combustibles (i) que existen en el sector de incendios (incluidos los materiales constructivos combustibles)

C_i = adimensional que pondera el grado de peligrosidad (por la combustibilidad) de cada uno de los combustibles (i) que existen en el sector de incendio.

q_i = Poder calorífico, en Mcal/Kg o MJ/Kg de cada uno de los combustibles

R_a = Coeficiente adimensional que corrige el grado de peligrosidad (por la activación) inherente a la actividad industrial que se desarrolla en el sector de incendios.

Tabla 4.2 Valores de carga de fuego variable (contenido) según el uso del recinto.
Fuente: elaboración propia con datos del Código Técnico de la Edificación (CTE) DB SI 6 Anejo B

Valor característico [MJ/m ²]	
Comercial	730
Residencial vivienda	650
Hospitalario/Residencial público	280
Administrativo	520
Docente	350
Pública concurrencia (teatros, cines)	365
Aparcamiento	280

Tabla 4.3 Cuadro de referencia del nivel de riesgo intrínseco.
Fuente: elaboración propia con datos del RSCEI (Reglamento de Seguridad Contra incendios en Establecimientos Industriales)

Nivel de riesgo intrínseco		Densidad de carga de fuego ponderada y corregida	
		Mcal/m ²	MJ/m ²
Bajo	1	Qs ≤ 100	Qs ≤ 425
	2	100 < Qs ≤ 200	425 < Qs ≤ 850
Medio	3	200 < Qs ≤ 300	850 < Qs ≤ 1275
	4	300 < Qs ≤ 400	1275 < Qs ≤ 1700
	5	400 < Qs ≤ 800	1700 < Qs ≤ 3400
Alto	6	800 < Qs ≤ 1600	3400 < Qs ≤ 6800
	7	1600 < Qs ≤ 3200	6800 < Qs ≤ 13600
	8	3200 < Qs	13600 < Qs

4.1.5 Velocidad de cesión del calor *HRR*

Como se ha dicho antes, la carga de fuego es la energía latente disponible en caso incendio, la velocidad de cesión del calor *HRR* hace referencia a cómo se libera esta energía. La curva del *HRR* (del inglés *Heat Release Rate*) representa la tasa de energía térmica liberada en el proceso de la combustión en función del tiempo. Se expresa como:

$$\dot{Q} = A\Delta H_{C,F}\dot{m}_F'' \tag{4.2}$$

Donde:

A es el área.

$\Delta H_{C,F}$ es el calor de combustión por unidad de masa de combustible quemado.

\dot{m}_F'' es el ritmo de generación de masa por unidad de superficie (velocidad de masa de combustión).

Este parámetro es seguramente el más importante para describir las características de la combustión de los materiales sólidos. La mayoría de variables del incendio están relacionadas con este factor: la producción de humo, las temperaturas, la velocidad de combustión, los gases tóxicos, el nivel de oxígeno presente, la pérdida de masa etc. A

su vez el *HRR* depende de factores como: la cantidad de combustible, el oxígeno disponible, el tamaño y las propiedades térmicas de los límites del recinto.

El *HRR* sólo puede ser obtenido de forma experimental. Uno de los instrumentos empleados para medir este parámetro es el calorímetro de cono. El método parte del principio de que para diferentes materiales orgánicos, el calor producido por el equivalente del oxígeno consumido es aproximadamente constante y tiene un valor de 13,1 (+/- 10%) MJ/Kg O₂. Por tanto, midiendo el contenido de oxígeno en el inyector y en el eyector del calorímetro, se puede determinar la cantidad de oxígeno consumido y el calor liberado por el material en las diferentes etapas de la combustión (Tuhtar, 1990: 20).

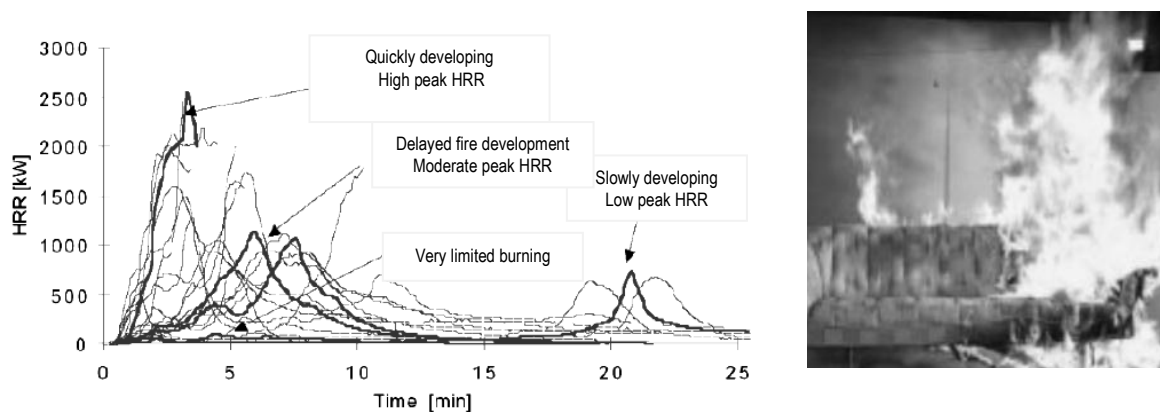


Fig. 4.7 Ensayo para determinar cuatro tendencias del *HRR* (*Heat Release Rate*)
Fuente: Högländer – Kenneth – Sundström, 1997

4.1.6 Factores que afectan el desarrollo del incendio

El incendio es un proceso en el que intervienen diversos fenómenos fisicoquímicos de gran complejidad. Evoluciona de forma aleatoria en función de diversos factores que conviene analizar por separado.

Por mucho tiempo, en base a los resultados de las investigaciones llevadas a cabo por Ingber (1928) se consideró que la naturaleza de un incendio en plenitud estaba determinada principalmente por un único factor: la cantidad de combustible presente en el recinto del incendio, lo que equivalía a reconocer la importancia de uno solo de los reactivos que intervienen en la reacción.

Posteriores investigaciones de Butcher y alumnos (1966), Gross y Roberson (1965), Kawagoe (1967), Harmathy (1972), Magnusson y Thelanderson (1970), Thomas y

alumnos entre otros (citados por Tuhtar, 1990: 82) aportaron una mayor comprensión del fenómeno y promovieron un cambio de criterio. De acuerdo a esto, es ampliamente reconocido en la ciencia del fuego actual que hay diferentes factores que influyen en el desarrollo del incendio y que el factor de ventilación puede ser tan determinante como la carga de fuego.

Los análisis de riesgos como el conocido método Gretener [3], muy empleado en las décadas de los 70 y 80 (y aún utilizado en los análisis de riesgos en edificios industriales), se basa en parámetros relacionados con la carga combustible, el poder calorífico de los materiales y la geometría del recinto, pero no toma en cuenta un factor tan importante como la ventilación.

Este apartado se centra en algunos aspectos de los factores que afectan de forma más significativa el desarrollo del incendio y que se enumeran a continuación:

- (1) El combustible contenido en el recinto. Cantidad, posición, distribución, orientación y área superficial expuesta al fuego, también llamada área libre del material.
- (2) El factor de ventilación
- (3) La geometría del recinto
- (4) Las propiedades de los materiales de contorno del recinto
- (5) La potencia y localización de la fuente de ignición

- **El combustible contenido en el recinto**

El material combustible presente en un recinto sin duda es uno de los factores más determinantes en el desarrollo del incendio. Comúnmente, el parámetro que se considera en referencia al material combustible es su cantidad (carga combustible o carga de fuego). No obstante, este parámetro no es un indicador absoluto de su influencia en el desarrollo del incendio: hay otros aspectos que merecen ser tenidos en cuenta. La distribución y ubicación del material combustible dentro del recinto pueden ser en un momento dado un aspecto determinante de la velocidad de propagación del incendio (Patterson, 1993: 6); si el contenido está distribuido uniformemente guardando cierta distancia entre los elementos combustibles la velocidad de propagación del fuego puede reducirse. Las características físicas del material tales como la forma y la configuración son también importantes en el desarrollo del fuego. Los objetos altos pueden contribuir a que el fuego alcance más rápidamente el techo,

en este caso la transferencia de calor es más rápida. Este mismo efecto ocurre en el caso de un objeto ardiendo cerca de una pared.

La orientación de las superficies también es un aspecto de gran interés, el fuego se propaga más rápidamente sobre una superficie vertical, como un revestimiento de pared combustible, que sobre una superficie horizontal. En el apartado siguiente, que trata sobre la propagación vertical, se toca este tema con más amplitud.

La geometría y configuración del material combustible pueden condicionar la velocidad de combustión del material. Dos edificios idénticos con la misma carga de fuego de madera, pueden quemarse a velocidades muy diferentes en función de la configuración del material que contienen, si por ejemplo en un lugar se almacena la madera en troncos y en el otro en chapas (Pons i Grau, 2002: 45). La experiencia demuestra que arde con mayor facilidad un libro abierto con las páginas sueltas, que el mismo libro cerrado. Esto se explica a partir del concepto de la superficie “libre” o superficie del material expuesta al aire, es decir la cantidad neta de material combustible que está en contacto con el comburente; normalmente esta superficie libre es solo una fracción que se calcula a partir de la carga de fuego total.

Este concepto de la superficie libre del material también está relacionado con la estructura del material. Por ejemplo el fuego se propaga más rápidamente a través de una espuma de poliuretano (estructura con mucho aire), que a través de una placa rígida del mismo material. Las propiedades químicas de los materiales combustibles también son determinantes en la velocidad de propagación y la intensidad del incendio. Este factor agrupa conceptos que permiten determinar la peligrosidad del incendio tales como: la combustibilidad, la velocidad de combustión, la velocidad de cesión del calor, la producción de humos y gases tóxicos etc. Estos aspectos se explican con mayor detalle en apartado 4.7 el cual trata sobre los materiales de construcción.

- **El factor de ventilación**

La ventilación es un factor muy importante en el desarrollo del incendio: es el medio que provee el oxígeno necesario para el desarrollo del fuego.

La intensidad de un incendio depende tanto de la concentración de combustible (carga de fuego) como de la concentración de oxígeno, dependiendo de la fase en la que se

halle el incendio. Por la denominada ley química de Acción de Masas, que gobierna la velocidad de reacción de los materiales, se conoce que la velocidad de reacción está determinada por la relación entre las concentraciones de los reactivos. Si uno de los reactivos está en exceso, entonces el otro controla la velocidad de reacción del incendio.

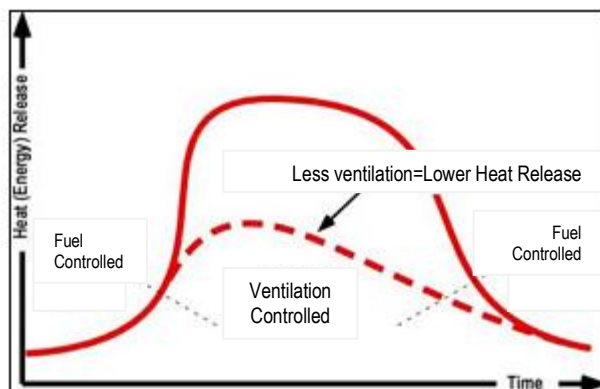


Fig. 4.8 Fases en las que el incendio está controlado por el combustible o controlado por la ventilación.

Fuente: CFTB-US LLC <http://cftb-us.com/>

La relación óptima de la mezcla aire/combustible se denomina relación estequiométrica, y se define como aquella en la que la cantidad de aire está equilibrada con la del combustible. Esta consideración equivaldría a afirmar que la totalidad del material combustible y de comburente desaparecería durante el incendio, lo cual no ocurre en una situación de incendio real. Un incendio ocurre de forma no estequiométrica, es decir, con exceso de uno de los dos reactivos. Cuando en un incendio hay un exceso de oxidante (oxígeno del aire), generalmente en una fase inicial del fuego, se considera que el incendio está controlado por el combustible. Por el contrario, cuando el incendio está muy desarrollado, se presenta un exceso de combustible y se considera que el fuego está controlado por la ventilación (Aznar, 1999: 353).

Esta condición puede variar durante el incendio dependiendo del suministro de ventilación, lo cual está restringido por el tamaño y cantidad de aperturas. El paso de una a otra situación del incendio (controlado por el combustible a controlado por la ventilación) puede no ser del todo clara en todos los casos.

Normalmente en la primera fase del desarrollo de un incendio el efecto térmico que se produce está controlado por el combustible, debido a que el material se encuentra en menor proporción respecto al comburente, por tanto es el que marca la cantidad de

reacciones químicas que se van a producir. La expresión que describe este efecto para su cálculo es:

$$q_c = X m \Delta H_c \quad [4.3]$$

Donde:

q_c = es la potencia de la combustión (cantidad de lo que se puede quemar por unidad de tiempo) en W ó Mw.

X = es el rendimiento de la combustión (su valor oscila entre 0,6 - 0,7).

m = es la pérdida de masa en Kg/s, o lo que es lo mismo, la masa de gases de pirólisis que se desprenden de la superficie del combustible y que en consecuencia participa en la combustión. Este factor define la intensidad de la combustión.

ΔH_c = es la Cantidad de energía desprendida al consumirse un kg de material en Mj/Kg.

Si el incendio continúa, el efecto térmico empieza a cambiar en función del oxígeno presente en el recinto, debido a que este se va consumiendo y tan sólo se dispone del oxígeno que entra a través de la aberturas, por tanto el efecto térmico depende de la cantidad de oxígeno que puede entrar en el recinto y se puede calcular mediante la expresión:

$$q_{c\text{ máx}} = 1500A\sqrt{h} \quad [4.4]$$

Donde:

$A\sqrt{h}$ = es el índice o factor de ventilación.

$A = \sum A_i$ = es la sumatoria de las áreas de la abertura en m^2 .

$H = \frac{\sum h_i A_i}{\sum A_i}$ = es la altura promedio de la aberturas en m.

Esta expresión empírica muestra que a mayor factor de apertura, mayor será el efecto térmico ya que la cantidad de oxígeno que penetra en el recinto es mayor. Se debe tener en cuenta que esta expresión está diseñada para un 100% de rendimiento en la combustión, lo cual no se da nunca en la realidad (Basset, 2009: 74).

Por todo ello, en los incendios que se desarrollan dentro de un recinto (*compartment fire*) resulta determinante el denominado factor de apertura, también llamado parámetro geométrico de ventilación, el cual está determinado por el tamaño de las ventanas y define el monto de ventilación que fluye hacia el recinto, se expresa como:

$$A_v \sqrt{H_v} \quad [4.5]$$

Donde:

A_v = es el área de la ventana,

H_v = es la altura de la ventana.

Este parámetro hace referencia fundamentalmente al factor físico de la configuración geométrica de las aperturas, ya sean ventanas o puertas. Permite determinar aspectos relevantes como: la cantidad de aire que fluye hacia el interior del recinto a través de las aperturas como consecuencia del arrastre producido por el penacho de fuego, y la cantidad de calor transferido por el penacho de fuego que emerge de las ventanas.

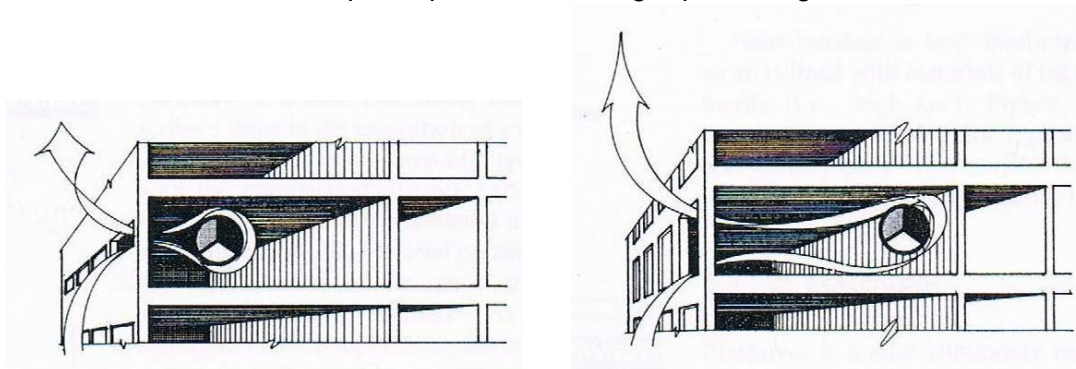


Fig. 4.9 La geometría de las ventanas es un factor determinante en los incendios controlados por la ventilación.

Fuente: Patterson, 1993

El flujo de aire que fluye al recinto afecta aspectos tan importantes como la velocidad de combustión, la velocidad de cesión del calor HRR , la velocidad de pérdida de masa combustible entre otros, por tanto, influye en la temperatura de los gases que determinan la duración del incendio [EE H. Yii et al. 2000]. En recintos donde no hay intercambio de aire con el exterior o que disponen de pequeñas pérdidas y aportes de aire el incendio puede tener carencia de oxígeno y auto extinguirse, o desarrollar una combustión muy lenta.

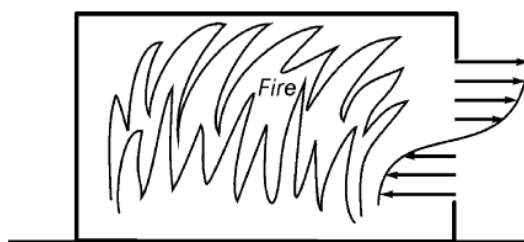


Fig. 4.10 Flujos de viento en la ventana, incendio controlado por la ventilación.

Fuente: Buchanan, 2001

La incorporación de flujos de ventilación puede intensificar el incendio, sin embargo si la ventilación es muy fuerte puede contribuir a la disipación de los gases calientes, disminuyendo la temperatura en el recinto. Las curvas de la Fig. 4.11 muestran un análisis teórico y experimental de esta situación. Se aprecia que la temperatura media del incendio aumenta cuando se incrementa la ventilación, pero sólo hasta determinado punto, pasado el cual la temperatura disminuye al aumentar la ventilación (Tuhtar, 1990: 84). Este comportamiento se debe a que si la intensidad del flujo de ventilación es muy fuerte, la velocidad de combustión se incrementa y las llamas

aumentan de tamaño propagándose hacia el exterior del recinto. Por lo tanto, parte de la energía se disipa en forma de subproductos de la combustión, disminuyendo la temperatura media en el recinto. De esto se deduce que los incendios controlados por la ventilación, con aperturas pequeñas, presentan en general temperaturas más altas en el interior del recinto. Por otra parte, los incendios bien ventilados, es decir, controlados por el combustible, presentan temperaturas más bajas en comparación a los anteriores y su duración suele ser menor debido a la rapidez con la que se quema el combustible.

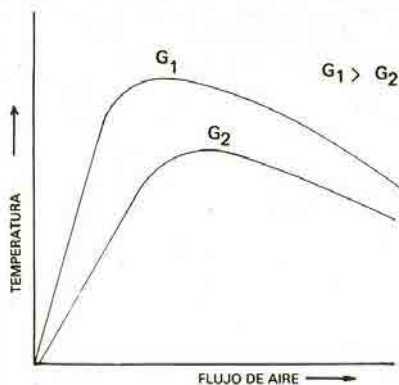


Fig. 4.11. Curvas de temperatura del incendio en función del flujo de aire para recintos con dos cargas de fuego diferentes ($G_1 < G_2$).
Fuente: Tuhtar, 1990

Un incendio controlado por la ventilación es muy sensible al tamaño, ubicación, cantidad y forma de las aberturas. La presencia de aberturas en el techo puede actuar como exhaustor de los gases calientes. Cuando el incendio está en su fase inicial y el material combustible aún está controlando la reacción, este efecto de disipación puede retrasar ligeramente el crecimiento del incendio. Sin embargo, cuando el incendio ha aumentado de tamaño, el efecto del flujo de ventilación y en especial el suministro de aire frío puede incrementar significativamente la intensidad y el tamaño de las llamas.

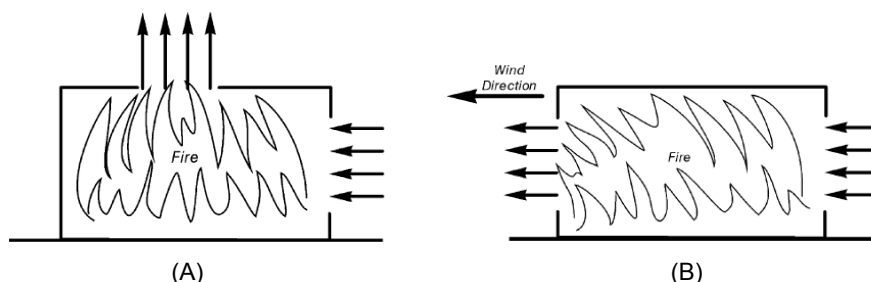


Fig. 4.12. Flujos de ventilación con doble apertura.
(A) Recinto con apertura en el techo (B) Recinto con aberturas enfrentadas.
Fuente: Buchanan, 2001

En un recinto con dos aberturas enfrentadas se presenta un flujo de ventilación cruzada que puede ser más intenso si adicionalmente intervienen corrientes de viento.

En este caso la propagación del fuego tendrá una trayectoria claramente marcada por la ventilación (tiro forzado) y puede darse un incremento importante en la velocidad de combustión.

En un incendio controlado por la ventilación hay muchas interacciones complejas entre el flujo de calor radiante, la tasa de pirolisis del combustible, la tasa de velocidad de combustión de los productos en fase gas, la entrada de aire para mantener la combustión, el flujo de productos de la combustión incompleta que emerge a través de las ventanas, entre otros. La dependencia empírica de la velocidad de combustión controlada por la ventilación según el término $A_v \sqrt{H_v}$ se ha observado en numerosos estudios. Algunos ensayos han mostrado desviaciones respecto a la ecuación de Kawagoe (1958) (citado por Ee H. Yii et al., 2007) quien hiciera las primeras formulaciones sobre este factor de ventilación. A partir de un gran número de ensayos (a pequeña escala) de incendios en recintos, Thomas y Heselden 1972 (citados por Ee H. Yii et al., 2007) propusieron una ecuación un poco más detallada para la velocidad de combustión, encontrando que la velocidad de combustión no es directamente proporcional a la formulación $A_v \sqrt{H_v}$ sino que también depende en gran medida de la forma del recinto.

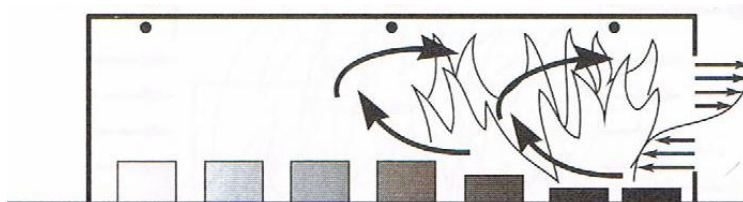


Fig. 4.13. Distribución y tamaño del material combustible en el recinto.
Fuente: Buchanan, 2001

Respecto a la importancia de la geometría del recinto mencionada antes y la ubicación de las aperturas, Kirby et al. (1994) (citado por Buchanan, 2000: 81), realizaron una serie de experimentos en recintos de forma alargada (6 m ancho x 20 m largo) dotados de una sola ventana. Los resultados permiten observar, entre otros aspectos, que la velocidad de combustión de los materiales es mayor cerca de la ventana, por tanto la ventilación contribuye a la velocidad de propagación del fuego. También la ventana influye en el avance de las llamas, aun cuando el foco de ignición esté localizado lejos de la apertura el fuego avanza rápidamente hacia ésta.

A mayor nivel de ventilación mayor disipación del calor en el recinto, debido al exceso de aire. A menor nivel de ventilación menor disipación de calor, menor descarga de llamas y gases calientes al exterior y menor capacidad de combustión. Esto último indica que habrá una mayor proporción de combustión incompleta (partículas de combustible y productos de pirolisis), lo cual en consecuencia genera una mayor cantidad de humo [NFPA 1991a].

- **La geometría del recinto**

El tamaño, la forma y la altura del recinto son parámetros muy importantes en el desarrollo del incendio. Cuanto más rápido pueda alcanzar el penacho de fuego el techo del recinto, más rápido se desarrollará el incendio. El calor transferido por la capa caliente que se forma en el techo es el principal mecanismo por el cual el calor aumenta en el recinto. Un objeto ardiendo en un recinto pequeño puede acumular altas temperaturas, dar lugar a un incendio rápido y causar grandes daños. Mientras que el mismo objeto en un recinto grande tiene una menor repercusión, las temperaturas son más bajas y la evolución del incendio más lenta.

- **Las propiedades de los materiales de contorno del recinto**

El contorno del recinto está constituido por las paredes, el techo y el suelo. Los materiales que los componen pueden influir significativamente en el incremento de las temperaturas de los gases calientes durante el crecimiento del incendio.

Los cerramientos diseñados para aislar térmicamente los edificios están compuestos por materiales de baja inercia térmica tales como la lana de roca y el poliuretano. La capacidad aislante de estos materiales representa un problema mayor en una situación de incendio, debido a que contribuyen a la acumulación de calor en el recinto. Otros materiales con mayor inercia térmica como el ladrillo o el hormigón tienen la capacidad de retener parte del calor generado en el recinto. Este aspecto está definido por la inercia térmica de los materiales, que es un aspecto muy importante para determinar el comportamiento térmico de los materiales. Los tres parámetros que caracterizan sus propiedades térmicas son:

- *El calor específico* C_p $[J/kg \cdot K]$
- *La densidad* ρ $[kg/m^3]$
- *La conductividad térmica* λ $[W/m \cdot K]$

- **La potencia y localización de la fuente de ignición**

Las fuentes de ignición pueden ser muy diversas en origen y potencia. Aunque la potencia de la fuente es uno de los aspectos relevantes como desencadenante de una situación de incendio, resultan más determinantes las condiciones del lugar en el que actúa dicha fuente de energía, así como el punto de ignición de los materiales implicados. Una pequeña fuente de energía como un cigarrillo encendido, con apenas 5 kW de potencia, puede generar un incendio de grandes proporciones si entra en contacto con suficiente material combustible. Esta situación constituye una de las principales causas de incendios domésticos en EEUU según los registros estadísticos de USFA [4]. Por otro lado, una fuente de energía de gran potencia, como puede ser un corto circuito en un equipo eléctrico o mecánico, puede pasar a ser un riesgo menor si los elementos que rodean la reacción son incombustibles. La ubicación de la fuente de ignición respecto a las paredes del recinto y las aberturas de las ventanas también puede ser un aspecto decisivo en la propagación del fuego.

La consideración de los distintos factores que inciden significativamente en el desarrollo del incendio pone de manifiesto por un lado, la complejidad y variabilidad del fenómeno y por otro lado, la estrecha relación que existe entre todos los factores que lo afectan.

4.2 Propagación del fuego en la edificación

Una vez alcanzada la fase de total desarrollo del incendio en un recinto se inicia el proceso de propagación del fuego al resto de la edificación. Normalmente el fuego se propaga por acción de los mecanismos de convección y radiación térmica originados por las llamas, también por contacto o radiación directa a los materiales combustibles. El movimiento del fuego y los humos depende en gran medida de la geometría del edificio y de las potenciales rutas que constituyen elementos como: puertas y ventanas, conductos de ventilación, cavidades entre los elementos constructivos, cajas de escaleras, espacios ocultos sobre los falsos techos, etc. Se pueden considerar tres categorías generales de propagación del fuego desde un recinto en el que se ha originado un incendio:

- (1) Propagación a otro recinto de la misma planta (propagación horizontal).
- (2) Propagación a las plantas superiores del propio edificio (propagación vertical).
- (3) Propagación a otra edificación vecina.

En las Fig. 4.15 -16 se consideran diferentes vías de propagación directa (a través de los mecanismos de transferencia de calor) o indirecta mediante las eventuales rutas que pueden tener lugar por medio de los elementos constructivos.

A efectos de esta investigación fundamentalmente nos centraremos en el mecanismo de propagación del fuego desde un recinto en llamas a las plantas superiores del propio edificio, también denominado propagación vertical, para luego centrarnos en la propagación del fuego a través de las fachadas.

4.3 Propagación vertical del fuego

El fuego puede propagarse a otras plantas del edificio por diferentes vías, tanto por el interior del edificio como por el exterior. La propagación vertical plantea problemas de consideración relacionados con la velocidad de propagación del fuego y con la circulación de humos por las vías por las cuales se propaga, todo ello potenciado por el efecto chimenea (ver apartado 4.6).

Aún cuando los edificios estén debidamente compartimentados en sectores de incendio para evitar la propagación del fuego de un recinto a otro, se pueden presentar problemas para garantizar el confinamiento del fuego. Normalmente resulta inevitable atravesar los elementos cortafuegos (paredes cortafuegos y forjados) debido a que es necesario dar paso a diferentes instalaciones requeridas en el edificio tales como canales de electricidad, tuberías, conductos de suministro y retorno de aire acondicionado, etc. Estos pasos de instalaciones suelen ser uno de los puntos de propagación frecuentes cuando no se incorporan elementos adecuados para este fin. Esta situación merece una especial atención ya que constituye un riesgo importante tanto de propagación horizontal (a través de paredes) como vertical (a través de forjados). Por tal motivo, cada hueco y pase de instalaciones debe sellarse con elementos cortafuego específicos para esta función, teniendo en cuenta la tasa de resistencia (EI) exigida en cada caso según el elemento constructivo que se atraviesa.

El caso de los conductos de ventilación es diferente puesto que el potencial peligro lo constituye el propio conducto. Para ello se debe limitar el paso del fuego mediante dispositivos de cierre automático resistentes al fuego (*Automatic fire dampers*) ubicados en cada salida de los conductos de aire. Adicionalmente, conviene considerar la incorporación de exutorios automáticos para evacuar los humos del conducto hacia el exterior (Patterson, 1993: 12).

Otras vías de propagación vertical las constituyen las cajas de escaleras de ascensores y todo tipo de conductos verticales de servicios (basuras, montacargas etc.) (Fig. 4.14). Este tipo de conductos deben estar limitados por paredes resistentes al fuego de acuerdo a lo exigido para los muros de cerramiento (EI 60). Las escaleras que por normativa requieren constituir un espacio protegido han de estar separadas del resto de recintos mediante paredes resistentes (EI 120) y puertas cortafuego específicas (EI 260-CE). En situaciones particulares, según lo determine la normativa, las cajas de escaleras pueden requerir también de presurización.

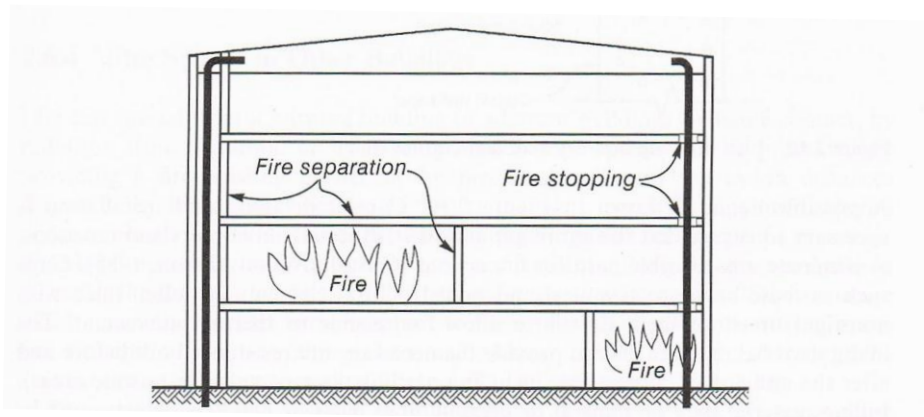


Fig. 4.14. Sellos corta fuegos y barreras de protección frente al riesgo de propagación a través de pasos verticales de instalaciones.
Fuente: Buchanan, 2001

Toda cavidad o brecha constituye una potencial ruta de propagación del fuego. Estas cavidades normalmente se deben a fallos estructurales o a sistemas de fachadas exentas o colgantes (muros cortina) cuyo perímetro de forjado no ha sido resuelto convenientemente [Fitzgerald 2004]. Este aspecto es particularmente importante debido a que constituye una vía habitual de la propagación del fuego. En el apartado siguiente, dedicado a la propagación a través de la fachada, se hará hincapié sobre este aspecto.

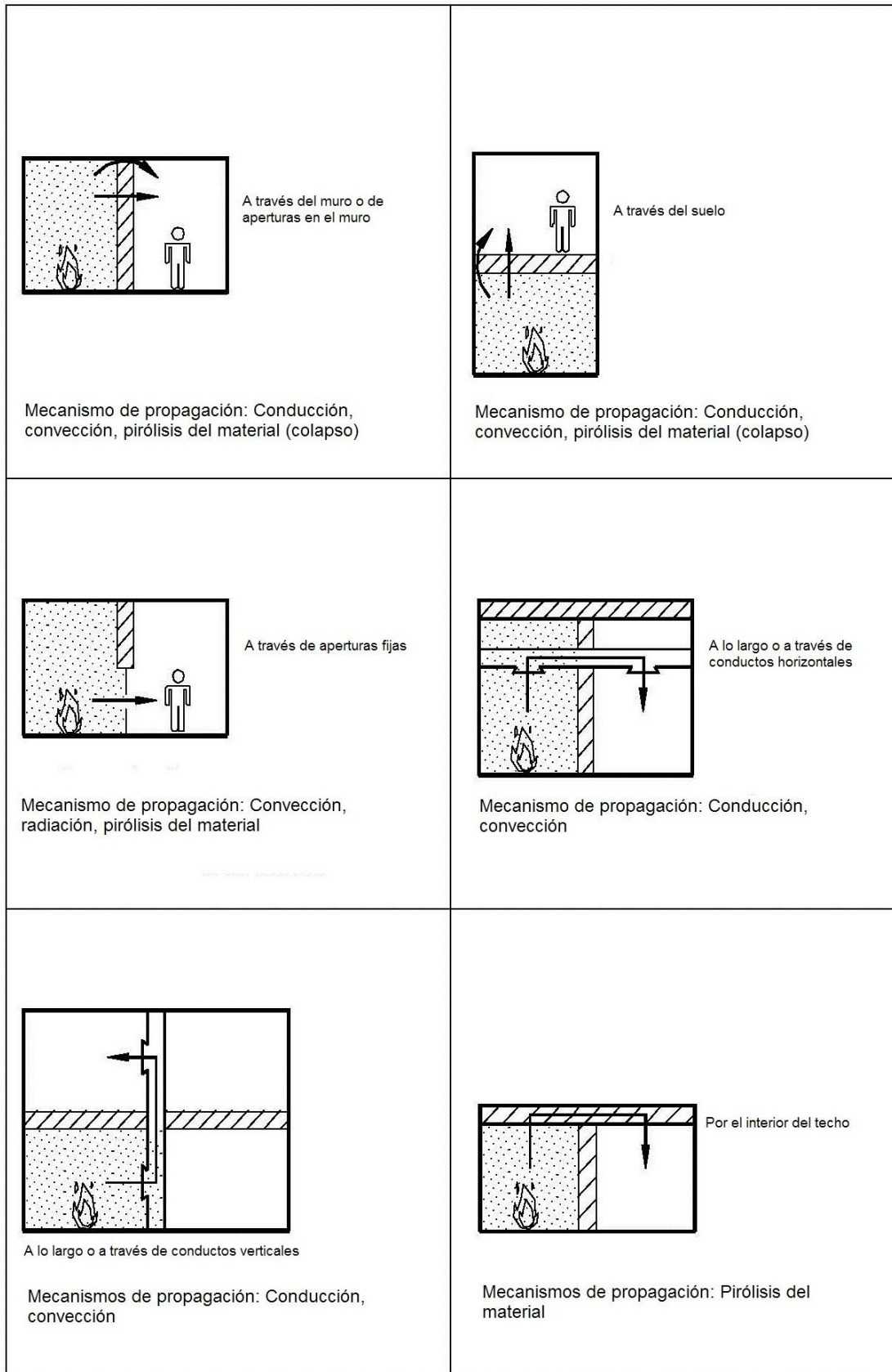


Fig. 4.15 Vías de propagación del fuego directas.
Por acción de los mecanismos de transferencia de calor.

Fuente: BS 7974:2001 Application of fire safety engineering principles to the design of buildings.

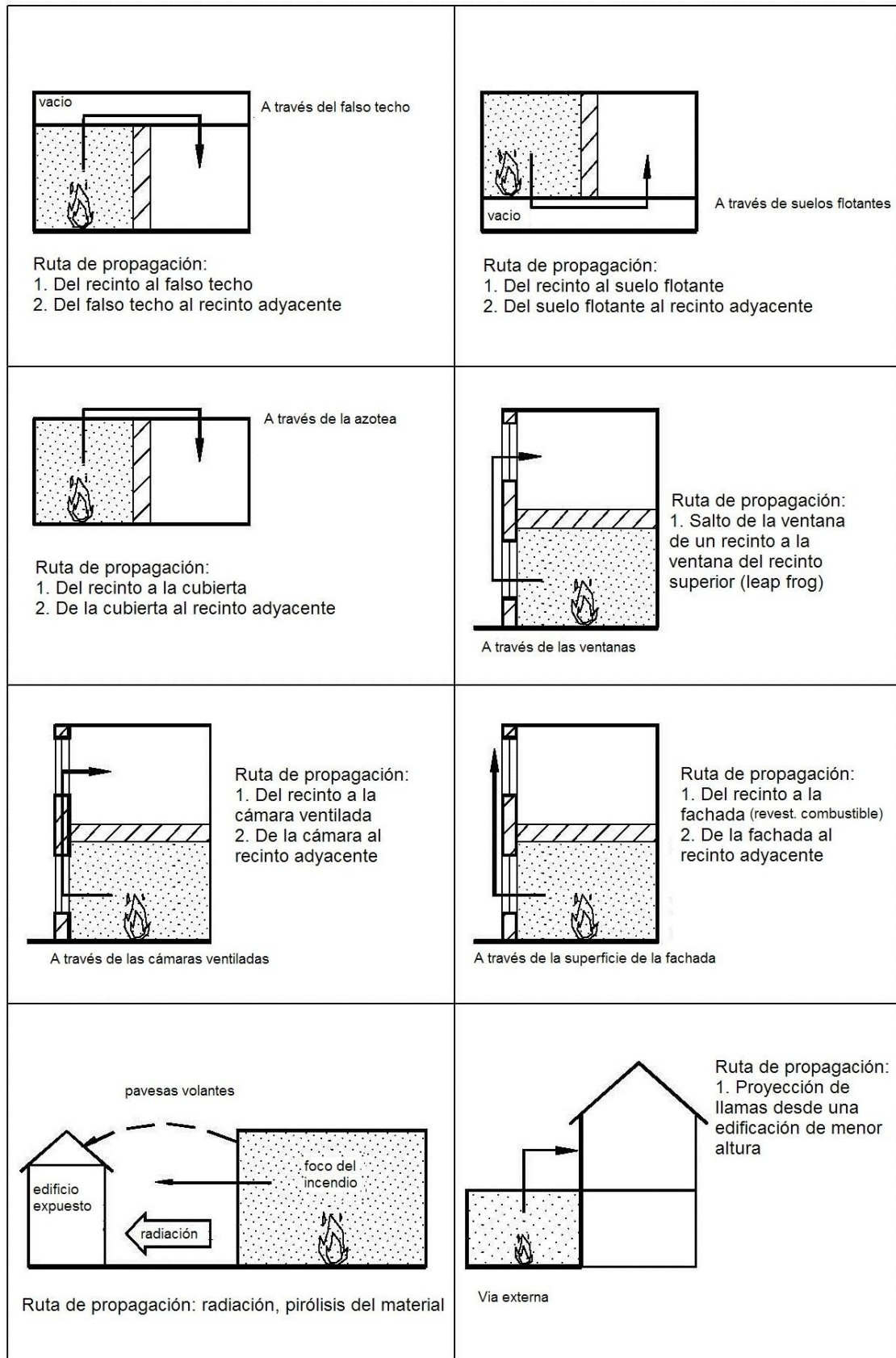


Fig. 4.16 Vías de propagación del fuego indirectas.
A través de elementos constructivos.

Fuente: BS 7974:2001 Application of fire safety engineering principles to the design of buildings.

4.4 Propagación del fuego a través de las fachadas

La propagación a través de las fachadas es una de las vías de propagación más rápidas del fuego en las edificaciones. Puede derivar en daños considerables en la fachada del edificio y constituir una potencial ruta de propagación a las plantas superiores.

Existen tres situaciones a partir de las cuales puede tener lugar la propagación del fuego a través de las fachadas:

- (a) Fuego proveniente del exterior del edificio a través de brasas ardientes, ya sea por un incendio de un edificio vecino o una zona boscosa en llamas.
- (b) Fuego debido a un elemento que arde en el frente de la fachada (contenedor de basuras, muebles, etc.).
- (c) Fuego originado en un recinto del propio edificio y que se propaga hacia el exterior a través de las ventanas. A efectos de este estudio nos hemos centrado sólo en la situación c, la cual se percibe como la más peligrosa y estadísticamente es la que ocurre con mayor frecuencia [Oleszkiewicz 1990].

Por lo general este evento de propagación indica que el incendio en el recinto ha alcanzado su máximo desarrollo y por tanto se encuentra en la fase *post flashover*. La presión ocasionada por el aumento de las temperaturas y la producción de gases induce la descarga del fuego y gases calientes a través de las aperturas (ventanas y puertas). Dependiendo de las características del incendio los flujos de calor generados por convección y por radiación pueden ser bastante altos y suponer un riesgo no sólo para el propio edificio sino también para las edificaciones vecinas.



Fig. 4.17. Esquema de los factores que inciden en la propagación del fuego a través de las fachadas. Fuente: elaboración propia basada en un esquema propuesto por Wade, 1995

Las condiciones en la zona exterior de la fachada son favorables a los procesos convectivos que gobiernan la flotabilidad del penacho de fuego. Dada la provisión infinita de oxígeno y la verticalidad de la superficie de la fachada [5] el fuego puede propagarse a través de la superficie de la fachada aún cuando los materiales de revestimiento no alimenten la reacción, es decir, aunque sean incombustibles. El tamaño, la intensidad y la duración de la propagación a través de las ventanas del recinto depende principalmente de factores como: la carga de fuego, el tamaño del recinto, la configuración geométrica de las ventanas y las condiciones de ventilación. Los factores climatológicos tales como la temperatura, la presión, la humedad relativa y el viento también pueden influir en los procesos que determinan el desarrollo y propagación del incendio. De todos estos factores, el viento es posiblemente el más influyente debido a su relación con el factor de ventilación, el cual a su vez tiene una enorme relación con la geometría de las ventanas.

Los riesgos asociados a los materiales combustibles son un importante aspecto a considerar en la propagación exterior del fuego, no solamente en relación a los materiales de los revestimientos y el aislamiento térmico, sino también respecto a todo objeto combustible que se encuentre en las inmediaciones de la fachada, ya sean toldos, tendederos de ropa, elementos de control solar, muebles, etc. Las cortinas (textiles) aunque estén en el interior de los recintos son otro elemento de riesgo, debido a que la rotura de los vidrios de las ventanas [6] es una situación que ocurre casi sin excepción. Normalmente, el flujo de calor emitido por el penacho de fuego es suficientemente alto para provocar la rotura del vidrio común Raes (1978) (citado por Hakkarainen – Oksanen 2002). La penetración del fuego a las plantas superiores a menudo está relacionada con las cortinas de las ventanas.

Por lo general, en los incendios desarrollados en recintos cerrados los procesos de combustión no se llevan a cabo de forma completa dentro de éste debido a la falta de oxígeno. Por ello, una porción de combustible sin quemar fluye con los gases y humos hacia el exterior a través de las ventanas y reaccionan cuando entran en contacto con el oxígeno del aire. Por ello, una importante porción de la combustión tiene lugar fuera del recinto, lo cual aporta mayor volumen e intensidad al penacho de fuego (Goble, 2007: 2).

La propagación del fuego a través de la fachada puede ocurrir fundamentalmente por cuatro vías distintas o por el desarrollo simultáneo de dos o más. Estas vías son:

- (1) Propagación a través de las ventanas, llamado efecto “*leap frog*” (*salto de rana*)
- (2) Propagación a través de la cavidad del encuentro del forjado y la fachada
- (3) Propagación a través de las cámaras ventiladas
- (4) Propagación a través de los revestimientos combustibles

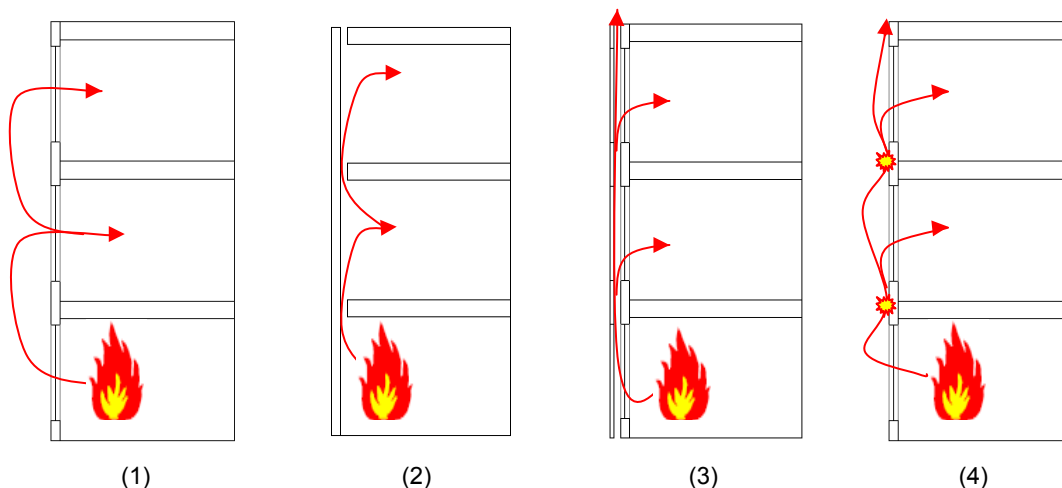


Fig. 4.18 Esquema de las vías de propagación del fuego a través de la fachada.
Fuente: elaboración propia

4.4.1 Propagación del fuego a través de las ventanas o efecto *leap frog*

La propagación a través de las ventanas es considerada por diferentes autores como el mecanismo de propagación de mayor peligrosidad para los edificios de varias plantas [Buchanan 2001], [Mammoser – Battaglia 2004], [Olezskiewicz 1990]. Puede ocurrir a través de cualquier tipo de fachadas aun cuando los revestimientos sean de materiales no combustibles. Como se mencionó antes, en esta zona del edificio convergen factores que facilitan la dinámica del fuego, por tanto éste puede propagarse de forma ascendente a través de fachadas convencionales con revestimientos de materiales incombustibles como el ladrillo o el mortero. Las fachadas convencionales, a efectos de este estudio, se han denominado fachadas opacas convencionales **FOC** (ver apartado 6.1).

El efecto *leap frog* es la capacidad del incendio para propagarse de forma ascendente y secuencial a través de las ventanas de un edificio. Se da como resultado de una intensa emisión de llamas y humo través de las ventanas de un recinto. Normalmente, el flujo de calor proyectado es suficientemente intenso para provocar la rotura de los vidrios de las ventanas de la planta superior; con ello queda servido el riesgo de generar un fuego secundario y continuar con la propagación ascendente.

Generalmente, los objetos ubicados en las inmediaciones de las fachadas sirven de puente para que el fuego penetre en las plantas superiores. Objetos como: cortinas, persianas, toldos, ropa colgada, falsos techos o muebles en general, arden con facilidad acelerando la propagación del fuego. Uno de los peligros asociados a este tipo de propagación es la probabilidad de afectar edificaciones vecinas, lo cual dependerá del tamaño del penacho de fuego y su intensidad. Los distintos factores que pueden influir en esta circunstancia son discutidos a lo largo de este capítulo. El riesgo de la propagación exterior del fuego a través de este mecanismo puede ser minimizado mediante elementos de protección pasiva.

4.4.2 Propagación del fuego a través de la cavidad en el encuentro del forjado y la fachada

Este tipo de propagación tiene lugar en las fachadas ligeras con revestimiento de vidrio mejor conocidas como muros cortina; a efectos de este estudio se han denominado fachadas de vidrio **FV** (ver apartado 6.1). Normalmente se debe a que la solución constructiva para prevenir la propagación del fuego a través de la cavidad del encuentro del forjado y la fachada no ha sido resuelta adecuadamente, por tanto el fuego puede penetrar a través de dicha cavidad hacia las plantas superiores del edificio. Durante la fase de total desarrollo de un incendio se pueden presentar temperaturas que rondan los 1000°C. En dichas condiciones las presiones pueden llegar a ser muy altas y el fuego puede penetrar por cualquier brecha o fisura a la que den lugar las barreras cortafuego, ya sea debido a una baja calidad de ejecución o porque el elemento no tiene las suficientes prestaciones. Algunos errores de este tipo resultan imperceptibles a simple vista y por ello pueden pasar desapercibidos en una supervisión técnica de obra. Conviene prestar especial atención a estos aspectos por insignificantes que parezcan porque pueden repercutir seriamente en la seguridad de la edificación. Los principales riesgos asociados a este tipo de propagación son los siguientes:

(1) El fuego incide directamente sobre las piezas de fijación y los elementos estructurales de la fachada (montantes), lo cual constituye un riesgo por la pérdida de capacidad mecánica de la subestructura y por ende, el posible colapso de secciones de la subestructura de la fachada o el desprendimiento de piezas. Los elementos que conforman la subestructura regularmente son de acero o aluminio. Estos materiales pese a ser incombustibles tienen un comportamiento débil frente al fuego (apartado 4.7.1).

(2) Este tipo de propagación está clasificada como propagación exterior del fuego. No obstante constituye una amenaza directa en el interior del recinto al cual se propaga.

(3) La propagación a través de las cavidades ocurre siempre acompañada de la proyección de llamas a través de las ventanas o efecto *leap frog*. Ello constituye una doble exposición de la fachada a los flujos de calor y por tanto un riesgo significativo en la estabilidad de la fachada si se considera la debilidad termo mecánica de los elementos que conforman la subestructura, y la poca estabilidad frente al fuego que pueden tener los delgados paneles opacos y el vidrio.

En la actualidad el mercado ofrece diversos productos para controlar el paso del fuego en cualquier cavidad que represente un riesgo de propagación vertical (Fig. 4.19). Muchos son materiales específicos altamente resistentes y adecuados para evitar el paso de humos a otras estancias (en el anexo 3 se amplía esta información). Es importante comprobar el tipo de ensayos que avalan sus prestaciones y las instituciones que los certifican. De forma ideal los sistemas de barrera cortafuegos para el encuentro del forjado y la fachada deben contemplar un elemento flexible que permita absorber los movimientos diferenciales causados por fenómenos como el viento o el seísmo. Conviene tener presente que se trata de un punto que vincula dos estructuras de naturaleza constructiva distinta: la estructura del edificio es un elemento rígido, mientras que la fachada es un elemento ligero (Fig. 4.20).

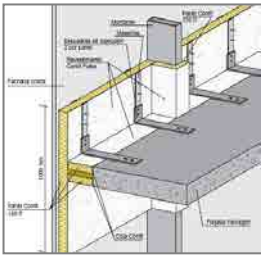
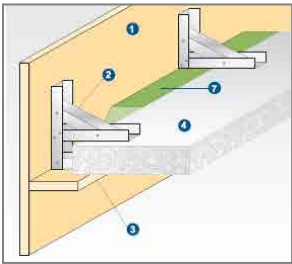
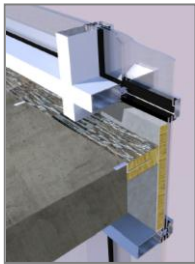
Soluciones constructivas para el encuentro del forjado y la fachada		
		
Paneles a base de lana de roca y revestimiento intumescente	Solución a base de placas de silicatos y lana de roca	Solución basada en una barrera de lana de roca flexible, con revestimiento de lámina de aluminio
Panel Conlit. RF60 Rockwool	Promatec LS RF60 Promat	CW-FS EI 300 Lamatherm probada con la norma BS 476, Part 20 & BS EN 1366-4:2006

Fig. 4.19 Tres ejemplos de soluciones constructivas que ofrece el mercado para el encuentro del forjado y la fachada.

Fuente: Rockwool, Promat, Lamatherm

En EEUU las soluciones constructivas para este punto crítico de los muros cortina deben tener en cuenta además de la flexibilidad y el ajuste de la barrera en la cavidad la aplicación de un sello (por la cara no expuesta al fuego) que evite el paso de humos. Todos los sistemas deben someterse a ensayos como ASTM E2307 ó UL 2079 para obtener la certificación de los organismos competentes para su uso y comercialización (Fig. 4.21). Dicho todo esto y sin restar importancia a la implementación de soluciones idóneas en los puntos críticos de los sistema de muro cortina, la problemática principal frente a la propagación exterior del fuego a través de este tipo de fachadas está relacionada con la configuración y tamaño de las ventanas (ver apartados 6.5.1-6.5.2).

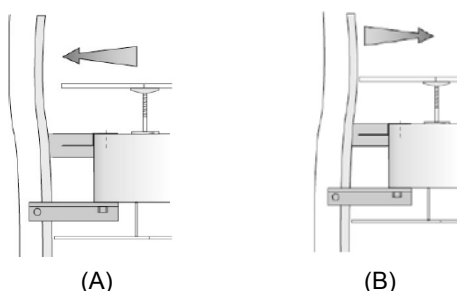


Fig. 4.20 Los elementos cortafuego situados en el encuentro del forjado y la fachada deben ser flexibles para soportar cargas de viento. (A) Carga de viento negativa (B) Carga de viento positiva
Fuente: Lamatherm curtain walling firestop

Detalle constructivo para la cavidad del encuentro del forjado y la fachada		
	<p>1</p> <p>horizontal fiber</p> <p>vertical fiber</p> <p>Colocación correcta.</p>	<p>2</p> <p>Sello especial spray elastomérico.</p>
<p>Hilti Firestopssystem: system N°. CEJ-307-P t-rating (Temperatura en la cara no expuesta) 1-3/4 hrs f-rating (Resistencia a la propagación) 3 hrs. l-rating (Integridad y aislamiento) 1 scfm/lf</p> <p>Detalle certificado por UL 2079 (Underwriters Laboratories) Cada sistema de muro cortina debe cumplir con unas especificaciones concretas.</p>	<p>Hay dos aspectos fundamentales para la correcta ejecución del detalle constructivo:</p> <p>(1) Cuidar que la orientación de la fibra de lana mineral sea perpendicular al forjado para garantizar que absorbe los movimientos de la fachada y permanece ajustada en la cavidad. (2) Aplicar un sello especial para evitar el paso del humo y los gases calientes.</p>	
<p>Elementos básicos del detalle constructivo: Refuerzo de los elementos estructurales y los paneles de protección de la franja (2E-2F-2G). Protección de los montantes principales de la estructura (2-J). Franja de protección de paneles resistentes mínimo 50 mm de espesor. Sellado en todas las juntas (2I). Barrera perimetral cortafuego de lana mineral de mínimo 100 mm de espesor, comprimida un 33% de su ancho nominal para asegurar su ajuste (3A). Aplicación (rociada o pulverizada) de película elastomérica de 1/8-pul de espesor sobre la barrera de lana mineral (3B).</p> <p>Nota: En el anexo 3 de documento se amplía la información referente a productos y soluciones constructivas.</p>		

Fig. 4.21 Detalle constructivo para el encuentro del forjado y la fachada.
Solución certificada por Underwriters Laboratories (UL) EEUU.
Fuente: Hilti Firestopssystem - International Firestop Council (IFC)

4.4.3 Propagación del fuego a través de las cámaras ventiladas

Este tipo de propagación ocurre en las fachadas con cámara ventilada que carecen de elementos de compartimentación capaces de impedir el paso del fuego (Fig. 4.22 a Fig. 4.24). Esta tipología de fachadas se caracteriza por tener diversos acabados de revestimiento, los cuales pueden tener un mayor o menor grado de combustibilidad según el caso. Los aspectos relacionados con los materiales de revestimiento combustible se tratan en la sección siguiente.

La propagación a través de las cámaras ventiladas es sin duda la vía de propagación del fuego más rápida de las cuatro que se mencionan. Las fachadas con cámara ventilada, a efectos de este estudio, se han denominado fachadas opacas ventiladas **FOV** (ver apartado 6.1). Este tipo de fachadas se caracteriza por las grandes ventajas higrotérmicas que aporta el tiro de aire natural que circula por la cámara gracias al efecto chimenea. Sin embargo, en una situación de incendio, este mecanismo se convierte en un factor desfavorable ya que potencia la propagación del fuego.

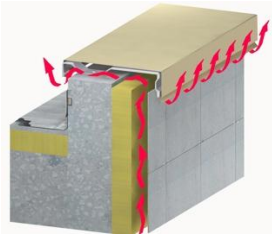
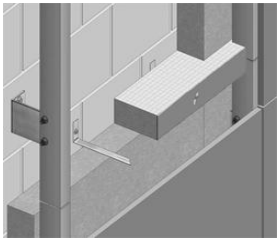
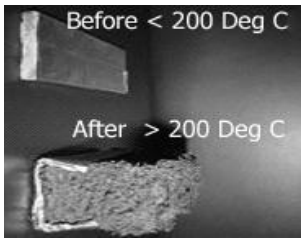
Barreras cortafuegos para compartimentar cámaras ventiladas		
 <p>(A)</p>	 <p>(B)</p>	 <p>(C)</p>
<p>La carpintería de las ventanas es una vía de penetración del fuego a la cámara ventilada. Si la cámara no está compartimentada el fuego se propagará a través de la cámara.</p>	<p>Sistema de compartimentación a base de lana de roca y capa de material intumescente. Lamatherm barrera cortafuego http://www.siderise.co.uk</p>	<p>El material intumescente se hincha en contacto con altas temperaturas, cerrando el paso a la ventilación de la cámara e impidiendo el paso del fuego.</p>

Fig. 4.22 Compartimentación de la cámara ventilada.
Es un aspecto fundamental para evitar la propagación del fuego a través de ésta en caso de incendio.
Fuente: (A) <http://www.fireus.co.uk> (B) <http://www.siderise.co.uk>

Los principales riesgos asociados a este tipo de propagación son los siguientes:

(1) El aislamiento térmico es una de las capas que conforma este sistema de fachada, usualmente va alojado dentro de la cámara y en contacto con la ventilación. Si el material empleado es combustible (lo cual ocurre con regularidad) la propagación a través de la cámara puede ser mucho más intensa. (2) La subestructura de la fachada queda expuesta a la incidencia directa del fuego que se propaga a través de la cámara ventilada. Lo cual da lugar a un riesgo de colapso total o parcial de la subestructura y caída de las placas del revestimiento. Los elementos que conforman la subestructura

(montantes y travesaños) normalmente son de aluminio y este material funde a temperaturas relativamente bajas (566-650°C), si se consideran las condiciones típicas de los incendios comunes.

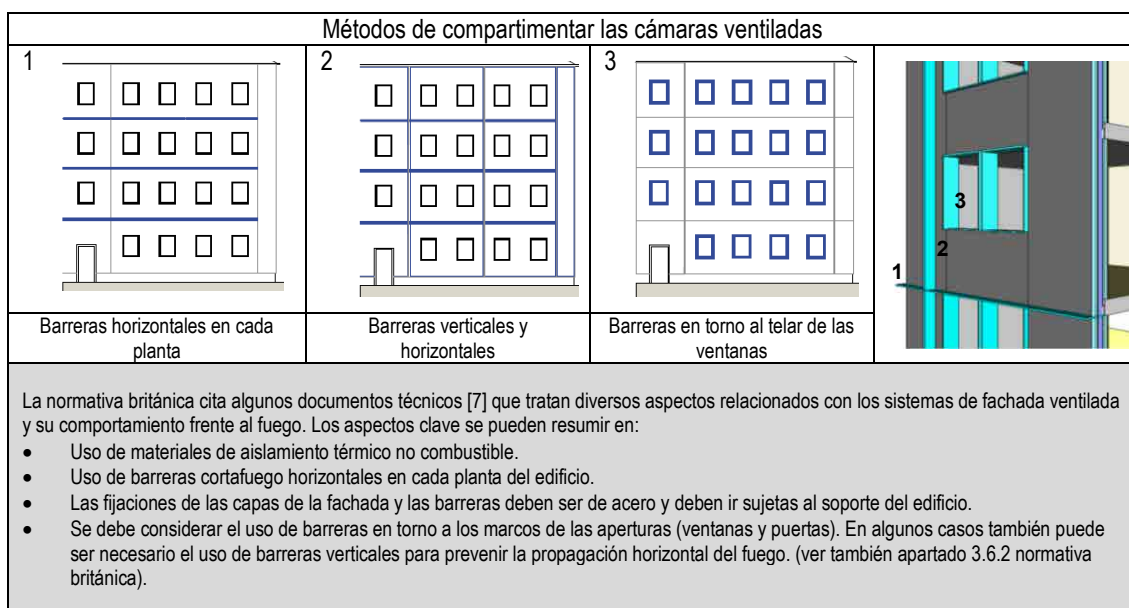


Fig. 4.23 Diferentes métodos de compartimentar las cámaras ventiladas.

Fuente: TES EnergyFacade, woodwisdom net, 2008 - 2009

Gráfico de detalle de la fachada realizado por la autora para la fase experimental (Capítulo 6).

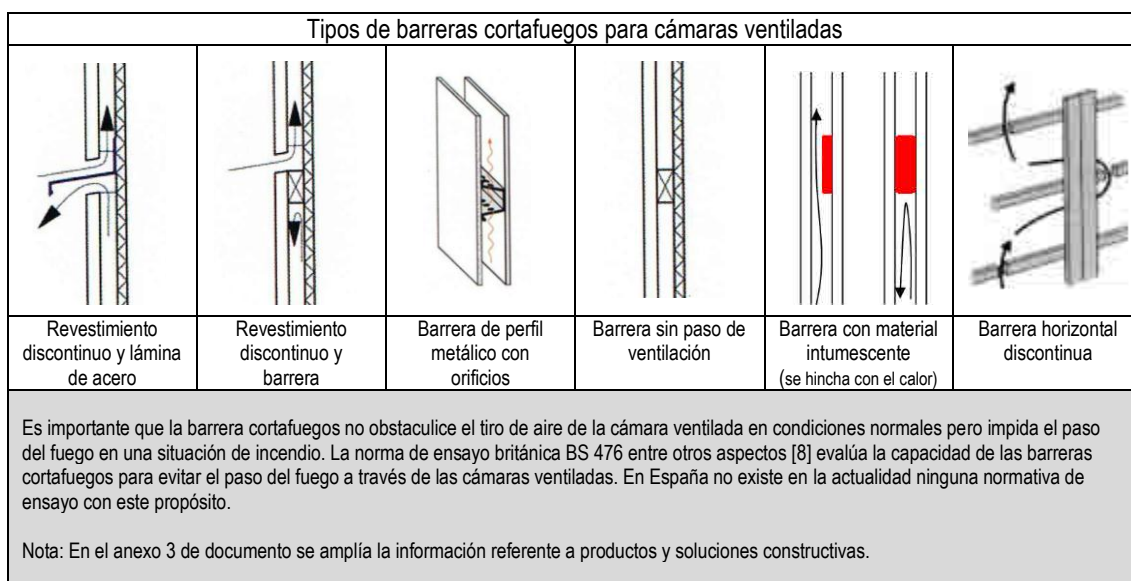


Fig. 4.24 Diferentes tipos de barreras cortafuegos para cámaras ventiladas.

Fuente: Fire Safety in timber buildings, Technical guideline for Europe. Östman et al., 2010

(3) Una vez se inicia la descarga de las llamas a través de las ventanas, parte de la propagación se produce por el exterior por efecto *leap frog*. Luego, cuando el fuego penetra en la cámara ventilada la propagación ocurre por las dos vías. La propagación a través de la cámara puede ser de 5 a 10 veces mayor a la propagación exterior

[Colwell – Martin 2003] (Fig. 4.25). Si las carpinterías de las ventanas no tienen incorporado algún sistema para contener el fuego pueden ser una ruta fácil para que el fuego penetre a la cámara (Fig. 4.22A), más aún teniendo en cuenta que normalmente son de aluminio o PVC.

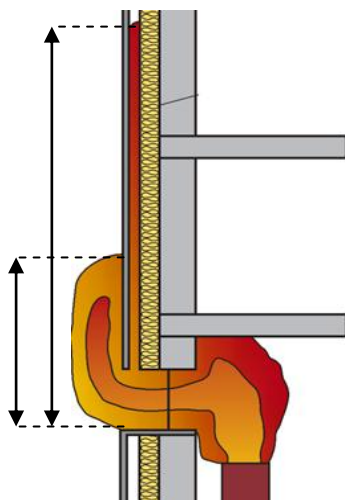


Fig. 4.25 El fuego se propaga paralelamente a través de las ventanas y la cámara ventilada. La altura de las llamas en la cámara puede ser de 5 a 10 veces mayor.

Fuente: Colwell – Martin, 2003

4.4.4 Propagación del fuego a través de los revestimientos combustibles

Los revestimientos combustibles pueden dar lugar a una situación de incendio rápida y de gran intensidad capaz de emitir una radiación muy elevada. Las propiedades químicas y térmicas de los materiales son muy importantes, algunos materiales combustibles pueden también generar humos tóxicos, desprender partes de material o gotas incandescentes durante su proceso de degradación.

El calor transmitido por el penacho de fuego precalienta la superficie de la fachada, acelerando los procesos de pirólisis y la velocidad de propagación de la llama. La transmisión de calor se hace mucho más efectiva debido a la elevada velocidad de cesión del calor *HRR* que ocurre por la combustión de un material con un alto poder calórico. Esta situación, entre otros aspectos, representa un peligro mayor para los equipos de rescate y extinción. Los principales riesgos asociados a este tipo de propagación son los siguientes:

(1) El riesgo de propagación del fuego a otras edificaciones es elevado debido a que al flujo de calor del penacho que emerge de las ventanas se suma la radiación emitida por una superficie que entra en combustión. También el riesgo de propagación a las plantas superiores es mayor.

(2) Algunos paneles de revestimiento presentan riesgo de propagación aun cuando su capa exterior sea de un material incombustible, es el caso de los paneles *sandwich* de aluminio. El problema radica en que el núcleo del panel está constituido por una placa de aislamiento térmico combustible. Si la capa de aluminio colapsa por acción del fuego o presenta algún orificio debido a las uniones mecánicas (uniones con tornillos) habrá una gran posibilidad de que el fuego se propague a través del núcleo del panel.

Las cuatro vías de propagación del fuego que se han expuesto están relacionadas con el diseño de las fachadas. Los sistemas constructivos y los elementos que forman parte de las fachadas configuran la geometría que las define.

4.5 Efecto de la configuración geométrica de las fachadas

El factor geométrico es inherente a la edificación. Es un concepto amplio relacionado con distintos elementos que conforman el edificio y su contenido. Según se ha visto en el apartado 4.1.6 todo desarrollo geométrico tiene una implicación mayor o menor en la dinámica del fuego. Desde la forma y volumen del recinto, la geometría y distribución de los elementos combustibles contenidos en el incendio (muebles y enseres) hasta la configuración de las ventanas. Del mismo modo que la configuración geométrica puede favorecer la propagación del fuego a través de la fachada, puede emplearse para revertir los efectos de la propagación. La disposición idónea de superficies o elementos constructivos puede ser útil para controlar la propagación del fuego o minimizar sus efectos. Es lo que se conoce como medidas de protección pasiva y su objetivo es reducir el peligro del incendio, evitando en primer término que el incendio se produzca, y si se produce, evitando que se extienda. La reducción de la propagación exterior del fuego es muy importante porque permite a los equipos de rescate disponer de más tiempo para realizar las labores de evacuación de los ocupantes y de control de la propagación.

Diversas investigaciones constituyen una base de conocimiento sobre este aspecto de tanto interés en el diseño de las fachadas. Los estudios llevados a cabo se han centrado en tres aspectos principales:

- (1) los elementos verticales (franjas)
- (2) los elementos salientes horizontales (aleros y balcones)
- (3) la configuración geométrica de las ventanas

- **Elementos verticales (franjias) y elementos salientes horizontales (aleros)**

Las primeras investigaciones centradas en el factor geométrico de las fachadas fueron realizadas por Yokoi (1960). Sus hallazgos trascendieron en su día al ámbito normativo de Japón y han servido de referente principal en diversas investigaciones posteriores. A partir de las publicaciones de Yokoi se consideró la importancia de incorporar elementos verticales o franjas para separar las ventanas de una planta a otra con el propósito de reducir el riesgo de propagación a través de las ventanas. Esta medida se hizo extensiva a los códigos de protección contra incendios en diferentes países incluida España.

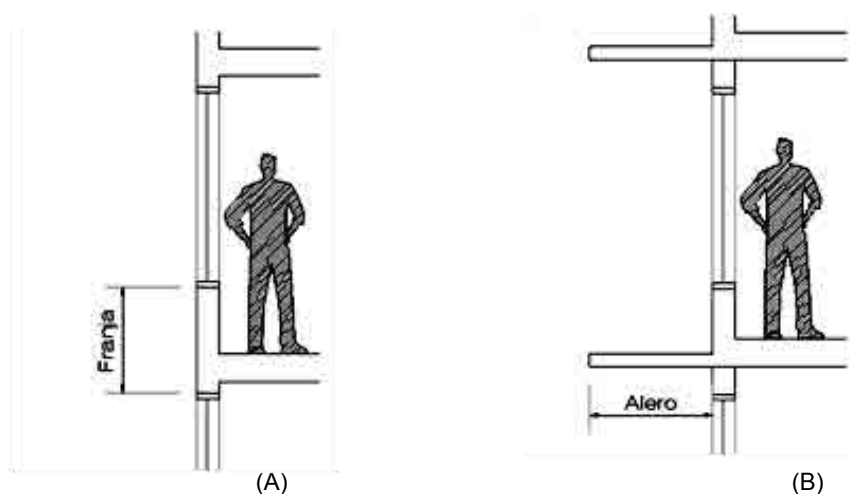


Fig. 4.26 (A) Elemento vertical de protección (franja)
(B) Elemento saliente horizontal (alero, balcón etc.).

Fuente: elaboración propia

Los elementos de protección verticales (franjias) son antepechos resistentes al fuego e incombustibles. Estos elementos aunque mitigan la incidencia directa del fuego sobre las plantas superiores no limitan la propagación vertical del fuego. Por tanto, aunque una fachada disponga de franjas las llamas pueden transmitir un flujo de calor suficiente para romper los vidrios de las ventanas y penetrar a plantas superiores a través de las ventanas. El efecto de los elementos salientes horizontales (aleros) es muy diferente. Éstos literalmente se interponen al paso del fuego, generando un cambio en la trayectoria del penacho. Este tipo de elementos, siempre que estén constituidos por materiales no combustibles, reducen significativamente el riesgo de propagación vertical del fuego y la transferencia de calor sobre la fachada. El efecto de los elementos salientes ha sido ampliamente estudiado por distintos autores según se explica en el apartado 2.1.

La Fig. 4.27A muestra la comparativa gráfica del efecto del alero respecto a la franja vertical según los experimentos realizados por Oleszkiewicz (1991) en prototipos a escala real. La Fig. 4.27B recoge los datos de ensayos realizados con diferentes tamaños de alero. El dato de referencia corresponde al flujo de calor tomado a 1 m sobre la ventana por la cual se propaga el fuego.

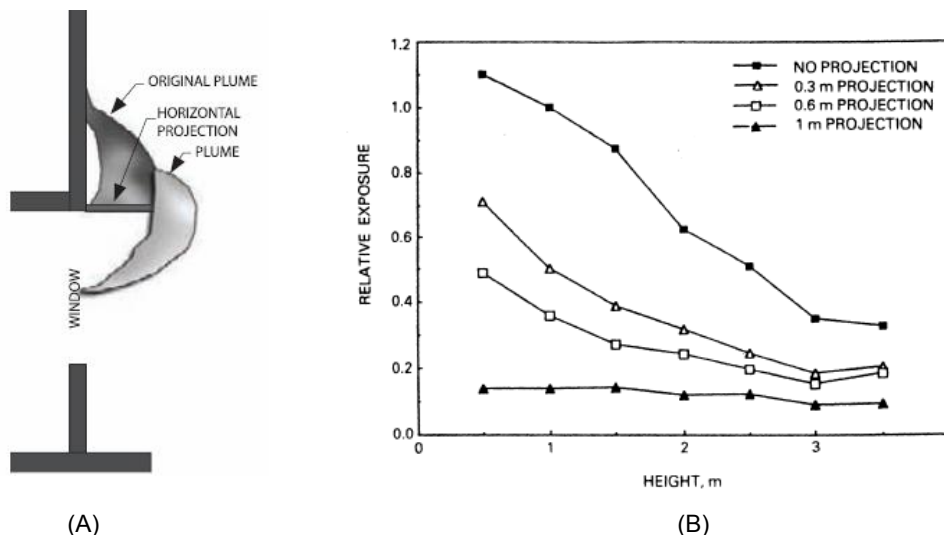


Fig. 4.27 (A) Esquema comparativo del efecto de la franja y el alero
 (B) Datos del flujo de calor de diferentes tamaños de alero respecto a la franja.
 Fuente: Oleszkiewicz, 1991

De acuerdo a este estudio el autor concluye que para que una franja ofrezca un nivel equivalente de protección respecto al alero sería necesario un tamaño de la franja poco práctico, teniendo en cuenta que los resultados indicaron que se alcanza un nivel de protección equivalente con un alero de 30 cm y una franja de 2,50 m.

Por otro lado cuando la dimensión del elemento saliente no es suficiente, la trayectoria del penacho tiende a curvarse hacia la fachada incidiendo sobre ésta [Law – O'Brien 1981] (Fig. 4.28). En esta situación, aunque el alero cambie la trayectoria del penacho podría emitir suficiente calor como para que un material combustible entre en ignición [Hakkarainen – Oksanen 2002]. La información referente al tamaño idóneo de los elementos salientes es algo dispersa, lo cual resulta lógico si se tiene en cuenta que las condiciones, parámetros y medios empleados en cada investigación son muy diferentes. En general, se puede considerar que todo elemento saliente con una profundidad adecuada (superior a 75 cm) podría ofrecer una sustancial protección a la superficie de las plantas superiores en caso de propagación exterior del fuego [Oleszkiewicz 1990].

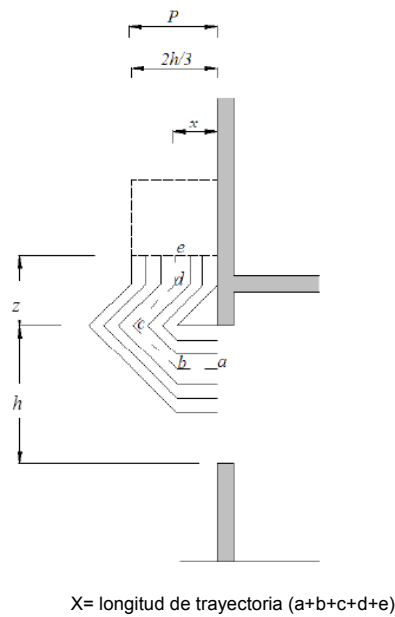


Fig. 4.28 Trayectoria del penacho de fuego con un alero pequeño. Law – O'Brien (1981).
Fuente: Goble, 2007

Otro tipo de elementos salientes que tiene un efecto muy diferente a los aleros, lo constituyen los elementos salientes verticales. Oleszkiewicz estudió mediante un prototipo a escala real este tipo de elementos. Dispuso un elemento de 1,22 m a cada lado de las ventanas a lo largo de la fachada. El efecto de estos elementos es claramente desfavorable teniendo en cuenta que potencian la propagación del fuego sirviendo de canal a lo largo de la fachada.

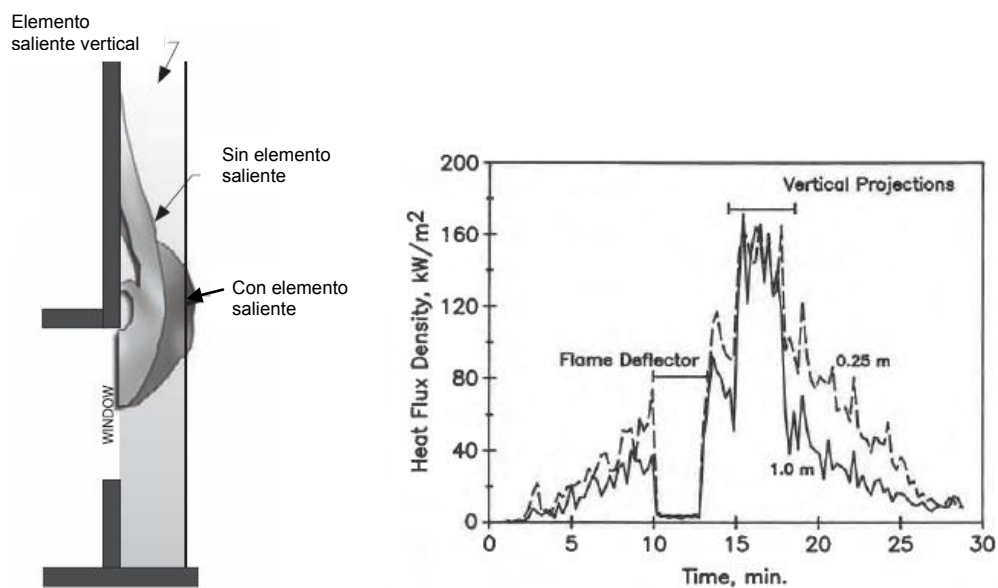
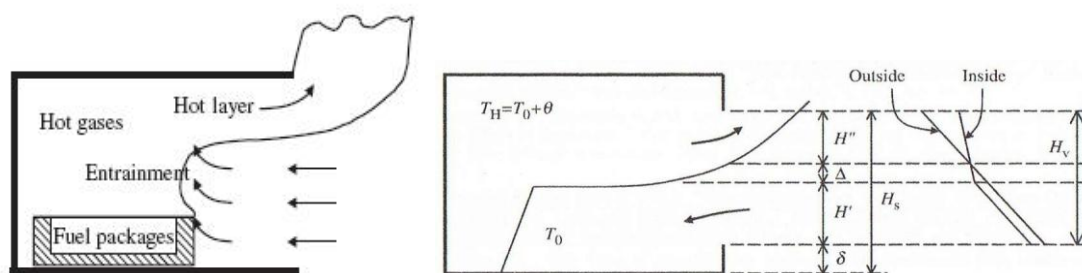


Fig. 4.29 (A) Efecto de los elementos salientes verticales sobre el penacho de fuego
(B) Datos de la densidad de flujo de calor incorporando dos tipos de elementos:
alero (10-13 min) elementos salientes verticales (15-18 min).
Fuente: Oleszkiewicz, 1990

En la Fig. 4.29A se aprecia un esquema que representa el perfil del penacho de fuego sin elementos salientes respecto al penacho con los elementos salientes verticales. La Fig. 4.29B muestra la curva que refleja los datos comparativos de la densidad de flujo de calor con la incorporación de dos elementos distintos: un alero (10-13 minutos) y posteriormente de los elementos salientes verticales (15-18 minutos). Los datos son tomados a una distancia de 1 m sobre la ventana por la cual se propagan las llamas. Con el alero se aprecia que el flujo de calor sobre la ventana decrece en un 90% mientras que con los elementos verticales crece en un 50%. Es un ejemplo que refleja el papel de la configuración geométrica en la trayectoria del fuego. Los elementos básicos que se estudian son una representación de los elementos reales que pueden formar parte del diseño de una fachada.

4.5.1 Geometría de las ventanas

La geometría de las ventanas es de suma importancia en todos los procesos que tienen lugar antes y durante la propagación del incendio. Su influencia viene definida por el factor de ventilación y el parámetro geométrico de apertura expresado con la ecuación [4.5]. Una vez alcanzada la fase *flashover* en un recinto, el fuego inicia su propagación a través de las ventanas. De forma paralela a la descarga de las llamas se produce un arrastre de flujo de aire hacia el interior del recinto, el cual es provocado por la diferencia de presiones que se generan por los procesos físico-químicos del incendio. El volumen de aire inducido (factor de ventilación) dependerá en gran medida del tamaño de la ventana (factor de apertura) [Ee H. Yii et al. 2007].



- H_v = altura de la ventana
- H'' = altura desde el plano neutro hasta el dintel
- H' = espesor de la capa inferior fría del interior
- Δ = es la distancia desde la interface entre las dos capas al plano neutro
- δ = es la altura del alféizar
- T_0 = es la temperatura ambiente
- T_H = es la temperatura de la capa superior caliente
- θ = es la diferencial de temperatura entre la capa inferior fría y la capa superior caliente.

Fig. 4.30 Esquemas de la capa caliente emergente y el flujo de aire frío inducido. Thomas (1972).
Fuente: Ee H. Yii et al., 2007

Como se ha visto en el apartado 4.1.6 el factor de ventilación influye significativamente en el desarrollo del incendio, lo cual lleva a considerar que afecta también el comportamiento del penacho de fuego proyectado por la ventana ya que son procesos que están fuertemente relacionados. Se puede decir que las ventanas tienen un doble efecto en la propagación del fuego: por un lado debido a la cantidad de aire que fluye al recinto afectando el comportamiento del incendio, y por otro, porque su proporción geométrica determina la forma y trayectoria del penacho que emerge a través de estas.

Respecto a la influencia de la geometría de las ventanas sobre el comportamiento del penacho parece existir un amplio consenso entre distintas investigaciones de referencia. Se considera que en las ventanas grandes y anchas el penacho de fuego se propaga más ceñido a la superficie, mientras que en las ventanas pequeñas y estrechas o en ventanas cuadradas pequeñas el penacho tiende a proyectarse más alejado de la fachada [Yokoi 1960], [Law – O'Brien 1981], [Oleszkiewicz 1990], [Drysedale 1998], [Patterson 1998]. Por tanto, se considera que el riesgo de propagación es menor en las ventanas pequeñas y que una forma de reducir el riesgo de la propagación exterior del fuego es controlando el tamaño de las aperturas.

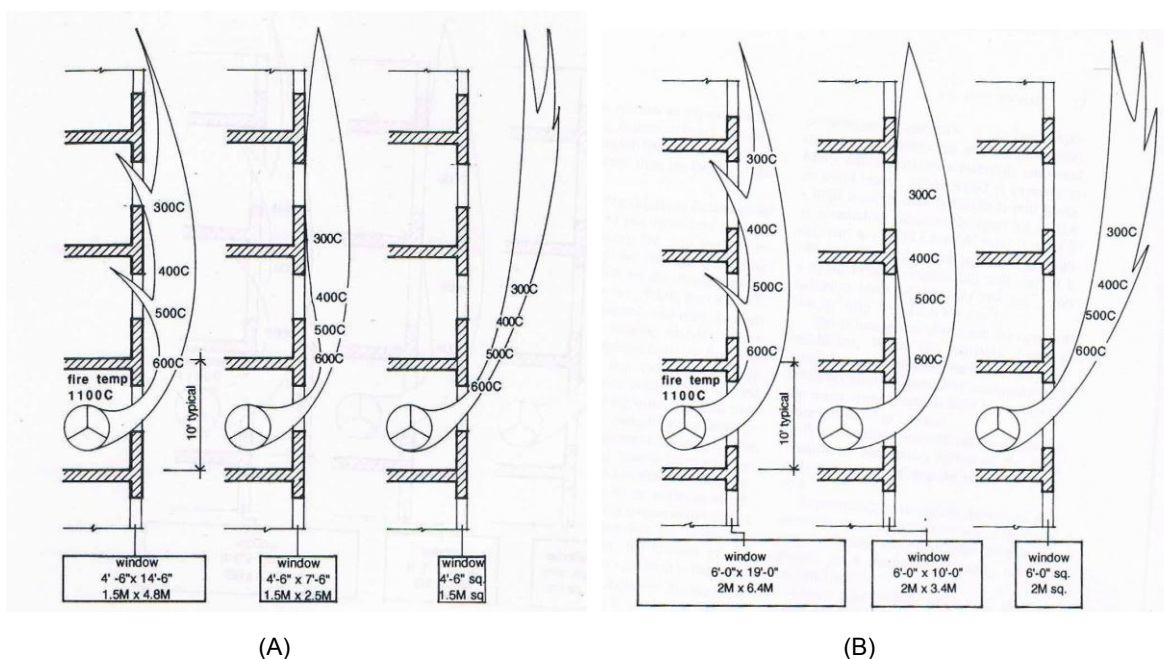


Fig. 4.31 Relación del tamaño y forma de las ventanas con el comportamiento del penacho de fuego.
 (A) Ventanas de distintos anchos y 1,50 m (h) (B) Ventanas de distintos anchos y 2,0 m (h).
 Fuente: Patterson, 1993

Los riesgos asociados a la propagación vertical del fuego se incrementan a medida que aumenta el tamaño de las ventanas. La densidad de flujo de calor y el tamaño de

las llamas son proporcionales a las ventanas por las cuales se proyectan. En los gráficos Fig. 4.31 Patterson (1993) hace referencia a la influencia de la configuración de las ventanas sobre la propagación del fuego. Muestra la trayectoria, tamaño y posible distribución de las temperaturas del penacho de fuego partiendo de una temperatura de 1100°C en el recinto de origen del incendio. Se trata de esquemas basados en análisis teóricos de la situación. En la Fig. 4.32 el mismo autor ilustra la trayectoria del penacho de fuego en relación a la forma de las ventanas.

El efecto de la geometría de las ventanas sobre el comportamiento del fuego puede explicarse al analizar la función de los mecanismos de transferencia de calor, los cuales por efecto de la geometría tienen un comportamiento diferenciado.

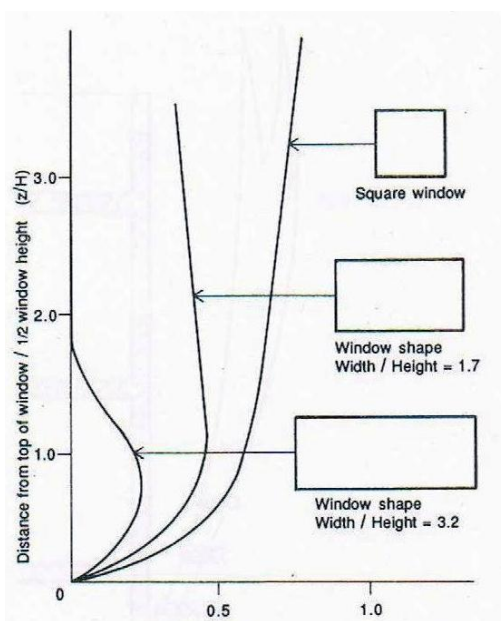


Fig. 4.32 Trayectoria del penacho de fuego en relación a la forma de la ventana por la cual emerge.
Fuente: Patterson, 1993

Oleszkiewicz (1990) realizó ensayos en prototipos a escala real para analizar la forma de las ventanas. En ellos observó diferencias importantes en los flujos de calor radiante y convectivo en virtud de la forma de las ventanas. En una ventana de forma cuadrada (1,13 m) el flujo de calor predominante fue el flujo radiante, mientras que en una ventana de forma alargada y alta (0,69 x 1,50 m) el flujo de calor predominante fue el convectivo (Fig. 4.33). Esto explica por qué en el primer caso el penacho del fuego tiende a estar acoplado a la superficie y en el segundo es más fluctuante.

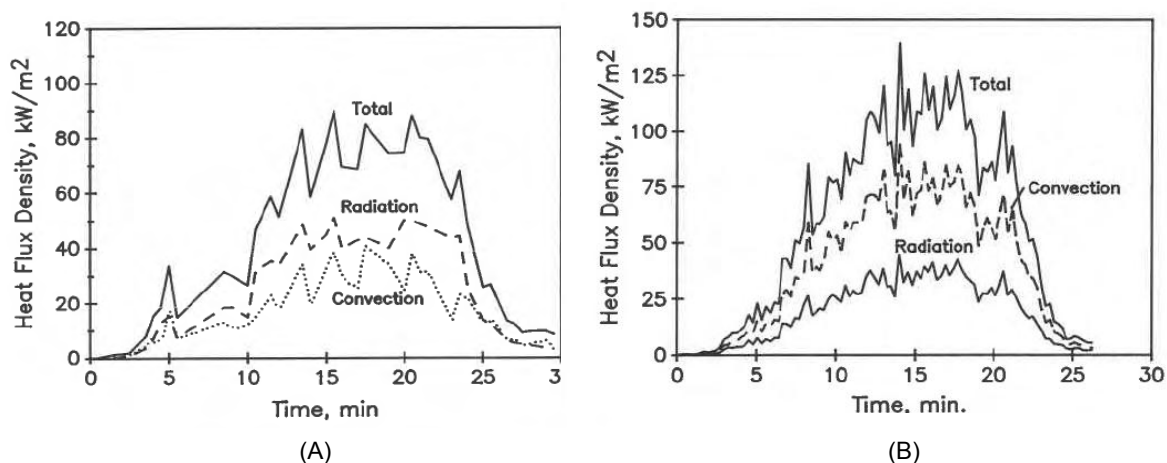


Fig. 4.33 Datos de transferencia de calor tomados a 25 cm arriba de la ventana.
 (A) Ventana cuadrada (1,13 m) (B) Ventana estrecha y alta (0,69 x 1,50 m).
 Fuente: Olezkiewicz, 1990

4.5.2 Comportamiento del penacho de fuego

Tiro natural y tiro forzado

Las condiciones de ventilación tienen una gran influencia en el comportamiento del penacho de fuego. En función de este aspecto, el penacho puede presentar significativas variaciones en su tamaño, forma, altura y trayectoria.

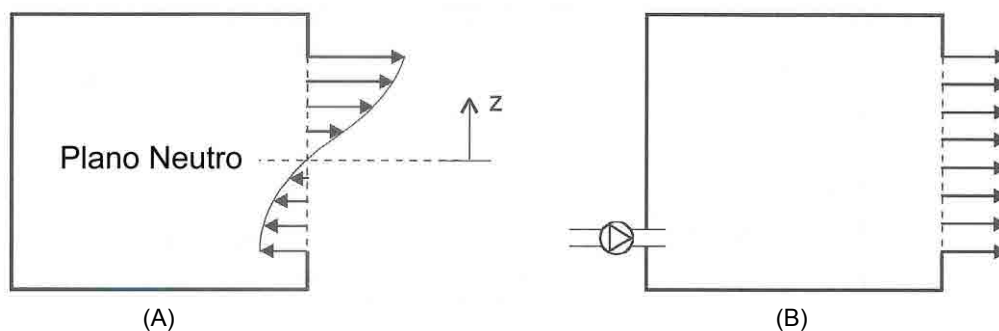


Fig. 4.34 Esquema de los flujos de ventilación típicos.
 (A) Tiro natural (B) Tiro forzado. Karlsson – Quitiere (1999)
 Fuente: Alvear et al., 2007

La información de referencia sobre estos aspectos se basa en los estudios realizados por M. Law (1978). Ella estudió este factor considerando dos situaciones distintas:

(1) condiciones de tiro natural, en la cual el flujo de aire depende del tamaño del recinto y de las ventanas y (2) condiciones de tiro forzado (Fig. 4.34), en donde se aporta un flujo extra de ventilación. Esta aportación de aire puede ser el equivalente a una ventilación cruzada generada por una puerta o una ventana abierta. Se considera

que en condiciones de tiro natural las llamas que emergen a través de las ventanas ocupan las dos terceras partes superiores de la ventana. El aire frío fluye hacia el recinto a través de la parte restante, es decir, por debajo del plano neutro. En condiciones de flujo forzado, el flujo de calor que emerge a través de las ventanas tiende a ocupar la totalidad de las ventanas (Fig. 4.35 y Fig. 4.36).

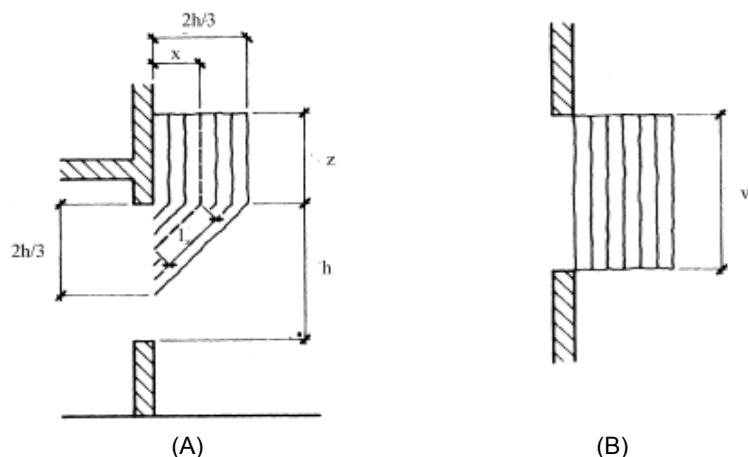


Fig. 4.35 Trayectoria del penacho en condiciones de tiro natural. Law (1978).
 (A) Sección (B) Planta.
 Fuente: Nyuk, 2000

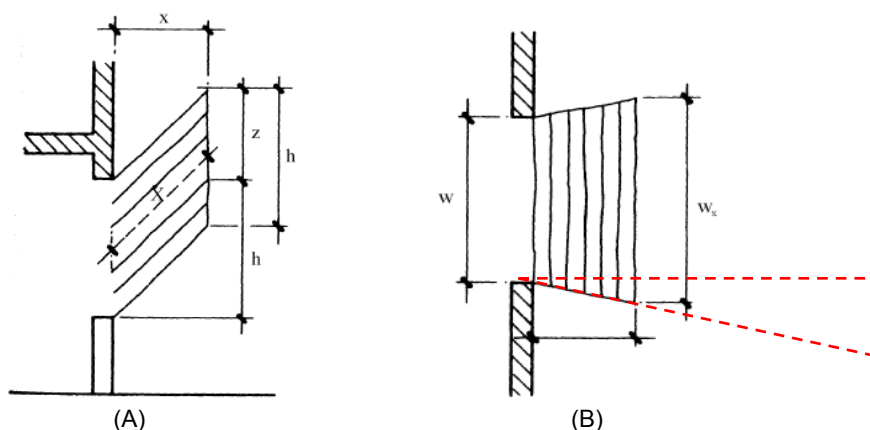


Fig. 4.36 Trayectoria del penacho en condiciones de tiro forzado. Law (1978).
 (A) Sección (B) Planta.
 Fuente: Nyuk, 2000

En condiciones de flujo forzado los efectos de la flotabilidad y las turbulencias son menos significativos y las llamas toman carácter de chorro Siegel (1969) (citado por Nyuk 2000:18). Esto afecta el tamaño y la dirección del penacho puesto que asume la trayectoria marcada por la dirección de la ventilación. Se considera que las temperaturas del penacho en la zona de la ventana han de ser inferiores en condiciones de flujo forzado. El ancho del penacho en condiciones de flujo natural es el mismo de la ventana, mientras que en condiciones de flujo forzado el ancho excede el tamaño de la abertura de la ventana. En la Fig. 4.36B se aprecia la correlación de

este efecto. El promedio del ángulo de ampliación es de 11°. Por lo tanto, el ancho máximo de la llama, W_x de la proyección en condiciones de tiro forzado se daría por:

$$W_x = W + 0,40\chi \quad [4.6]$$

Donde:

W = es el ancho de la ventana y

X = la distancia a la que se mide

El ancho del penacho puede aumentar también por la presencia de un alero, por ello se sugiere que siempre que se dispongan este tipo de elementos se tenga en cuenta que deben exceder el tamaño de la ventana de acuerdo a la fórmula anterior.

A partir de los estudios realizados por Law, el tamaño del perfil del penacho de fuego se consideraba uniforme. Oleszkiewicz (1990) en virtud de sus ensayos a escala real corrigió esta descripción. Determinó que el penacho en el umbral de la ventana ocupa las dos terceras partes y tiene un ancho proporcional, pero hacia la punta calculó una reducción del flujo de calor, con lo cual la configuración del penacho toma cierta forma triangular (Fig. 4.37).

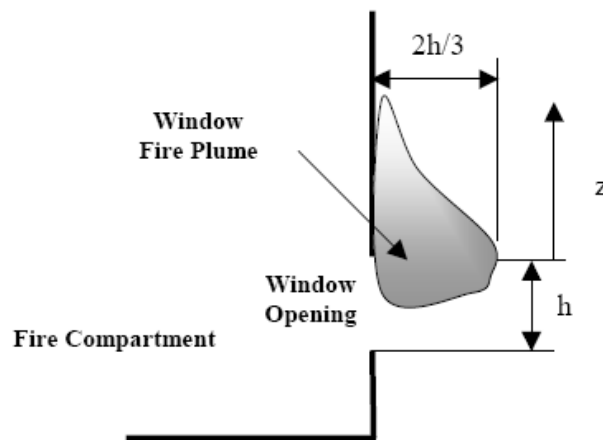


Fig. 4.37 Forma asumida por el penacho que emerge a través de las ventanas. Oleszkiewicz 1990.
Fuente: Nyuk, 2000

Durante la propagación a través de las fachadas ocurren numerosos procesos convectivos (mezcla de gases calientes y fríos): es por ello que el fuego se propaga a través de las superficies verticales aun cuando el material de revestimiento sea incombustible. El tamaño de las llamas puede ser un 30% mayor cuando dispone de una superficie de propagación (Fig. 4.38). Esto ocurre por el efecto conjunto de la superficie que limita el penacho de fuego y el aire que entra en el penacho

favoreciendo los procesos de flotabilidad Delichatsios (2002) (citado por Goble, 2007: 72).

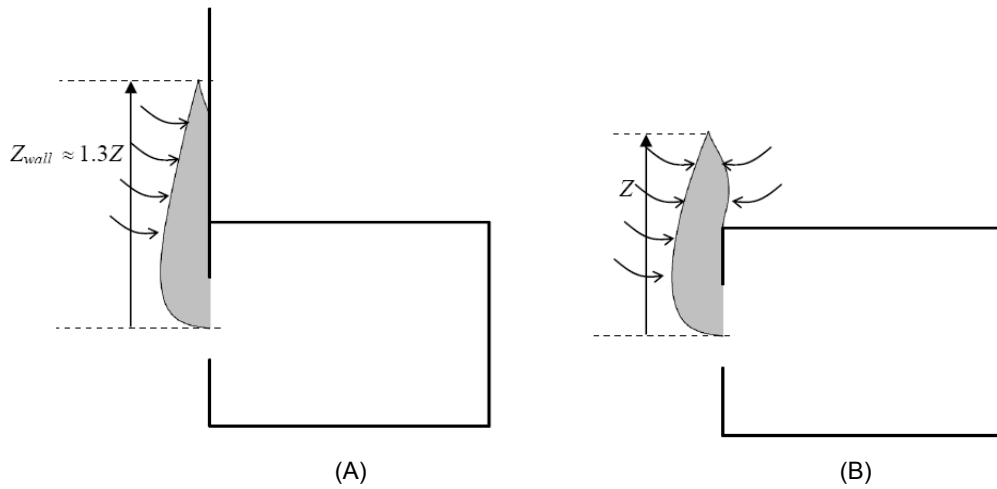


Fig. 4.38 Esquema que describe el comportamiento del penacho de fuego.
 (A) Con superficie arriba de la ventana (B) Sin superficie arriba de la ventana
 (p. ej. la última planta de un edificio).
 Fuente: Goble, 2007

4.6 Efecto chimenea

El efecto chimenea es el movimiento natural ascendente del aire a través del edificio que ocurre por la diferencia de temperatura y densidad entre el aire del interior y del exterior de un edificio. Normalmente se asume que el aire en el exterior del edificio es más frío que en el interior y por tanto la presión es mayor en el exterior (el aire frío es más denso). Al entrar el aire frío al edificio a través de las ventanas y puertas impulsa el aire del interior (más caliente y menos denso) hacia arriba. En una situación de incendio lo que ocurre es que al ser aún mayor la diferencia de temperaturas este movimiento ascendente del aire es más acusado. Cuando la temperatura del aire exterior es más alta que en el interior del edificio el movimiento del aire se invierte y ocurre un “efecto chimenea inverso”.

En algún lugar cerca de la mitad del edificio hay un nivel en el que la presión interior y exterior es la misma, esto es llamado el plano neutro. Tener una estimación de la altura del plano neutro es fundamental en el análisis y control del movimiento de los humos. La posición del plano neutro depende principalmente de la temperatura de los gases y de las dimensiones de las aberturas. Su posición también puede variar de acuerdo a la velocidad a la que crece el incendio. De manera aproximada se estima que para edificios altos el plano neutro se encuentra en la mitad del edificio considerando una caja con una sola abertura cerca de la parte inferior y otra en la

parte superior. La Fig. 4.39 muestra las presiones generales y el movimiento del aire ocasionados por el efecto chimenea en un edificio. Teniendo en cuenta que el movimiento del aire (en la gran mayoría de los casos) es ascendente, los incendios que ocurren por debajo del plano neutro suponen mayores inconvenientes que aquellos que se dan por encima de éste, debido a la circulación de los humos (Fig. 4.40).

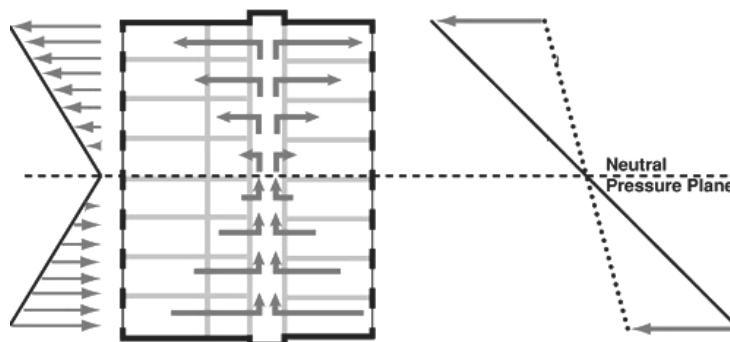


Fig. 4.39 Flujos internos de aire por efecto chimenea y presiones.
Fuente: www.buildingscience.com/

Las mayores presiones se producen en la parte superior del edificio y por ello las zonas altas del edificio pueden estar más amenazadas incluso que aquellas ubicadas más cerca del fuego [Fitzgerald 2004]. Los pisos cerca del plano de presión neutra presentan acumulación de humo, pero en una proporción muy inferior a la que ocurre en la parte alta del edificio.

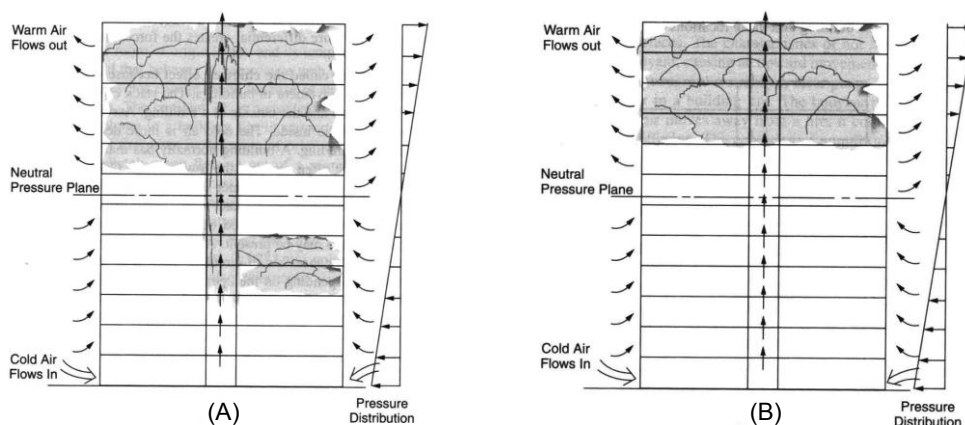


Fig. 4.40 Movimiento de los humos en el edificio. (A) Incendio por debajo del plano neutro
(B) Incendio por encima del plano neutro.
Fuente: Fitzgerald, 2004

La mayor parte de los movimientos naturales del aire en el interior de los edificios en condiciones normales obedece al efecto chimenea. Por ello este mecanismo es responsable de la distribución del humo y los gases tóxicos durante un incendio. El efecto chimenea genera fuerzas capaces de desplazar importantes volúmenes de

humo a través de las cajas de escaleras, de ascensores y todo ducto vertical de instalaciones. El estudio de este efecto es muy importante en el análisis del movimiento de los humos en la edificación y más aún cuando se trata de edificios altos, donde su efecto puede ser mayor por el aumento de la presión y por acción del viento.

En relación al tema que nos ocupa, la importancia del efecto chimenea radica en su capacidad de potenciar la propagación vertical del fuego a través de las cámaras ventiladas o las interfaces de las fachadas de doble piel. Tal como se ha indicado antes, este movimiento ascendente opera de forma natural por la diferencia de temperaturas y presiones entre el interior y el exterior. En el caso de una cámara ventilada estas diferencias son mayores debido a su tamaño, por ello el efecto del tiro de aire en una cámara ventilada es tan acusado. La diferencia de presiones en este caso es notablemente superior, lo cual es positivo en términos de confort térmico y control de las condensaciones, pero muy desfavorable en caso de incendio (ver apartados 4.4 y 6.5.2).

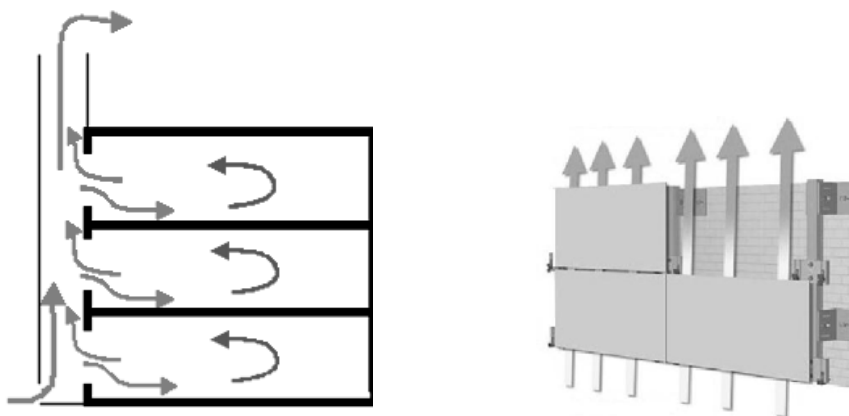


Fig. 4.41 El tiro de aire natural de las cámaras ventiladas ocurre por el efecto chimenea.
Fuente: (A) <http://www.edsl.net> (B) <http://www.pcceramicos.com/fachadas.php>

4.7 Comportamiento de los materiales frente al fuego

Con el propósito de centrar el tema de los materiales en el ámbito de interés de este estudio se considerarán los principales aspectos de algunos materiales sólidos empleados en la construcción de las fachadas. El comportamiento frente al fuego de los materiales se puede estudiar a partir de dos criterios utilizados por las diferentes normas de PCI (vistos en el apartado 3.4) para determinar las características de los diferentes materiales de la construcción en caso de incendio:

(1) La reacción al fuego, que es la contribución de un material al fuego y al desarrollo del mismo. Es por tanto un índice potencial de la capacidad del material para favorecer el desarrollo del fuego.

(2) La resistencia al fuego de los elementos constructivos, que es el tiempo durante el cual es capaz de permanecer cumpliendo la función que le ha sido encomendada en el edificio mientras es atacado por el incendio. Dentro de este criterio los elementos de construcción se clasifican según un programa térmico normalizado, con una escala de tiempos de acuerdo a la función que desarrolla cada uno dentro del edificio.

El calor liberado durante un incendio causa en los materiales una serie de transformaciones y alteraciones provisionales o definitivas que modifican su comportamiento, dentro de estas encontramos: la dilatación, la desecación o pérdida de humedad (materiales porosos) y las modificaciones de las propiedades mecánicas. Normalmente éstas se asocian a la resistencia al fuego de los elementos constructivos [Arnedo et al. 2005]. Las transformaciones químicas relacionadas con los fenómenos de la combustión se relacionan con la reacción al fuego de los materiales. El grado de peligrosidad de un material frente al fuego está definido principalmente por sus propiedades físico químicas. Estas determinan la facilidad de combustión del material y las características de su degradación por acción del calor. Si es buen conductor del calor, si alcanza con rapidez su punto de ignición, si produce llamas, si genera humos, si se reblandece o se derrite permitiendo la caída de gotas etc., (ver clasificación de reacción al fuego apartado 3.4).

Tabla 4.4 Propiedades térmicas de algunos materiales^a comunes. Drysdale (1998).
Furente: elaboración propia con datos de Buchanan, 2001

Material	Conductividad térmica	Calor específico	Densidad	Inercia térmica
	k (W/mK)	C _p (J/kgK)	ρ (kg/m ³)	kρC _p (W ² s/m ⁴ K ²)
Cobre	387	380	8940	1,3 x 10 ⁹
Acero (común)	45,8	460	7850	1,6 x 10 ⁸
Ladrillo (común)	0,69	840	1600	9,3 x 10 ⁵
Hormigón	0,8-1,4	880	1900-2300	2 x 10 ⁶
Vidrio (lámina)	0,76	840	2700	1,7 x 10 ⁶
Enlucido de yeso	0,48	840	1440	5,8 x 10 ⁵
PMMA	0,19	1420	1190	3,2 x 10 ⁵
Roble ^b	0,17	2380	800	3,2 x 10 ⁵
Pino amarillo ^b	0,14	2850	640	2,5 x 10 ⁵
Amianto	0,15	1050	577	9,1 x 10 ⁴
Espuma de Poliuretano ^c	0,034	1400	20	9,5 x 10 ²
Aire	0,026	1040	1,1	-

^a Pitts y Sissom (1977) y otros. La mayoría de valores de 0 o 20°C. Cifras redondeadas

^b Propiedades medidas en perpendicular a la fibra

^c Valores típicos

La inercia térmica de los materiales (tabla 4.4) es uno de los aspectos físicos más determinantes en el comportamiento frente al fuego de los materiales. En el apartado 4.1.6 de este capítulo se mencionó como uno de los factores que condiciona el desarrollo del incendio. Cuando un material con una inercia térmica baja queda expuesto al calor, la temperatura en su superficie aumenta rápidamente y con ello alcanza su punto de ignición más fácilmente. En un recinto de incendio con una carga de fuego dada, se registrarán temperaturas más altas si los revestimientos interiores tienen una inercia térmica baja que si los mismos tienen una inercia térmica alta.

Hay diferentes aspectos que permiten evaluar el grado de peligrosidad en un material, los más importantes se pueden resumir en:

- Combustibilidad
- Velocidad de combustión
- Velocidad de propagación de la llama
- Velocidad de liberación del calor (*HRR*)
- Producción de humo y de gases tóxicos

Combustibilidad

Este parámetro es básico para evaluar el peligro de un material sólido en caso de incendio pues determina su capacidad para arder. Está íntimamente relacionado con la facilidad de ignición del material y su velocidad de combustión. En general, el uso de materiales de construcción combustibles sin una adecuada protección no es recomendable. Las normas de PCI han ido aumentando paulatinamente la exigencia sobre la clase de reacción al fuego de los materiales según su función dentro del edificio.

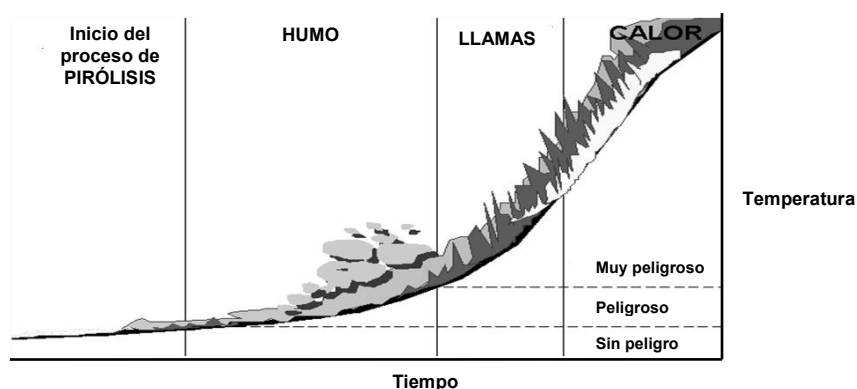


Fig. 4.42 Indicios del grado de peligrosidad de un material.
Fuente: Congreso Nacional de Bomberos, ayuntamiento de Zaragoza, 1999

La velocidad de combustión

Se refiere a la rapidez de la reacción de oxidación que tiene lugar durante los procesos de combustión y a la velocidad a la que el combustible evaporado y el oxígeno se liberan en la zona de combustión. Define la velocidad a la que se originan los productos derivados del proceso de combustión como son: el calor, el humo o los gases tóxicos. La velocidad de combustión depende de varios factores como: la cantidad de aire existente, el contenido de humedad, el estado de agregación del combustible, su forma física y el tamaño de sus partículas. Los combustibles en fase gaseosa tienen gran facilidad de combustión; en los sólidos y líquidos cuanto más dividida esté la materia que los constituye mayor es la velocidad de combustión. Por ello es más difícil que arda un trozo de madera que la misma cantidad de ésta reducida a serrín; si además este serrín se encuentra en suspensión en el aire puede alcanzar velocidades de explosión.

La velocidad de propagación de la llama

Este parámetro es de gran importancia en la propagación del fuego sobre las superficies de las fachadas. Por ello se explica con más amplitud en el apartado 4.8.

La velocidad de liberación del calor (*HRR*)

Los datos referentes al *HRR* definen una de las características más importante de la combustión de los materiales sólidos. Se podría definir como la cantidad de energía por unidad de tiempo que se libera en la combustión de un material. Por ello se considera que es la variable que permite evaluar con mayor claridad la contribución de los materiales al crecimiento del incendio en un recinto cerrado. A partir de este parámetro es posible calcular el crecimiento de un incendio y cuantificar su tamaño. El desarrollo de los flujos de calor del penacho de fuego y las temperaturas de los gases calientes dentro de un recinto dependen del *HRR*. En el apartado 4.1.5 también se hace referencia a este parámetro.

La producción de humo y gases tóxicos

El humo y los gases son el producto resultante de la descomposición de un material durante la combustión. Constituye la principal amenaza para la seguridad de las personas durante un incendio, por ello merece especial atención. La producción de humo depende de varios factores, como pueden ser: la naturaleza química del material, los aditivos presentes, el tipo de combustión (llama o incandescente) y la velocidad de cesión del calor *HRR*. También la geometría del material quemado y la intensidad de la ventilación influyen en la producción de humo durante su combustión:

el factor de ventilación puede multiplicar cuatro o cinco veces la producción de humo de un material respecto a condiciones normales Drysdale, Abdul, Rahim (1985), (citados por Tuhtar, 1990: 21).

Tabla 4.5 Producción de humo de distintos materiales.
Fuente: elaboración propia con datos de Aznar, 1999

Material	Densidad óptica	Tiempo de oscurecimiento (minutos)
Espuma de fenol formaldehído	0,1	100
Madera	1	10
Planchas de aglomerado	1-2	5-10
Corcho	3	3,3
Espuma de poliestireno	5	2
PVC celular	10	1
Espuma de poliuretano	15	0,7

Los efectos adversos ocasionados por el humo son: la opacidad y la toxicidad. La opacidad define la capacidad del humo de ocultar la luz. Algunos materiales plásticos se caracterizan por producir grandes cantidades de hollín y humo negro denso que impide la visibilidad (tabla 4.5). La toxicidad se considera que es el factor más desfavorable de la producción de humo. En general, los productos de la combustión son tóxicos, en un grado mayor o menor, sin importar el tipo de material que se queme (tabla 4.6). Su concentración dentro del recinto del incendio viene a ser un factor determinante para determinar el grado de afectación sobre las personas. Algunos de los gases más comunes que se producen durante la combustión de materiales son:

-CO Monóxido de carbono, es tóxico, inodoro, incoloro. Es el responsable en el 80% de los casos de las alteraciones provocadas por la inhalación de humo en el transcurso de un incendio. Se combina con la hemoglobina de la sangre impidiendo el transporte de oxígeno a través de la sangre, por tanto su inhalación puede ser mortal. Proporciones del 3% de CO pueden ser letales para las personas.

-CO₂ Dióxido de carbono, no es venenoso, pero desplaza el oxígeno del aire pudiendo producir muerte por asfixia.

-HCN Cianuro de hidrógeno (ácido cianhídrico), se produce normalmente durante la combustión de lana y fibras sintéticas.

-HCL Ácido clorhídrico, se produce durante la combustión de plásticos como el PVC. Es altamente tóxico.

Tabla 4.6 Productos nocivos derivados de la combustión de algunos materiales.

Fuente: elaboración propia con datos de Aznar, 1999

Material	Producto nocivo	Concentración nociva en partes por millón de partes de aire (30 min de exposición)
Madera y papel Poliestireno	Monóxido de carbono (CO) CO – también estireno, pero presente en cantidades más pequeñas	4.000 ppm
Cloruro de polivinilo (PVC) Plexiglas	HCl – también corrosivo CO CO – también metacrilato tan tóxico como el CO, pero generado en cantidades más pequeñas	1.000-2.000 ppm
Polietileno Urea formaldehído Isocianurato Poliuretano Fibras acrílicas Lana Nilon	CO CO Cianuro de hidrógeno (HCN)	120-150 ppm

4.7.1 Efectos del fuego en algunos materiales de construcción

- **Plásticos**

Los plásticos tienen múltiples aplicaciones relacionadas con la construcción y el contenido de los edificios. Una de sus principales características es que tienen un coeficiente de conducción del calor bajo, por ello se emplean como materiales aislantes. Resulta difícil determinar de forma general un límite de combustibilidad o riesgo frente al fuego de los plásticos, ya que hay alrededor de 30 grupos principales de plásticos y polímeros, los cuales además son modificados mediante colorantes, rellenos, estabilizantes, lubricantes etc. Sin embargo se considera que todos los plásticos son muy combustibles por ser compuestos orgánicos y por sus propiedades químicas. En general, los plásticos arden con facilidad y generan humo muy denso, negro y tóxico. Los productos químicos añadidos como retardante de llamas suelen provocar aún mayor cantidad de humo. Dentro de la amplia clasificación de plásticos se pueden distinguir dos grandes grupos que se aplican en productos de la construcción:

Polímeros termoplásticos

Los polímeros termoplásticos presentan un riesgo severo frente al fuego. Cuando entran en contacto con el calor arden con gran facilidad y se reblandecen antes de alcanzar su temperatura de combustión. Al enfriarse se endurecen tomando una nueva

forma. A temperaturas muy altas se pueden fundir, comportándose como un líquido inflamable. Dentro de este grupo encontramos productos como: el poliestireno expandido (EPS) y el poliestireno extruido (XPS), ambos son usados como aislante térmico de entresuelos, techos y fachadas. También pertenece a este grupo el policloruro de vinilo (PVC) usado en tuberías y carpinterías de ventanas.

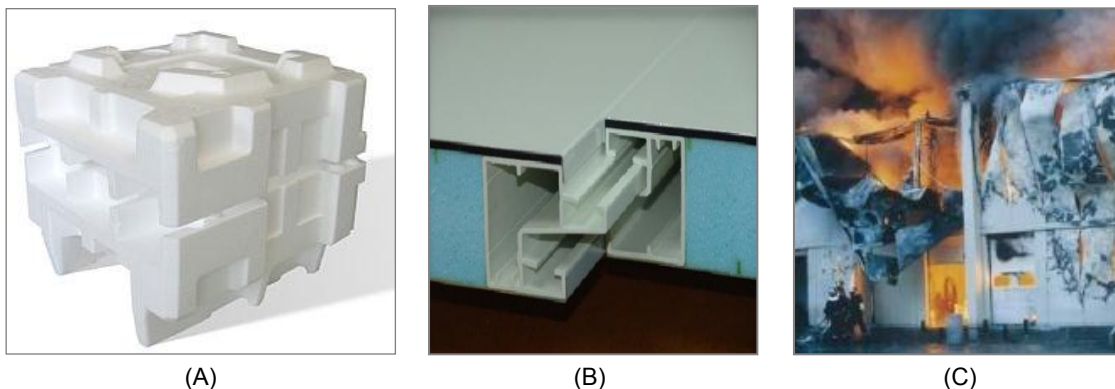


Fig. 4.43 (A) Pieza de embalaje de XPS (B) Panel sándwich de aluminio con núcleo de XPS (C) Incendio en nave industrial Burdeos 1997.

El fuego se propagó a través del aislante térmico (EPS) de la cubierta.
Fuente: (A-B) Internet (C) Documento técnico Rocwool. La lana de roca y las Euroclases.

Polímeros Termoestables

Los polímeros termoestables aunque presentan un comportamiento ligeramente mejor respecto a los termoplásticos, también se consideran materiales con un alto riesgo frente al fuego. Los polímeros termoestables cuando entran en contacto con una fuente de calor arden con facilidad y se reblandecen inicialmente al igual que los termoplásticos, pero posteriormente se descomponen en volátiles y por tanto no toman una nueva forma. A temperaturas muy elevadas desprenden gotas incandescentes. Dentro de este grupo encontramos productos como: la espuma de poliuretano y los paneles rígidos de poliuretano, ambos muy utilizados como aislante térmico para fachadas y cubiertas.

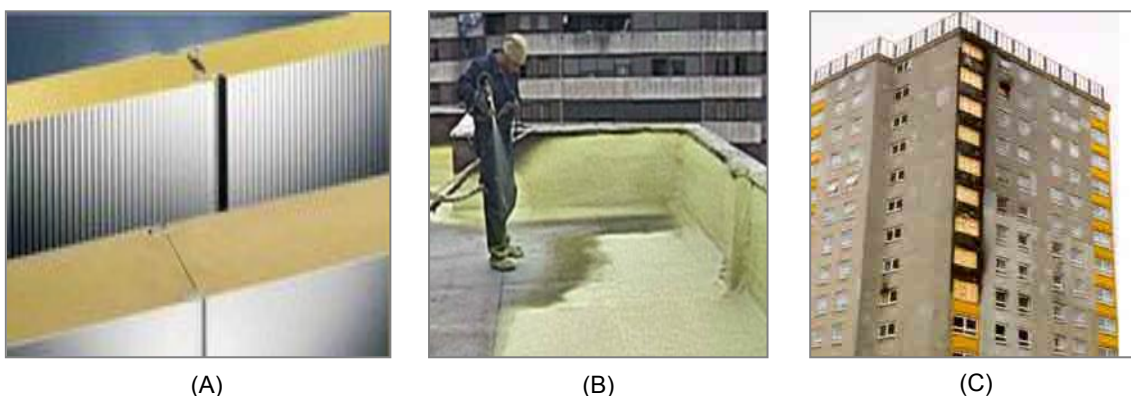
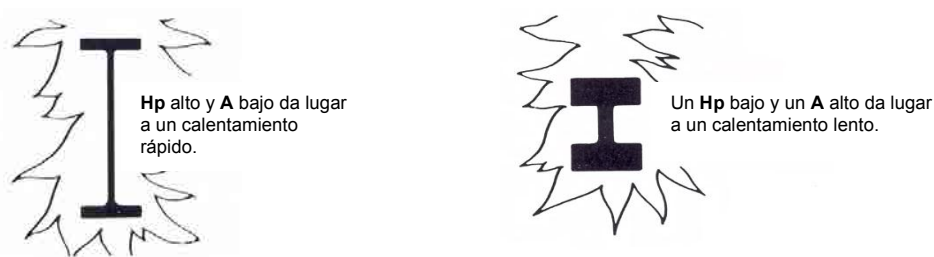


Fig. 4.44 (A) Panel sándwich de aluminio con núcleo de poliuretano rígido (B) Espuma de poliuretano proyectado (C) Incendio en un edificio de viviendas Garnock Court, Irvine, Scotland 1999.

El fuego se propagó a través del aislante térmico de la fachada.
Fuente: (A-B) Internet (C) Colwell – Martin, 2003

• **Metales**

La mayoría de metales son materiales combustibles, en la medida que tienen la capacidad de arder. Sin embargo, su contribución al fuego no se considera un riesgo significativo. Casi todos los metales tienen una temperatura de ignición alta y arden en condiciones específicas. Tanto la potencia de la fuente de energía como la configuración física de un elemento metálico, el tamaño y la forma de sus partículas definen su facilidad de combustión. Si están en forma de pequeñas piezas arden con mayor facilidad y si están en forma de partículas o nubes de polvo tiene un alto riesgo de explosión.



El concepto Hp/A

La velocidad de calentamiento de una sección de acero en un incendio depende de:

- a) el perímetro de material expuesto a las llamas **Hp**.
- b) el área de la sección transversal (robustez del elemento) **A**.

Fig. 4.45 Efecto del calor sobre una pieza metálica en función de su sección.

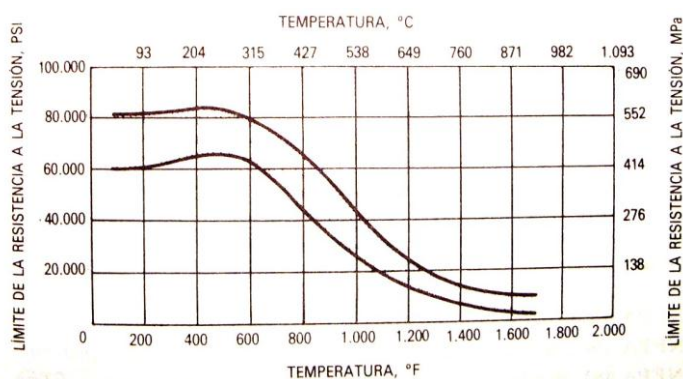
De acuerdo a su temperatura de ignición los metales pueden dividirse en dos grandes grupos: metales combustibles que arden con relativa facilidad, entre los que se encuentran: el sodio (Na), potasio (K), magnesio (Mg), calcio (Ca), zinc (Zn), titanio (Ti), uranio (U), circonio (Zr), entre otros; y metales que arden con dificultad, como el aluminio (Al) y el hierro. El acero y el hierro en formatos de gran tamaño como por ejemplo, el acero estructural, piezas de hierro colado, etc., no suelen arder sometidos a incendios ordinarios. En general, el calor de combustión que generan es bajo, ocasionalmente exceden de 20 MJ/Kg. Solo el berilio (66,4 MJ/Kg), el aluminio (31,0 MJ/Kg) y el magnesio (24,7 MJ/Kg) liberan mayor energía [Babrauskas 1986].

Como contraparte a este comportamiento favorable relacionado con su reacción al fuego, los metales presentan un peligro significativo como elemento estructural debido a su pérdida de resistencia por acción del calor. Los metales son buenos conductores del calor (tabla 4.4), lo cual influye en gran medida en su mal comportamiento frente a una fuente de calor. Los elementos estructurales de hierro, acero o aluminio comienzan a perder sus propiedades mecánicas al estar sometidos a temperaturas

que se alcanzan con relativa facilidad en los incendios comunes unos minutos después de iniciado el fuego. Con la evolución del incendio y el aumento de las temperaturas los elementos estructurales metálicos no protegidos pueden perder toda su capacidad portante y colapsar. En la tabla 4.7 se pueden apreciar las temperaturas de ignición y fusión de diferentes metales. Algunos metales como el aluminio, ampliamente utilizado como elemento estructural en los sistemas de fachada ligera, tienen una temperatura de fusión relativamente baja, si se consideran escenarios típicos de incendios en los cuales las temperaturas pueden superar fácilmente los 900-1000°C. El acero estructural común tiene un punto de fusión de 1.540°C, su resistencia cuando está sometido a altas temperaturas se indica en la Fig. 4.46.



(A)



(B)

Fig. 4.46 (A) Deformación característica de una viga de acero expuesta a una temperatura de 1213 °C. (B) Resistencia de aceros estructurales A7 y A36 a elevadas temperaturas.

Fuente: (A) Torero, 2007 Comportamiento frente al fuego de materiales y elementos de construcción. (B) Manual de protección contra incendios NFPA, 1991b

Tabla 4.7 Temperaturas de fusión, ebullición e ignición de metales en estado sólido. Fuente: elaboración propia con datos de Manual de protección contra incendios NFPA, 1991b

Metal	Punto de fusión (°C)	Punto de ignición (°C)
Acero estructural común	1.430	-
Aluminio	660	555
Bario	725	175
Calcio	842	704
Estroncio	774	720
Hafnio	2.223	-
Hierro	1.535	930
Litio	186	180
Magnesio	650	623
Plutonio	640	600
Potasio	62	69
Sodio	98	115
Titanio	1.727	1.593
Torio	1.845	500
Uranio	1.132	3.815
Zinc	419	900
Zirconio	1.830	1.400

Usualmente la estructura o subestructura de las fachadas ligeras (muros cortina y fachadas ventiladas) está conformada por perfiles de acero o de aluminio. Dicha estructura consta de montantes (piezas verticales) y travesaños (piezas horizontales). Sus dimensiones pueden variar según el diseño de la fachada, pero normalmente se trata de perfiles poco robustos. Las piezas de anclaje mediante las cuales se sujeta las fachadas ligeras a la estructura del edificio también suelen ser de acero o acero inoxidable.

- **Madera**

La madera al igual que todos los materiales orgánicos es combustible. Está constituida fundamentalmente por celulosa y lignina, materias cuya composición es rica en carbono (44% en la celulosa y una proporción mayor en la lignina). Pese a su combustibilidad la madera presenta una alta resistencia frente al fuego cuando se utiliza en elementos estructurales con suficiente dimensión transversal (masa). Su baja conductividad térmica (tabla 4.4), entre otros aspectos, contribuye a su buen comportamiento frente al fuego como elemento constructivo.

La temperatura de ignición de la madera varía en función de la especie, el contenido de humedad y la forma y tamaño de la pieza. Las especies poco densas como el pino o el abeto tienen temperaturas de ignición inferiores a las especies con mayor densidad como el roble y el arce. También influyen en su punto de ignición aspectos como la naturaleza de la fuente de calor, su extensión, duración y la cantidad de oxígeno disponible. De forma general, se considera que el punto de ignición de la madera está en torno a los 312°C. A temperaturas inferiores a los 100°C la madera experimenta un proceso de desecación, durante el cual el elemento estructural adquiere mayor resistencia. Por encima de los 100°C y hasta los 275°C aproximadamente, la madera desprende gases pirolignosos, CO y CO₂. En esta fase la reacción se vuelve exotérmica, la proporción de CO₂ disminuye y aparecen los hidrocarburos; la madera comienza a presentar una capa superficial de carbonización. Más allá de los 450°C el hidrógeno y los carburos conforman la mayor parte de los gases desprendidos; el residuo de carbón que cubre la pieza puede seguir su proceso de combustión sin necesidad de aportación calórica, siempre que haya oxígeno suficiente. Esta capa superficial de carbón protege una capa contigua en la que se produce el proceso de descomposición por pirolisis. Por último en el interior de la pieza queda la denominada sección residual, que es una parte de la pieza de madera que permanece prácticamente intacta (Fig. 4.47).

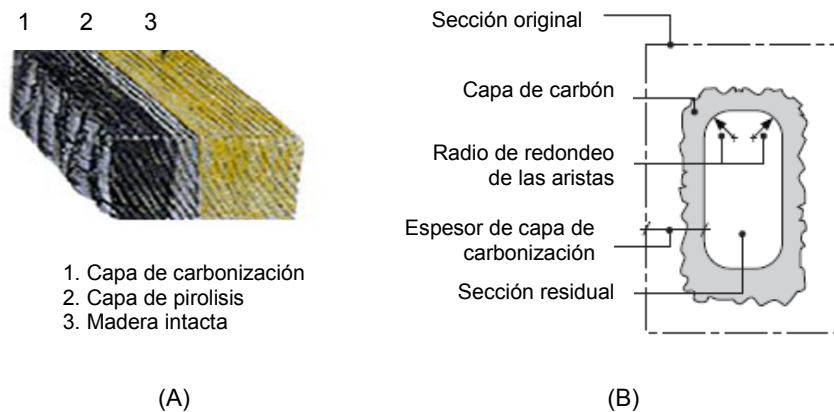


Fig. 4.47 Características de la carbonización de una pieza de madera.

Fuente: (A) Peraza, 2001 (B) <http://www.arauco.cl/index.asp>

La capa carbonizada tiene una gran capacidad aislante, unas seis veces superior a la de la madera. Esto hace que el interior de la pieza mantenga una temperatura inferior y conserve sus propiedades físico-mecánicas constantes. De este modo, la pérdida de capacidad portante del elemento se debe a la reducción de su sección y no tanto al deterioro de sus propiedades [Vega et al. 2010]. Se puede considerar que el comportamiento de la madera frente al fuego puede variar en función de los siguientes aspectos:

- La relación entre la superficie y el volumen de la pieza. En piezas de poca escuadría se produce con más facilidad la ignición y la propagación del fuego.
- La existencia de fendas. Las hendiduras en el sentido de la fibra incrementan los efectos del fuego. La madera laminada, que presenta un porcentaje muy bajo de fendas, tiene una velocidad de carbonización menor que la de la madera maciza. La tabla 4.8 muestra las velocidades de combustión de referencia que se utilizan para calcular la sección residual y eficaz de los elementos estructurales de madera, los cuales están recogidos en el DB SI Anejo E sección 2 del CTE.
- La densidad de la madera. Si la densidad de la madera es alta, la pieza arde con menor facilidad y la combustión es más lenta.
- El contenido de humedad. Este aspecto tiene un importante efecto retardante. La temperatura del elemento no pasará de los 100°C en tanto que el material no se deseeque. La mayoría de las estructuras de madera presentan un contenido de humedad que varía entre el 8% y el 15% aproximadamente. No obstante, este factor no se considera en la velocidad de carbonización debido a la poca variación del contenido de humedad que se da en la práctica.

Tabla 4.8 velocidad de combustión según el tipo de madera.
Fuente: elaboración propia con datos de Vega et al., 2010

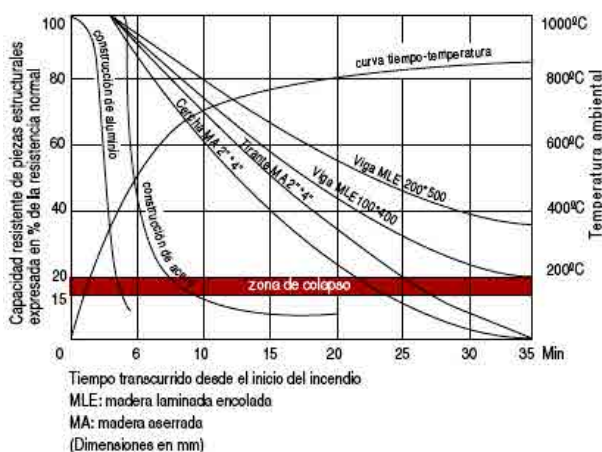
Tipo de madera	B _n (mm/min)	B _o (mm/min)
Coníferas y haya Madera laminada encolada con densidad característica ≥ 290 Kg/m ³	0,70	0,65
Madera maciza con densidad característica ≥ 290 Kg/m ³	0,80	0,65
Fronosas Madera maciza o laminada encolada de frondosas con densidad característica de 290 Kg/m ³⁽¹⁾	0,70	0,65
Madera maciza o laminada encolada De frondosas con densidad característica ≥ 450 Kg/m ³	0,55	0,5
Madera micro laminada Con una densidad característica ≥ 480 Kg/m ³	0,7	0,65

(1) Para maderas con densidades entre 290 y 450 kg/m³, la velocidad se puede interpolar linealmente.

Es un hecho que las piezas delgadas de madera se queman rápidamente, mientras que las piezas estructurales con escuadrías considerables pueden resistir largos periodos de tiempo el ataque de un fuego intenso. Eventualmente puede obtenerse una mayor resistencia al fuego con elementos estructurales de madera que con elementos realizados con materiales incombustibles como los metales o el hormigón (Fig. 4.48A). Los elementos metálicos desprotegidos pierden rápidamente su resistencia y se desploman súbitamente, a menudo con muy poca señal de alerta. En cambio, la madera pierde su resistencia lentamente a medida que va avanzando la capa de carbonización hacia el interior de la pieza.



(A)



(B)

Fig. 4.48 (A) Imagen de un incendio. Se aprecian las vigas de acero desplomadas sobre una viga de madera que resistió sin colapsar.
(B) Curvas de evolución de las temperaturas y resistencias comparativas en ensayos.
Fuente: (A) Peraza, 2001 (B) Arauco <http://www.arauco.cl/index.asp>

La madera es uno de los materiales de construcción más polivalentes, puede emplearse como elemento estructural, para configurar cubiertas, forjados y paredes; para realizar carpinterías, suelos, muebles y también para revestir paredes interiores y muros de cerramiento. Por lo general, las fachadas de madera están conformadas por tableros o pequeños elementos sobrepuestos en forma de lamas, entablados, tejas, chillas etc. (Fig. 4.49), por lo que el comportamiento frente al fuego de los revestimientos está definido principalmente por su combustibilidad. Por tal motivo, el comportamiento frente al fuego de los revestimientos de madera se considera desfavorable; el efecto de la carbonización explicado antes no es significativo en piezas de poco espesor. De acuerdo a la clasificación europea la clase de reacción al fuego de los revestimientos de madera es D-s2, d0 (tabla 4.9). Esto indica que se trata de un material o producto combustible con una inflamabilidad y una contribución al fuego relativamente altas (D), que produce una cantidad moderada de humo cuando arde (s2) y que no desprende gotas o partículas inflamadas en una fase inicial del incendio (d0). Por ello su uso como material de revestimiento para fachadas está limitado por las normas de protección contra incendios.

La aplicación de tratamientos ignifugantes puede mejorar la clasificación de reacción al fuego de la madera, puesto que al retrasarse el proceso de combustión se reducen la inflamabilidad y la emisión de calor del material en caso de incendio. Sin embargo, estos tratamientos presentan algunos inconvenientes relacionados con la excesiva producción de humos y también con su escasa durabilidad a la intemperie.



Fig. 4.49 Diferentes tipos de revestimientos de madera para fachadas.
 Fuente: revestimiento de fachadas en madera. Revista CIS recurso electrónico
<http://www.cismadeira.com/galego/downloads/fachadas.pdf>

Otro aspecto que incide en la velocidad de propagación del fuego a través de revestimientos de madera está relacionado con la configuración del revestimiento. Según un estudio realizado en el marco de la nueva normativa suiza para edificaciones de madera (2005) [8], el alineamiento de los elementos que conforman los revestimientos y la disposición de elementos no combustibles capaces de desviar la trayectoria del fuego afectan en la velocidad de combustión del material.

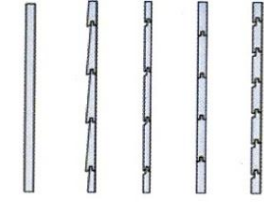
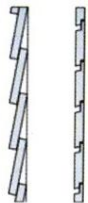
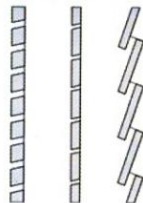
	1	2	3
Parámetro	Mejor comportamiento	Buen comportamiento	Comportamiento desfavorable
Tipo de revestimiento			

Fig. 4.50 Clasificación del tipo de revestimiento en función de su influencia en la velocidad de propagación del fuego [8].
Fuente: elaboración propia basada en Östman et al., 2010


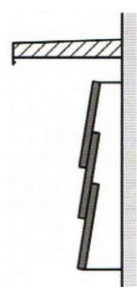
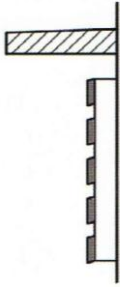


	1	2	3	4	5
					
	Elemento saliente de 20 cm Adecuado para revestimientos de madera 1,2 y 3 (Fig. 4.50)			Elementos saliente 10 cm Adecuado para revestimientos 1 (Fig. 4.50)	
Cantiléver no combustible	Tablero de madera con revestimiento no combustible	Tablero grueso de madera maciza o laminada	Igual a 1	Igual a 2	

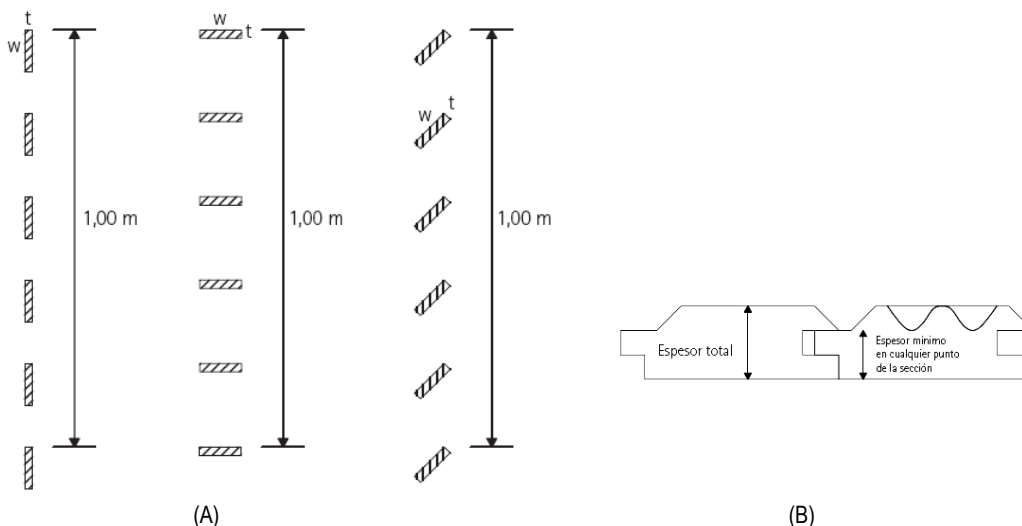
Fig. 4.51 Elementos que contribuyen a minimizar la propagación del fuego a través de los revestimientos de madera para fachadas [8].
Fuente: elaboración propia basada en Östman et al., 2010

Tabla 4.9 Clase de reacción al fuego de los paneles y revestimientos de madera (EN 14915). Fuente: Vega et al., 2010

Producto ⁽¹⁰⁾	Información del producto ⁽⁴⁾	Densidad media mínima ⁽⁵⁾ (kg/m ³)	Espesores mínimos, total/mínimo ⁽⁶⁾ (mm)	Condiciones de uso final ⁽³⁾	Clase
Revestimientos murales interiores y exteriores ⁽¹⁾	Piezas de madera con o sin machihembrado y con o sin mecanización superficial	390	9/6	Con o sin cámara de aire posterior	D-s2,d0
			12/8		D-s2,d0
Revestimientos murales interiores y exteriores ⁽²⁾	Piezas de madera con o sin machihembrado y con o sin mecanización superficial	390	9/6	Con cámara de aire posterior ≤ 20 mm	D-s2,d0
			18/12	Con o sin cámara de aire posterior	
Lamas de madera ⁽⁷⁾	Piezas de madera colocadas sobre un bastidor ⁽⁸⁾	390	18	Todas las caras al aire ⁽⁹⁾	D-s2,d0

- (1) Fijadas sobre rastreles de madera, con cámara de aire cerrada o rellena con un sustrato de clase A2-s1,d0 como mínimo, con una densidad de al menos 10 kg/m³, o relleno con un sustrato de material aislante de celulosa, como mínimo de la Clase E, y con o sin barrera de vapor posterior. El producto de madera estará diseñado de forma que se pueda colocar sin juntas abiertas.
- (2) Fijadas sobre rastreles de madera, con o sin cámara de aire posterior. El producto de madera estará diseñado de manera que se pueda colocar sin juntas abiertas.
- (3) Puede incluirse una cámara de aire detrás del producto como posible ventilación, mientras que una cámara cerrada de aire no permite dicha ventilación. El sustrato situado detrás de la cámara de aire será de clase A2-s1,d0 como mínimo, con una densidad de al menos 10 kg/m³ para piezas de madera verticales y con una cámara cerrada de aire de 20 mm como máximo, el sustrato situado detrás podrá ser como mínimo de la clase D-s2,d0.
- (4) Las juntas incluyen todos los tipos, por ejemplo, a tope o machihembradas.
- (5) Acondicionadas conforme a la norma UNE-EN 13238:2002.
- (6) La superficie mecanizada de la cara expuesta del revestimiento será menor o igual del 20% de la superficie sin mecanizar, o del 25% si se miden ambas caras, la expuesta y la no expuesta. En las uniones tope, se considera como grosor la superficie de contacto de la unión. Como se observa en la Fig. 4.52B.
- (7) Piezas de madera rectangulares, con o sin aristas redondeadas, montadas horizontal o verticalmente sobre un bastidor y con todas las caras al aire, utilizadas principalmente en la proximidad de otros elementos de edificación, tanto en aplicaciones de interior como de exterior.
- (8) La superficie máxima de exposición (todas las caras de las piezas rectangulares de madera y del bastidor de madera) será menor o igual al 110% de la superficie a mecanizar; véase la figura 4.2.
- (9) Los elementos de la edificación situados a una distancia inferior a 100 mm de las lamas de madera (excluyendo su bastidor) deberán ser, como mínimo, de la clase A2-s1,d0; para distancias entre 100 y 300 mm, será como mínimo de la clase B-s1,d0; y para distancias superiores a 300 mm, de clase D-s2,d0.
- (10) También se aplica a las escaleras.

Superficie máxima expuesta de las lamas de madera $2n(t+w)+a \leq 1,10$



n= piezas de madera por metro
 t= grosor de cada pieza de madera, en metros
 w=anchura de cada pieza de madera, en metros
 a= superficie expuesta del marco de soporte de madera (en su caso), en m², por m² de cinta de madera

Fig. 4.52 (A) Distintas posibilidades de posición de las lamas de madera (B) Sección transversal de las lamas que conforman los paneles de revestimiento de madera maciza.

Fuente: Vega et al., 2010

4.8 Propagación de la llama

La capacidad de propagación de la llama en los materiales es uno de los parámetros más importantes para considerar el peligro de propagación de un incendio. Los materiales que debido a sus características químicas facilitan la propagación de la llama en su superficie, han de considerarse inadecuados para aplicaciones generales en la edificación, sobre todo en edificios públicos, hospitales, escuelas, museos, etc.

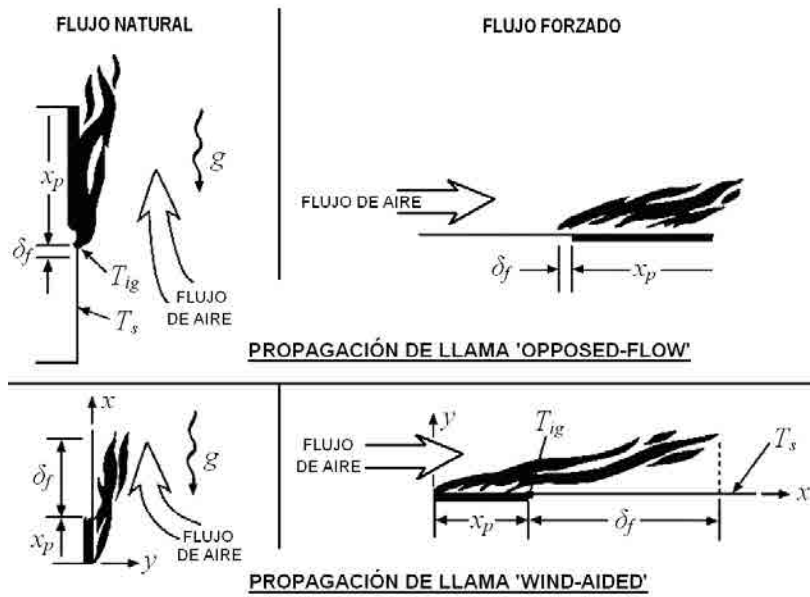
La velocidad de propagación de la llama en un material depende en primer término de sus propiedades químicas, pero influyen también las condiciones del entorno en el que se da la reacción: como el viento, la temperatura, la presión atmosférica etc. También los factores geométricos tales como el área de la superficie y la orientación de la muestra tienen gran influencia en la velocidad de propagación de las llamas sobre un material sólido. En ocasiones estas puede llegar a ser incluso más determinantes que sus propiedades químicas (Tuhtar, 1990: 19).

Si consideramos la propagación del fuego sobre la superficie de un combustible sólido, es decir una mezcla combustible-gas, la propagación viene a ser el crecimiento del perímetro del incendio, de la región quemada que volatiliza y proporciona el combustible a la reacción, no la extensión de la llama que acompaña este crecimiento. En el desarrollo de este proceso tienen gran importancia los efectos gravitacionales y el viento. Los flujos resultantes de la flotabilidad del incendio o el viento natural pueden ayudar (*wind-aided*) u oponerse a la propagación de la llama (*opposed-flow or concurrent flow spread*) (Fig. 4.53).

El frente de la propagación sobre el cual están las llamas define la región de pirolisis. La combustión de esta área de pirolisis y la velocidad de pirolisis están relacionadas con una de las variables más importantes del comportamiento del incendio, que es la velocidad de combustión. Este parámetro va asociado a los aspectos que definen la peligrosidad del incendio, como son la temperatura, la visibilidad, toxicidad etc. Todo ello explica el por qué la propagación de la llama es un parámetro de tanta importancia en los procedimientos de análisis de riesgos de los incendios.

La propagación a través de las superficies de las fachadas ocurre con facilidad y es muy rápida debido a que es una propagación que avanza en dirección del flujo natural (*wind-aided*). En este tipo de propagación las llamas realizan una labor de precalentamiento de la superficie que hace que el proceso de pirolisis sea más rápido

y por ende la propagación del fuego. Este aspecto es de gran interés al considerar la propagación del fuego a través de los revestimientos combustibles (apartado 4.4.4).



La velocidad de la propagación de la llama está definida por la velocidad del punto situado en la posición x_p . La posición x_p representa la extensión de la región de pirolisis o de vaporización que está subordinada a la velocidad de combustión del incendio. La zona más avanzada de la propagación de la llama, que es la región denotada por δ_f puede ser descrita por dos fases: la llama en la fase gas y la región de pirolisis en la fase condensada.

Fig. 4.53 Tipos de propagación de la llama. Quintiere (1997).
Fuente: Alvear et al., 2007

Bibliografía:

[Arnedo et al. 2005] A. Arnedo, J. Bolea, M. C. Bufí, S. Carrascón, X. Escriche, A. Freixa, C. García, F. González, M. González, J. Juanola, J. C. López, C. Llop, F. Marimon, S. Montero, J. Pedreny, M. Rejat, J. R. Repullès, B. Salom, J. Vaquero, Guía para la comprobación de la resistencia al fuego de estructuras, ASCEM, 2005.

[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.

[Aznar 1999] A. Aznar Carrasco, Protección contra incendios Análisis y Diseño de sistemas, Editorial Alción, Madrid. 1999, ISBN8486445140.

[Babrauskas 1986] Babrauskas, Fire Protection Handbook, 16th editores: A. E. Cote y J. L. Linville, National Fire Protection Association, Quincy, pp. 5-125, 1986.

[Buchanan 2001] A. H. Buchanan, Structural Design for Fire Safety, John Wiley & Sons, 2001, ISBN 047189060X.

[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.

[Drysdale 1985] D. D. Drysdale, An Introduction to Fire Dynamics, John Wiley & Sons, New York, 1985, ISBN 0471906131.

[Drysdale 1998] D. D. Drysdale, An Introduction to Fire Dynamics, Second edition, John Wiley & Sons, New York, 1998, ISBN-13: 978-0471972914.

[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.

[Fitzgerald 2004] R. W. Fitzgerald, Building fire performance Analysis; John Eiley & Sons, Ltd. London, 2004.

[Goble 2007] K. Goble, Height of Flames Projecting from Compartment Openings. Thesis Master of Engineering in Fire Engineering, Department of Civil Engineering, University of Canterbury, New Zealand 2007.

[Hakkarainen – Oksanen 2002] T. Hakkarainen, T. Oksanen, Fire Safety Assessment of wooden Facades, Fire and Materials, vol. 26, pp.7-27, 2002.

[Höglander et al. 1997].Höglander, Kenneth, Sundström, Design Fires for Pre-Flashover Fires, SP Report 1997:36, SP Swedish National Testing and Research Institute, Sweden, 1997.

[Ingberg 1928] S.H. Ingberg, Tests of the Severity of Building Fires, Q. Natl. Fire Prot. Assoc. 22, 1928.

[Karlsson – Quintiere, 2000] B. Karlsson, G. Quintiere, Enclosure Fire Dynamics, CRC Press, 2000, ISBN 0849313007.

[Law – O'Brien 1981] M. Law, T. O'Brien, Fire Safety of Bare External Structural steel. CONSTRADO, Croydon, England, 1981.

- [Mammoser – Battaglia 2004] J. H. Mammoser, F. Battaglia, A computational study on the use of balconies to reduce flame spread in high-rise apartment fires Fire Safety Journal vol. 39, pp.227-296, 2004.
- [NFPA 1991a] Manual de protección contra incendios. Introducción a Confinamiento del fuego en edificios. Sección 6 Capítulo 6, J. A. Campbell, NFPA, 1991, ISBN 8471006456.
- [NFPA 1991b] Manual de protección contra incendios. Metales. Sección 3, Capítulo13, Robert O’Laughlin, NFPA, 1991, ISBN 8471006456.
- [Nyuk Poh Bong 1969] F. Nyuk Poh Bong, Fire spread on exterior wall, University of Canterbury, Fire Engineering Research Report, 2000.
- [Oleszkiewicz 1990] I. Oleszkiewicz, Fire Exposure to exterior Walls and Flame Spread on Combustible Cladding, Fire Technology, Vol. 26, nº 4, pp.357-375. 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.
- [Östman et al. 2010] B. Östman, J. König, J. Schmid, E. Mikkola, T. Hakkarainen, R. Stein, N. Werther, S. Winter, M. Krolak, A. Bouchair, D. Dhima, H. LandrØ, J. Bregulla, M. Teibinger, H. Hartl, K. Hofstetter, A. Frangi, A. Just, Fire Safety in timber buildings, Technical guideline for Europe, Technical Research Institute of Sweden, SP Trätek, 2010.
- [Patterson 1993] J. Patterson, Simplified Design for Building Fire Safety, Iowa State University, John Wiley&Sons, Inc. New York. 1993, ISBN 0471572365.
- [Peraza 2010] F. Peraza, Protección preventiva de la Madera, Asociación de Investigación Técnica de las industrias de la madera y corcho, Madrid, 2001, ISBN 84 87381 22 7.
- [Pons i Grau 2002] V. Pons i Grau, Dinámica del Fuego: Origen y Causa de los Incendios, Edicions del Bullent, 2003, ISBN 848966398X.
- [Quitiere 1998] J.G. Quitiere, Principles of Fire Behavior, Delmar Publishers, New York, 1998.
- [Rogowaki et al. 2003] B. F. W. Rogowski, R. Ramaprasad, J. R. Southern, Fire Performance of external thermal insulation for walls of multi-story buildings, BRE, London, 2003.
- [Thomas et al. 1967] P. H. Thomas, A. J. Heselden, M. Law, Fully-developed Compartment Fires Two Kinds of Behavior, Fire Research Technical paper Nº.18 Ministry of technology and Fire offices Committee, Joint Fire Research Organization HMSO, UK, pp. 2-5, 1967.
- [Thomas – Law 1969] P. H. Thomas, M. Law, The projection of flames from Burning Buildings. Fire Technology, Vol. 5, 1969.
- [Tuhtar 1990] D. Tuhtar, Protección contra el fuego y explosiones, desarrollo de sistemas, Editorial Paraninfo, Madrid, 1990, ISBN 8428317666.
- [Tieszen 2001] S. R. Tieszen, On the fluid Mechanics of fire, Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 33: pp.67-92, 2001.

[Vega et al. 2010] L. Vega Catalán, M. Llinares, C. Villagrà, V. Gallego, B. González, Manual de construcción con madera, sección comportamiento frente al fuego, Instituto Confederación española de empresarios de la madera Confemadera, pp. 5-57, 2010.

[Wade 1995] C. Wade. Fire Performance of external wall Claddings Under a performance based Building code. Fire and Materials. Vol.19, pp. 127-132, 1995.

[Yokoi 1960] S. Yokoi, Study on the Prevention of fire spread caused by hot upward current, Building Research Institute, Report N° 34, Tokyo, Japan, 1960.

Citas electrónicas:

[Basset 2009] J. M. Basset, Manual técnico Flashover desarrollo y control, Swedish Rescue Services Agency, 2009.

http://www.kume.cl/KFiles/File/Fuego_y_flashover.pdf. Consulta: 06/08/2010.

[Liñan, Liñan 2001] A. Liñan, A. Liñan, Comportamiento del fuego en micro gravedad. http://www.fq.profes.net/archivo2.asp?id_contenido=35100. Consulta: 10/08/2010.

Notas:

¹ Químico francés, nacido el 26 de agosto de 1743 en París. Se le considera el padre de la química moderna por sus detallados estudios, entre otros: el estudio del aire, el fenómeno de la respiración animal y su relación con los procesos de oxidación, análisis del agua, uso de la balanza para establecer relaciones cuantitativas en las reacciones químicas estableciendo su famosa Ley de conservación de la masa. http://es.wikipedia.org/wiki/Antoine_Lavoisier

² CTE Documento Básico SI 6 Resistencia al fuego en estructuras. Anejo B, terminología.

³ El método Gretener es un método de análisis de riesgos en las edificaciones que tuvo una amplia acogida en los años 70 y 80's. Los nuevos conceptos de la ciencia del fuego y los nuevos métodos consideran el riesgo del incendio a partir de más parámetros.

⁴ USFA es la U.S. Fire Administration. Es la oficina de administración de incendios de EEUU. Realiza todo tipo de campañas educativas para la prevención de los incendios a diferentes niveles. Es el organismo oficial encargado de realizar estadísticas de todos los incidentes de incendio que ocurren en todo el territorio nacional. <http://www.usfa.fema.gov>

⁵ Este sencillo experimento muestra con claridad la influencia de la posición de la superficie a través de la cual se propaga el fuego. Comparison of Flame spread at angles of 15, 90, 0 and -15 degrees. University of Edinburgh BEng Project. <http://www.youtube.com/watch?v=V8gcFX9jLGc>

⁶ La rotura del vidrio está relacionada directamente con gradientes de temperatura. Establecer un solo criterio de las condiciones en que ocurre no es sencillo, teniendo en cuenta que depende de distintos aspectos como: el tipo de vidrio, su espesor, su tasa de calentamiento, aislamiento, restricción ejercida por el marco de la ventana etc., (Norma NFPA 921).

⁷ British Standards Institution. Fire performance of external cladding systems. Par 1. Test method for non-loadbearing external claddings system applied to the face the building. British Standard BS 8414-12002. London, BSI,2002.

BRE. External wall: external combustible plastics insulation: fixigs. BRE Defects Action Sheet DAS 132. Garston, BRE Bookshop, 1989.

La norma británica BS 476 permite evaluar los siguientes aspectos sobre la propagación del fuego en las fachadas:
 BS 476 Parte 3. De propagación de la llama y la penetración del fuego
 BS 476 Parte 6. Propagación del fuego
 BS 476 Parte 7. Propagación de la llama sobre las superficies
 BS 476 Parte 22. Estabilidad, Integridad y Aislamiento. De acuerdo a la clasificación europea de resistencia al fuego de los elementos constructivos.

⁸ Lignum Dokumentation Brandschutz: 7.1 Außenwände, Konstruktio und Bekleidung, www.lignum.ch. Documento de la Norma de Protección Contra incendios Suiza. 7.1 Construcciones y revestimientos.

5

INTRODUCCIÓN AL MODELADO Y SIMULACIÓN COMPUTACIONAL



5.1. La simulación como instrumento de aproximación a la realidad

El modelado y simulación computacional (MSC) es un avanzado instrumento para la resolución de problemas complejos en diversas áreas del conocimiento. Actualmente su aplicación forma parte importante de la investigación científica y tecnológica.

Los primeros modelos de simulación se fueron desarrollando de manera pausada desde los años cuarenta del siglo pasado, con investigaciones realizadas en torno al proyecto Monte Carlo [1], para luego desatar un desarrollo exponencial (gracias a la tecnología) en los años noventa. Su origen se dio con las primeras corrientes teóricas que abordaron el asunto de los sistemas complejos. Los marcos conceptuales desarrollados a partir de estas teorías se pueden ubicar en dos grupos de ideas: los paradigmas globales de la complejidad y la serie de algoritmos que permiten modelizar los procesos emergentes [Reynoso 2006]. Ambos se manifestaron como principios reunidos alrededor del concepto de sistema, siendo precisamente la complejidad uno de sus postulados principales.

Estos conceptos dieron lugar a importantes referentes teóricos tales como:

1. La cibernética propuesta por Norbert Wiener en los años cuarenta, basada en los mecanismos de retroalimentación y control.
2. La Teoría General de los Sistemas, propuesta por Ludwig Von Bertalanffy en la década de los cincuenta.
3. Las Teorías de las Estructuras Disipativas formuladas por Richard Prigogine en la década de los sesenta, con énfasis en el desequilibrio y el papel del individuo [2].
4. Y por último, la Teoría de Catástrofes, que deriva de las matemáticas y pone especial atención en los procesos de ruptura y crisis. Estas ideas fueron desarrolladas por René Thom a mediados de la década de los sesenta.

Ante las limitaciones para dar cuenta de los fenómenos complejos del planeta (por ejemplo: el cambio climático) debidas a la imposibilidad de experimentar y por la escasa información que se puede extraer de la observación; la simulación de la realidad aparece como una alternativa de aproximación a tales fenómenos. Dicho de otro modo, “aunque la complejidad del mundo real nos impida su observación y experimentación, sí podemos experimentar y observar un mundo simulado” [Wagensberg 1985].

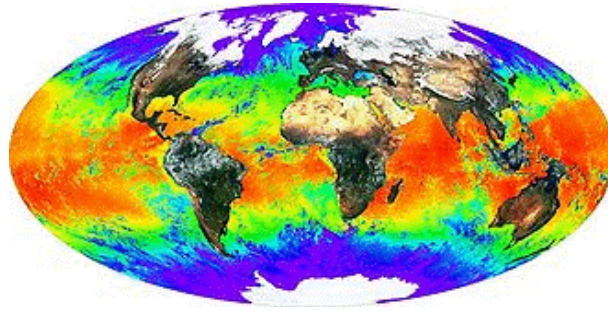


Fig. 5.1 Modelo computacional del clima actual en el planeta.
Fuente: www.cambioclimaticoglobal.com

La aparición de los primeros ordenadores, a mediados del siglo XX, hizo posible la adaptación al entorno computacional de las operaciones matemáticas que hasta entonces habían sido realizadas por expertos, dando lugar a la primera generación de modelado y simulación computacional.

Los primeros avances sustanciales en materia de simulación ocurrieron hacia 1960, cuando se implementaron nuevas técnicas de resolución de ecuaciones, como las diferencias finitas y los elementos finitos. Al principio estos procesos presentaron algunas dificultades técnicas y la entrada de datos era tediosa, por tanto, en la década siguiente el interés mayor se centraría en implementar un entorno computacional más “amigable” para el usuario para conseguir una modelización más cercana a la percepción humana del sistema operativo. En este sentido, los resultados más destacados se obtuvieron hacia 1985 especialmente en algunas áreas de la ingeniería como la mecánica de fluidos. En estos procesos de modelado se incorporaron interfaces de operación más intuitivas que facilitaron en gran medida su operación aun a usuarios no expertos [Abott et al.1991].

En la década de los noventa, ya superadas las mayores dificultades en el procesamiento de la información, surge una generación de modelado de mayor alcance. Esta vez se buscó aplicar conceptos propios de la inteligencia artificial con la idea de extraer nuevas conclusiones de los resultados obtenidos e incluso proponer soluciones integrando otras herramientas especializadas como los SIGs [3] con objeto de hacer del modelado un proceso cada vez más experto [López et al. 2001].

La investigación científica de vanguardia ha asistido, a través de los procesos de simulación computacional, a una nueva forma de aproximación de la realidad, la cual permite explorar de forma controlada las distintas interacciones del todo y las partes que integran el sistema. Esta nueva vía de aproximarse al mundo real plantea una

dialéctica diferente a la señalada tradicionalmente por el método científico, puesto que la simulación no es ni teoría ni experiencia en su sentido estricto, pero puede jugar si conviene el papel de cualquiera de las dos [Wagensberg 1985].

El concepto de sistema se ha definido de tantas maneras que se puede decir que no hay una definición aceptada de forma general. Tres de las definiciones mejor valoradas son:

Sistema es el conjunto ordenado de objetos lógicamente relacionados que atraviesan ciertas actividades, interactuando para cumplir ciertos objetivos [Wainer 1996].

Es una entidad que mantiene su existencia a través de la interacción de sus partes [Bellinger 1997].

Es el conjunto de entidades que de manera cohesionada persiguen un fin específico [Cunningham et al. 2000].

Para el tema que nos ocupa es importante también distinguir dos ideas en la definición de sistema:

1. Un sistema real es una combinación de elementos con relaciones estructurales que se influyen mutuamente.
2. Un sistema dinámico es una construcción formal que nos da conceptos generales de modelización para distintas clases de disciplinas [Giambiasi 1996].

Durante siglos, el desarrollo de sistemas dinámicos [4] estuvo basado en el estudio de modelos de ecuaciones diferenciales, ordinarias y parciales. Estas permitieron modelar exitosamente los sistemas dinámicos encontrados en la naturaleza. Los éxitos alcanzados por la física en esta línea del conocimiento fueron tan grandes que influyeron a partir de entonces casi todo el pensamiento científico [Wainer 1996]. Los avances tecnológicos también han promovido la creación de sistemas dinámicos que no pueden ser descritos fácilmente por medio de ecuaciones diferenciales, ordinarias o parciales. Como ejemplos de tales sistemas se pueden mencionar: las líneas de producción o ensamblado, las redes de computación y comunicaciones, los sistemas de control de tráfico (en aire y tierra), los sistemas de control militar, etc. También en estos casos donde los avances tecnológicos son los que promueven la complejidad de los sistemas, la simulación es una alternativa para abordarlos.

El MSC ha pasado de ser sólo un medio de automatizar tareas que antes se realizaban manualmente, a convertirse en una rama científica de gran utilidad.

A mediados de los años noventa del siglo XX se impulsa la iniciativa de desarrollar una teoría general en torno a esta técnica de investigación, lo cual contribuyó a implementar una metodología y una estructura para utilizarla con efectividad y rigor científico [Capote et al. 2006]. Paralelamente a esta estructuración en el plano científico, se dan dos eventos significativos en relación al avance tecnológico que contribuyen de forma importante a su desarrollo: el ordenador personal y los nuevos lenguajes en la programación informática.

La simulación tiene un campo de aplicación muy amplio y está relacionada con diversas áreas del conocimiento, tales como: la cosmonáutica y aeronáutica, la electrónica, las comunicaciones, los procesos industriales y de servicios, la biología, la medicina, la climatología, las ciencias sociales, la economía, la ingeniería o la arquitectura, por citar sólo algunas. Las posibilidades de análisis dentro de cada disciplina son incontables, puesto que la simulación permite desde validar conceptos teóricos que no han sido probados nunca, hasta detectar errores en procesos existentes para hacerlos más eficientes. La simulación resulta especialmente útil cuando la operación de un sistema o la experimentación en él son inviables, o cuando tienen altos costes, son peligrosos o poco prácticos. Como por ejemplo: el aprendizaje de pilotaje de aviones o la fabricación de piezas para los coches de carreras.



Fig. 5.2 (A) Modelo de una cabina de avión de un Simulador de vuelo
 (B) Modelo de simulación computacional de fluidos CFD (*Computational fluid dynamics*)
 para estudiar las ráfagas de viento durante un vuelo.
 Fuente: <http://www.aterrizajes.net> - Southwest Research Institute

De las muchas definiciones que los expertos han dado de simulación se han tomado dos que describen con claridad lo que engloba. Thomas T. Goldsmith Jr. y Estle Ray Mann (célebres, entre otros logros, por concebir y patentar el primer videojuego en 1948) la definen como: “Una técnica numérica para conducir experimentos en una computadora digital”. Estos experimentos comprenden ciertos tipos de relaciones matemáticas y lógicas, las cuales son necesarias para describir el comportamiento y la estructura de sistemas complejos del mundo real a través de largos periodos de tiempo. Cuarenta años después, Robert E. Shannon en 1988 formula otra definición

ampliamente aceptada: “La simulación es el proceso de diseñar y desarrollar un modelo de un sistema o proceso real y conducir experimentos con el propósito de entender el comportamiento del sistema o evaluar varias estrategias (dentro de límites impuestos por un criterio o conjunto de criterios) para la operación del mismo”. De su definición se deduce que el concepto de simulación es inseparable de la idea de modelo; de hecho, su construcción y uso para estudiar un problema planteado son la razón de ser de la simulación.

5.1.1 El Modelo de simulación

La creación y el uso de modelos forman parte integral de la investigación. En diversos campos los investigadores crean modelos para estudiar fenómenos o procesos, con el propósito de obtener conclusiones sobre su comportamiento aplicables al mundo real. Existen diferentes concepciones de lo que es un modelo, dependiendo del contexto en el cual se defina. En el ámbito de las ciencias puras y aplicadas con frecuencia se hace referencia al modelo científico, entendido desde tres vertientes:

(1) Un conjunto de supuestos (hipótesis) que constituyen una explicación de un determinado fenómeno o proceso de la realidad (Fig. 5.3), (2) la configuración ideal en la que se produce un fenómeno al verificar una ley o teoría y (3) el proceso de generar una representación conceptual (una ecuación) o física (maqueta o mapa) de fenómenos, sistemas o procesos con el propósito de explorar, describir o predecir los mismos. A efectos de este estudio, se tomará en consideración el último de los significados dados, puesto que hace referencia a lo que se denomina modelo de simulación.

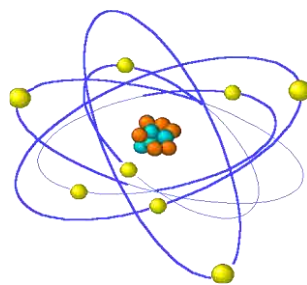


Fig. 5.3 Modelo atómico de Bohr.
Fuente: <http://concurso.cnice.mec.es>

Un modelo de simulación es una representación simplificada de una situación determinada de la realidad, conformada por un conjunto de hipótesis acerca del funcionamiento del objeto a estudiar, expresada mediante relaciones matemáticas explícitas. De su definición se deduce que la versión de la realidad que se realiza a través de un modelo pretende reproducir solamente algunos aspectos del objeto o

sistema original, el cual queda representado por otro objeto o sistema de menor complejidad [Joly 1988].

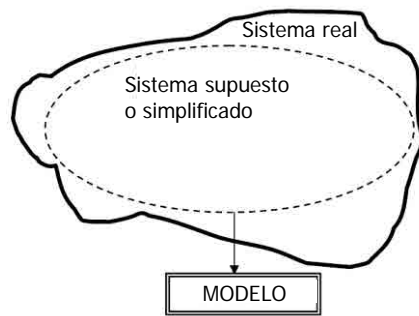
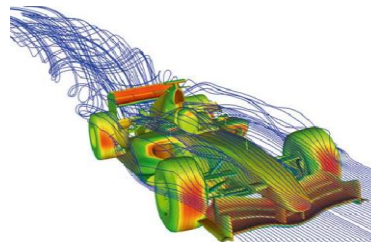


Fig. 5.4 Gráfico de la relación entre sistema real, sistema simplificado y modelo.
Fuente: Modelos matemáticos y simbólicos, M. Ruiz

Los modelos de simulación se construyen con el propósito de explorar y predecir el comportamiento del objeto de estudio bajo diversas condiciones. La efectividad para llegar a respuestas concluyentes sobre el mismo dependerá principalmente de una correcta selección de los factores relevantes del problema, y de una adecuada descripción de sus relaciones funcionales y sus variables. El grado de complejidad del modelo también estará relacionado con este planteamiento inicial y con el número de variables consideradas.



(A)



(B)

Fig. 5.5 (A) Coche de fórmula 1 (B) Modelo computacional de un coche de fórmula 1.
Estudio aerodinámico mediante CFD.

Fuente: <http://www.efectosuelo.com/cienciaytecnología>

Toda construcción de un modelo ha de partir de un paradigma, lo cual consiste en grupo de conceptos, leyes y métodos que sirven para definir un conjunto de modelos. Cada modelo se construye basado en un paradigma particular, el cual representa la variedad de comportamientos del sistema real. El proceso o técnica de creación de un modelo ya sea físico o matemático, se denomina modelado o modelización. Cuando se trata de modelos matemáticos procesables paso a paso por ordenador, algunos autores consideran el proceso de simulación desde la construcción misma del modelo, otros consideran que el proceso de creación del modelo siempre es una fase de modelado y la simulación es una fase posterior. Por tal motivo se puede encontrar indistintamente una u otra expresión y en ocasiones puede inducir a confusión.

Hay dos métodos de modelado de sistemas complejos: el método analítico y el método basado en simulación computacional. Cuando el problema a resolver es simple es conveniente el uso de métodos analíticos de modelación, los cuales están basados en el razonamiento. Mediante éstos, siempre es posible obtener soluciones generales al problema; las soluciones particulares se pueden hallar aplicando variables al modelo. Los problemas complejos, salvo pocas excepciones, son analíticamente inmanejables y numéricamente engorrosos de evaluar [Wainer 1996]. Frente a esta situación, los métodos de simulación ofrecen otra aproximación a la resolución del problema, la cual permite tratar cierta complejidad a partir de un modelo. Para que un modelo sea “simulable” ha de partir de un modelo matemático que pueda ser adaptado al lenguaje informático en un programa.

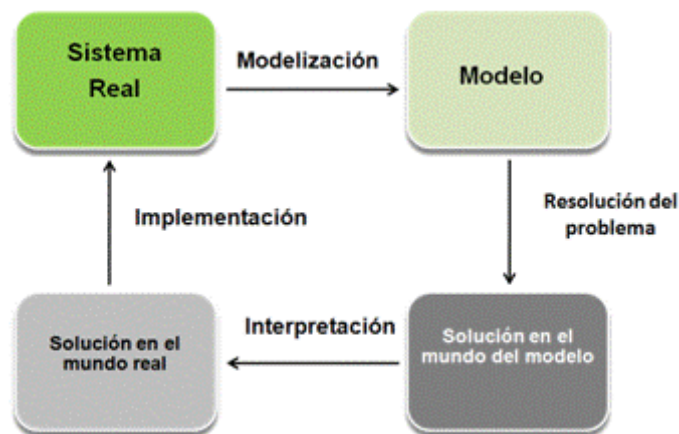


Fig. 5.6 Pasos en el estudio de un sistema por medio de modelización
Fuente: elaboración propia basada en el gráfico de Giambiasi, 1996

En ocasiones se suele relacionar de forma implícita el concepto de simulación con el uso de un ordenador, pero esto no es así necesariamente. El modelado, según se explicó previamente, consiste en la creación de un modelo el cual puede ser computacional o no. La implementación de los ordenadores en el análisis de los modelos ha sido de gran ayuda a la comunidad científica. La resolución de cálculos por métodos numéricos ha posibilitado abordar problemas para los cuales es imposible considerar una solución analítica. No obstante, a efectos del presente estudio, al hablar de simulación nos interesa tener en mente los modelos computacionales. Los beneficios del uso de la simulación son muchos: permite un tipo de experimentación controlada, compresión de tiempo (una simulación se realiza en un tiempo mucho menor que el sistema real que modela), su uso no afecta al sistema real (éste puede seguir utilizándose o no existir), las decisiones pueden corroborarse artificialmente y

su viabilidad puede ser estudiada, un mismo modelo puede usarse muchas veces (ser un modelo paradigmático o universal), un modelo puede ser calibrado (verificado, modificado y mejorado), en el modelo se pueden probar distintas configuraciones de entrada [5] y obtener en los resultados cambios significativos. Los métodos basados en simulación no ofrecen soluciones generales, sino que buscan soluciones particulares al problema, lo cual es también una ventaja, pero implica necesariamente que los objetivos de la simulación sean muy específicos.

La era de la informática ha impulsado el desarrollo científico hasta niveles que eran impensables unas décadas atrás. El análisis numérico y la programación informática se han convertido en elementos integradores en los procesos de modelado y simulación computacional. Mediante el análisis numérico se busca la resolución eficiente de las ecuaciones que definen los problemas físicos, y a través del lenguaje informático se codifica la información del modelo para que ésta sea procesable a través del ordenador. El desarrollo de mejores prestaciones en los ordenadores y de programas más específicos han potenciado las técnicas de simulación. A estos programas que ejecutan las órdenes del modelo para generar su comportamiento se les denomina simuladores. Los simuladores actuales contienen herramientas que facilitan la construcción de los modelos y los cambios de configuración. Algunos programas de simulación disponibles en la actualidad tienen sistemas operacionales intuitivos, con un lenguaje asequible para la ejecución de procesos. Su manejo no requiere de un experto en informática, sin embargo, es importante señalar que los estudios basados en simulación precisan de equipos interdisciplinarios bien coordinados para cubrir los diferentes frentes del conocimiento requeridos.

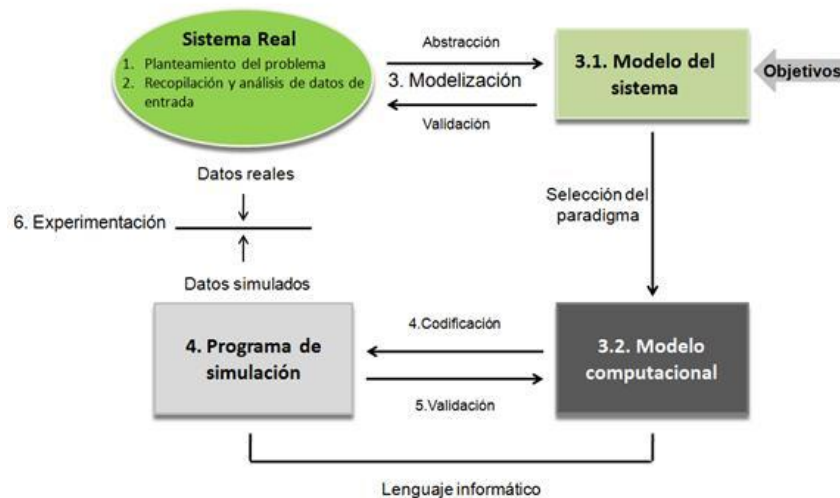


Fig. 5.7 Pasos en el estudio de un sistema por medio de simulación
Fuente: elaboración propia basada en el gráfico de R. Titiosky. Análisis de sistemas y simulación

Algunos programas de modelado generan automáticamente los códigos necesarios para poner en marcha los cálculos de la simulación desde cualquier equipo. Desde luego, éste debe contar con unos mínimos requerimientos de capacidad de memoria y de potencia para el procesamiento de los datos. El tiempo requerido para realizar los cálculos del proceso de simulación puede ser de días, semanas o meses, dependiendo de la complejidad del modelo y de la capacidad de los equipos empleados. Este tiempo de cálculo puede reducirse considerablemente mediante el uso de *clusters* [6]. De esta forma se pueden emplear varios procesadores en paralelo, para resolver de forma repartida (en diversos nodos o procesadores) los cálculos requeridos para generar la simulación.

Existen programas complementarios de visualización para ciertos procesos de simulación. Estos suelen operar con interfaces gráficas tridimensionales, las cuales permiten reproducir los fenómenos estudiados de forma realística en entornos de animación tridimensional. Los resultados (*outputs*) también se han convertido con el tiempo en uno de los puntos fuertes de los procesos informáticos. Es usual que los programas dispongan de diversos informes de resultados provistos de gráficos, curvas, estadísticas, etc. Con cada nueva versión de equipos y programas la investigación tecnológica da un paso más allá. La simulación, afirma John Casti (1997) (citado por Reynoso, 2006) está cambiando de alguna manera las fronteras de la ciencia.

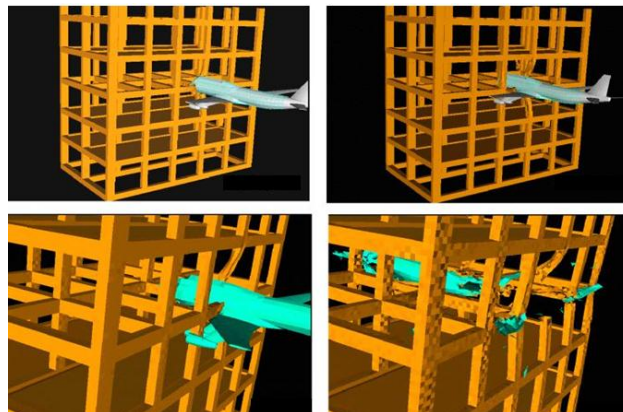


Fig. 5.8 Resultados de las simulaciones del impacto del avión comercial 747 contra la estructura de acero del WTC.
 Estudio computacional del siniestro del World Trade Center de Nueva York.
 Fuente: MSC Software Corporation. Programa Dvtran

Durante los últimos veinte años, el progreso del modelado y simulación computacional MSC ha tenido un impacto significativo en diferentes ramas de la física y la ingeniería. La dinámica de fluidos es una de estas ramas de la física que ha recurrido a soluciones numéricas procesables por ordenadores ante la complejidad que presentan

los sistemas que estudia. De este modo, surge una rama de la dinámica de fluidos denominada dinámica de fluidos computacional o CFD (en su acrónimo inglés *Computational fluid Dynamics*), que se basa en aproximaciones numéricas de las ecuaciones físicas empleadas en la dinámica de fluidos. A través de la CFD se han explorado fenómenos tan complejos como el fuego, el cual es para el presente estudio el tema de interés central. En la década de los ochenta del siglo XX surgen los primeros Modelos de Simulación Computacional de Incendios (MSCI) impulsados por los avances de las técnicas de la CFD. Su desarrollo ha ido a más a partir de los años noventa con la creación de diferentes programas de simulación del fenómeno del incendio.

Los MSCI son una importante herramienta utilizada en la investigación de diversos aspectos del incendio. Son un instrumento de gran utilidad en las investigaciones de incendios y en la evaluación de aspectos relacionados con la seguridad contra el fuego. La información referente a este tema será tratada con más detalle en el apartado 5.4.

5.2 Consideraciones sobre el uso del modelado y la simulación computacional

La relación entre ciencia y tecnología no tiene una definición simple. Hay diversas reflexiones derivadas de sus correspondientes roles en el propósito primordial de mejorar la calidad de vida del ser humano [7]. Por mucho tiempo ha existido una concepción dominante que considera a la tecnología como «ciencia aplicada» en muchos casos infravalorando su rol respecto a la ciencia. (Luján, 1989; Sanmartín, 1990; González, López Cerezo y Luján, 1996; Bunge, 1997; Acevedo, 1998; Carvalho y Vannucchi, 1998) (citados por Maiztegui et al., 2002). A lo largo de los últimos años ha surgido un creciente interés por romper con la idea de la tecnología como subproducto de la ciencia. Diversos autores han señalado que la falta de atención a la tecnología sería el resultado de concepciones erróneas acerca de la misma y de sus relaciones con la ciencia. (Gardner, 1994; Acevedo, 1996, 1998; Bybee, 2000) (citados por Maiztegui, 2002). En virtud del contexto actual de la investigación y el desarrollo o la innovación, resulta más consecuente situarlas en un mismo nivel, sin separar los términos, y hablar de desarrollo científico-tecnológico. De hecho, ninguna definición de las manejadas actualmente permite separar con claridad la ciencia de la tecnología, como lo pone de manifiesto la definición de tecnología dada por la UNESCO (1983) [8]. Desde la revolución industrial, los tecnólogos han incorporado de forma creciente las estrategias de la investigación científica para producir y mejorar sus productos.

Bunge (1985) reserva el nombre de tecnología a aquella técnica «compatible con la ciencia coetánea y controlable por el método científico». La interdependencia de la ciencia y la tecnología ha seguido creciendo debido a su incorporación a las actividades industriales y productivas, y eso hace difícil hoy, por no tener excesivo interés, clasificar un trabajo como puramente científico o como puramente tecnológico.

Para no desviar la atención del tema fundamental, no se insistirá en algo que parece contar con un amplio consenso y destacaremos dos citas que de nuevo hacen referencia expresa al binomio ciencia-tecnología: Valdés y Valdés (1994) [9] expresaron: ¿Qué ciencia puede concebirse hoy que no recurra, por ejemplo, a las nuevas tecnologías de la información? Unos años después Bybee (2000) [10] señaló: «Al revisar la investigación científica contemporánea, uno no puede escapar a la realidad de que la mayoría de los avances científicos están basados en la tecnología».

Sirvan estos argumentos para situar en su contexto la validez de los métodos de investigación basados en programas informáticos (los cuales son instrumentos tecnológicos por definición) antes de hacer referencia a sus limitaciones. Los métodos de simulación, al igual que otros instrumentos empleados en el ámbito de la investigación y el desarrollo, tienen sus ventajas y sus desventajas. De las primeras se ha hablado en el punto anterior y las segundas las abordaremos a continuación.

Los métodos de modelado y simulación computacional han alcanzado un importante desarrollo durante los últimos diez años impulsando diversas líneas de investigación. Mediante estos instrumentos tecnológicos, los científicos han podido desarrollar poderosas herramientas que han permitido abordar temas hasta no hace mucho vetados [Ibáñez 2008] [Salas 1993]. Pese al innegable aporte del desarrollo científico-tecnológico, dentro de la comunidad de expertos han surgido críticas en torno al mal uso que se puede hacer de la tecnología. J.J.Ibáñez (2006) ilustra con claridad dicha situación citando una publicación de Peter A. Burrough (1993) reconocido investigador que introdujo los SIG para uso de modelado y los fractales en edafología [11].

Peter A. Burrough denominó “paradoja tecnológica” a las consecuencias derivadas de adoptar las innovaciones tecnológicas sin un adecuado análisis previo. Concretamente se refiere a la aplicación de herramientas, como los SIG o la información satelital, sin un riguroso análisis sobre sus bondades y debilidades respecto al objeto de estudio. Señala que «el entusiasmo precipitado y poco crítico sobre las potencialidades que ofrecen las nuevas tecnologías puede estar encubriendo problemas de fondo de la

investigación». La crítica que expone no va encaminada a descalificar la utilidad de los programas o los equipos de computación – desconocer su utilidad sería faltar a la verdad; más bien subraya la importancia del rigor científico en la aplicación de los métodos de investigación, y advierte acerca de la dependencia de la tecnología en la investigación y de las imprecisiones que puede acarrear el uso inapropiado de ésta. Sus afirmaciones pueden extrapolarse a los diferentes ámbitos del conocimiento en los cuales se emplean estos instrumentos tecnológicos. Otro factor relevante a considerar con precaución es la forma de asumir los resultados obtenidos a partir de un modelo de simulación. No hay que perder de vista que el modelo es una emulación de la realidad, por tanto, la información que se obtiene a partir de éste se debe considerar una aproximación. Partiendo de esta premisa, el investigador ha de valorar si la obtención de estimaciones le permitirá avanzar hacia los objetivos planteados y le puede llevar a alguna toma de decisiones. Determinar que los resultados de una simulación son estimaciones, no sugiere que éstos carezcan de utilidad o de interés. Es por este motivo son llamados, y con razón, modelos de simulación predictivos. Mediante sus resultados se pueden prever posibles impactos, observar y manipular variables, controlar procesos, tomar decisiones, etc. Los resultados que se obtienen a partir de la simulación en la mayoría de los casos se mueven más en un orden cualitativo que cuantitativo, lo cual, en ninguna manera demerita el valor de los datos obtenidos. El excesivo interés en los aspectos cuantitativos de la ciencia actual puede ir en detrimento de los aspectos cualitativos, los cuales pueden ser tanto o más importantes que los primeros [Ibáñez 2008].

De acuerdo a lo expuesto, una investigación basada en simulación parte del hecho concreto de que los resultados obtenidos no son definitivos ni exactos, y lo más importante, no se deben confundir con la realidad que simulan. Esta situación deriva al final en una de las ventajas de este instrumento: su posibilidad de ser corregido, mejorado (calibración y ajuste del modelo) y reutilizado para otras investigaciones de temas afines.

Esta última consideración cabría matizarla para algunos casos, puesto que pese al esfuerzo generalizado por crear modelos paradigmáticos (universalizar) que puedan ser aplicados a diferentes problemas, hay sistemas particularmente complejos y específicos en los que difícilmente se podría llevar a cabo dicha aplicación. Por citar un ejemplo puntual mencionaremos el estudio de la erosión o de la hidrología de las laderas en la zona mediterránea. Este caso plantea una problemática tan particular por la zona que cubre, que sus variables son de algún modo únicas; por tanto resulta más

fácil y económico realizar un nuevo modelo de estudio, antes que aplicar algún modelo existente de similares características. Aunque el ejemplo corresponde a un tema muy preciso, es aplicable a cualquier disciplina. Esta dificultad en establecer parámetros más genéricos para aplicar los modelos se constituye en otra de las limitaciones de los procesos de simulación.

Los procesos de simulación requieren por lo general de equipos interdisciplinarios bien constituidos. Cuanto más complejo es un problema a modelar, más variables se deben considerar, y todas éstas además tienen sus correspondientes interacciones, añadiendo más dificultad. De las decisiones procedentes del grupo de expertos, dependerán los óptimos resultados del modelo. No obstante un modelado debidamente formulado cumplirá ampliamente con los cánones científicos aunque se trate de una simulación. La simulación de un proceso puede guiar y minimizar la investigación experimental, pero no eliminarla. La calibración de los modelos, que consiste en realizar las modificaciones oportunas, requiere de datos muy precisos, los cuales sólo se pueden obtener mediante la experimentación. Es el experimento el que pone a prueba un modelo, para que sea corregido hacia una mejor aproximación, y no lo opuesto. Esta aclaración es importante porque de hecho la simulación existe en la medida que se han podido experimentar algunos parámetros con los cuales se pueden introducir los datos que requiere. El concepto engloba la idea de llevar a cabo un proceso de retroalimentación, en el cual los métodos de simulación y de experimentación se sirven mutuamente. El concepto denominado validación es fundamental para que el modelo pueda ser un referente en otros estudios y consiste en contrastar la información obtenida mediante el modelo computacional con resultados obtenidos en experimentos reales. Un modelo computacional se considera validado cuando dispone de parámetros de referencia reales que permiten contrastar los resultados. No debe confundirse este concepto de validación con el de calibración, en el cual, según se explicó anteriormente, se realizan ajustes y mejoras en un modelo para lograr la máxima aproximación al objeto real.

Dado que el modelo representa la realidad de forma simplificada y por ende tiene una cantidad menor de información, existe un error inherente al proceso de modelización que puede ser reducido pero no eliminado. La reducción del error puede hacerse por dos caminos complementarios:

- Mayor precisión en la medida y mejor selección de los componentes. Esta situación no necesariamente implica una mayor complejidad en el modelo.

- Mayor cantidad de componentes, partes e interrelaciones funcionales. En este caso sí implica una mayor complejidad en el modelo, lo cual puede limitar las posibilidades de modelizado y repercutir en los tiempos de cálculo computacional.

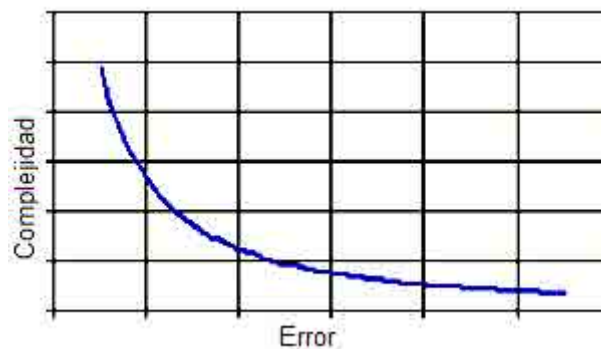


Fig. 5.9 Relación genérica entre error y complejidad.
 La modelización pretende reducir el error manteniendo una complejidad reducida.
 Fuente: A. Felicísimo. Conceptos básicos, modelos y simulación

La eliminación del error implicaría la identificación del modelo con el objeto real, lo cual no es posible o más bien se estaría retornando al problema inicial. En este sentido, debe buscarse el consenso entre la complejidad del modelo y el error aceptable en los resultados. Un estudio de simulación no puede ser conducido o llevado a cabo de forma precipitada, o expresado en palabras simples, en solo un fin de semana. Se requieren meses de esfuerzo y pruebas para reunir información, construir, verificar y validar modelos, diseñar experimentos y evaluar e interpretar los resultados.

En algunos sectores del ámbito científico existe una brecha conceptual y metodológica entre quienes se declaran acérrimos defensores del uso de las nuevas tecnologías, despreciando en ocasiones principios científicos universales, y quienes se desmarcan rotundamente del desarrollo tecnológico. Por tanto, es bueno insistir en posiciones más ecuanímes que reconocen la importancia del progreso de la investigación desde una visión científico-tecnológica entendida desde una base de conocimiento científico y considerando las posibilidades y las limitaciones de las técnicas disponibles.

“Más vale acertar aproximadamente que errar con precisión” Ibáñez (2006).

5.3 Tipos de modelos de simulación

Existen distintas clasificaciones de los modelos, basadas en diferentes criterios, derivados todos ellos de la disciplina o actividad que los genere. Una clasificación muy utilizada es la aportada por Turner (1970) según la cual se distinguen tres tipos básicos de modelos en función de la relación establecida entre el modelo y el objeto o sistema real que representa:

- Modelos icónicos o físicos
- Modelos analógicos
- Modelos simbólicos o matemáticos

Los modelos icónicos o físicos tratan de reproducir objetos o fenómenos mediante escenarios físicos simplificados cuyo comportamiento es similar al del objeto real. La relación de correspondencia con la realidad se establece a través de propiedades morfológicas, normalmente un cambio de escala con conservación del resto de propiedades topológicas. Un ejemplo de modelo icónico es una maqueta donde la relación con el objeto real se establece mediante un factor de escala.

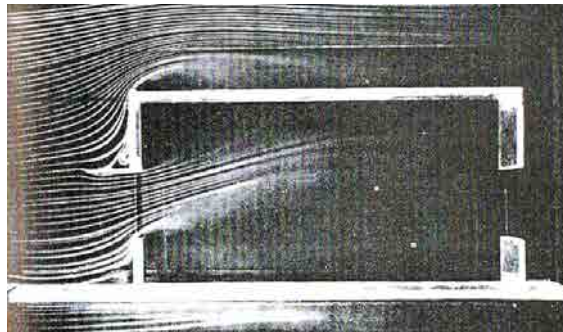


Fig. 5.10 Los prototipos a escala reducida realizados por Víctor Olgay son un buen ejemplo de modelo icónico o físico.
Fuente: V. Olgay, Arquitectura y clima, 1963

Los modelos analógicos poseen algunas propiedades de los objetos representados pero no son una réplica morfológica de los mismos. Para su construcción se utiliza un conjunto de convenciones que sintetizan y codifican propiedades del objeto real para facilitar la lectura e interpretación de las mismas. Un ejemplo de modelo análogo es un mapa impreso que se construye mediante un conjunto de convenciones cartográficas de cierta complejidad, que conducen a un resultado final claramente distinto del objeto representado, pero legible y comprensible en sus propiedades más representativas.

Aunque de forma generalizada a estos modelos se les denomina analógicos, algunos autores consideran mejor llamarlos modelos análogos, porque la palabra expresa claramente de lo que se trata: de un objeto análogo y no homólogo respecto al sistema que simulan. También la denominación de modelo análogo evita la ambigüedad con los modelos analógicos (resueltos mediante ordenadores analógicos) que corresponden al grupo de los modelos simbólicos o matemáticos, los cuales se explican a continuación.

Los modelos simbólicos establecen una relación más abstracta respecto al objeto real. En este tipo de modelos la representación se puede realizar utilizando tanto la matemática continua (álgebra, geometría, trigonometría, límites, cálculo diferencial e integral, ecuaciones diferenciales, series, transformadas, teoría del campo, etc.), como la lógica matemática, por esto también se les denomina modelos matemáticos. Por ejemplo la teoría de la relatividad de Einstein, $E= mc^2$, es un modelo matemático que expresa la relación entre la energía y la masa del universo.

En la década de los 70 del siglo pasado se aplicaban, en la mayoría de los casos, soluciones analíticas a los modelos matemáticos que se planteaban. En ocasiones, debido a su complejidad, era necesario recurrir a simplificaciones u omisiones en los procesos matemáticos. El desarrollo de la informática era aún incipiente y por tanto no era un punto de inflexión en la solución de los cálculos matemáticos de mayor complejidad. A partir del fuerte desarrollo de las técnicas informáticas, acaecido en los años 80, se dio un continuo perfeccionamiento de los métodos numéricos y con éste se alcanzó un nivel de resolución matemática que permitió abordar problemas complejos sin realizar simplificaciones ni omisiones en los procesos.

Los modelos simbólicos o matemáticos pueden ser resueltos por métodos analíticos o por métodos numéricos. La solución analítica de un modelo consiste en la obtención de una expresión matemática de la que se pueden obtener directamente los valores de las variables de salida. La ventaja de una solución analítica es que da una visión integral sobre la conducta del sistema. Realizando variaciones en sus parámetros es posible identificar fácilmente cambios importantes en el comportamiento, detectar puntos críticos y sacar conclusiones generales para el tipo de sistema analizado. Cuando el modelo es demasiado complejo, la posibilidad de usar una solución analítica se desvanece, dando paso al estudio del sistema mediante un método de análisis numérico [12] o simulación. La resolución numérica de los modelos se realiza a través de ordenadores implementando un lenguaje computacional.

Según el tipo de ordenador que se emplee para su resolución los modelos simbólicos se pueden considerar:

- Modelos analógicos: Cuando se implementan en ordenadores analógicos [13].
- Modelos digitales: Cuando se implementan en ordenadores digitales capaces de procesar gran cantidad de datos.

Pese al frecuente uso de los medios informáticos para resolver modelos matemáticos, los métodos analíticos siguen siendo muy importantes en la resolución de algunos procesos. En ocasiones se utilizan soluciones analíticas simplificadas para ganar claridad en los procesos modelados o para ayudar en las tareas de verificación y validación de los modelos. Los modelos conceptuales, dependiendo del tipo de información que se utilice para su elaboración, también se pueden considerar:

- Modelos lógicos
- Modelos físicos
- Modelos empíricos
- Modelos semi-empíricos

Un modelo lógico es aquel en el cual la representación de una estructura o proceso se formula mediante las leyes de la lógica. Estas últimas suelen acudir a la simbología matemática.

El modelo físico, en este caso no se refiere a la reproducción material de la cual se habló antes, sino al que se basa en conceptos propios de las ciencias físicas. Estos modelos también son llamados deterministas porque se sustentan en leyes físicas bien conocidas.

Un modelo empírico prescinde de consideraciones teóricas, se centra en la identificación de relaciones significativas entre ciertas variables que se asumen como esenciales para modelar el comportamiento del sistema. Para ello se debe disponer de una cantidad de datos suficiente. De acuerdo al grado de conocimiento que se tenga de los datos correspondientes pueden subdividirse en tres categorías:

- Caja Negra: Sólo se analizan los datos de entrada y de salida del modelo.
- Caja Gris: Se explican algunos detalles del conocimiento existente sobre el comportamiento del sistema.

- Caja Blanca: Se conocen y explican todos los detalles del comportamiento del sistema.

Por último los modelos semi-empíricos son aquellos que utilizan leyes físicas y estimaciones empíricas simultáneamente.

Como se indicaba al inicio de este apartado hacer una clasificación de los modelos no resulta simple por los diversos criterios que los agrupan dependiendo de sus áreas de aplicación. Igualmente resulta complejo categorizar los modelos simbólicos y computacionales porque de ellos surgen diferentes familias de modelos según las herramientas metodológicas utilizadas para su elaboración, según las interfaces con las que se operen o las aplicaciones para las que se utilicen.

El desarrollo computacional ha supuesto un importante salto para los modelos simbólicos, dando lugar a una generación de modelos digitales con aplicaciones en diversos ámbitos. Los modelos digitales se definen como modelos matemáticos que requieren para su construcción un proceso de codificación de la información, y permiten una representación virtual manejable a través de medios informáticos. Durante los últimos años los modelos digitales se han convertido en una técnica muy utilizada. Mediante estos modelos se puede realizar desde la recreación tridimensional de una ciudad o de un organismo biológico, hasta la reconstrucción de un edificio en ruinas o de una pieza ósea para investigaciones paleontológicas. Las nuevas tecnologías ofrecen diferentes alternativas para la generación de esta información: fotogrametría digital, métodos de correlación de imágenes a nivel de elemento, sensores remotos ópticos con SPOT e Ikonos, sensores radar y láser, capturas GPS, recursos por satélite, escáner láser de 3D entre muchos otros [Maune 2007].



Fig. 5.11 Comparativa de los modelos analógicos (mapa gráfico con información de medios de transporte) y modelos digitales (mapa digital con fotos de satélite).
Fuente: Google Maps

Para mencionar algunos ejemplos de modelos digitales reconocidos citaremos algunas áreas del conocimiento que hacen un uso frecuente de distintas tecnologías afines: la arquitectura, ingeniería y el diseño que se sirven de los programas CAD conocido como diseño asistido por ordenador (de su acrónimo inglés *Computer-aided Design*) mediante el cual es posible obtener modelos tridimensionales y animaciones (Fig. 5.12). El uso de interfaces permite también la integración de los modelos de diseño con procesos de análisis de ingeniería y documentación técnica.



Fig. 5.12 Imágenes de un modelo digital interactivo de la ciudad de Granada.
Instituto Nacional de Rehabilitación del Ayuntamiento de Granada.
Fuente: http://www.ugr.es/~jaf Ruiz/LGRobles_JAF Ruiz_espanol.pdf

Por otro lado disciplinas como la geología, la cartográfica, la arqueología, la evaluación del impacto ambiental, la planeación urbana, el marketing, la sociología etc. se sirven de sofisticados instrumentos tales como: los SIG sistemas de información geográfica (ver nota 3), la tecnología LiDAR, la cartografía digital, los modelos digitales de elevación de terreno MDET entre otros para llevar a cabo diferentes tareas de desarrollo social, geográfico, estadístico y económico. Los modelos digitales de elevación de terreno, por ejemplo, son útiles para la planeación de proyectos de

carreteras, rutas de acceso para prevención de desastres, ordenación de zonas de población etc. (Fig. 5.13).

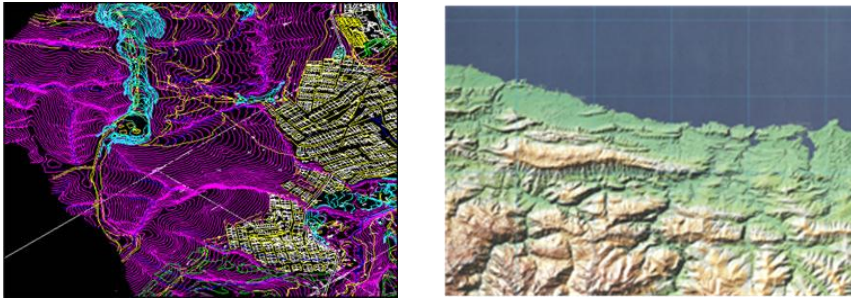


Fig. 5.13 Modelo digital de terreno MDT. Zona de Asturias.
Fuente: <http://www.fomento.es>

La anterior clasificación ilustra a grandes rasgos el amplio contexto de los modelos de simulación. No obstante, es importante aclarar que cada disciplina en la que se aplican técnicas de modelización reconoce sus propios tipos de modelos y por tanto su clasificación puede ser distinta.

Desde la perspectiva del MSC se considerarán únicamente los modelos simbólicos o matemáticos, puesto que se trata de instrumentos informáticos procesados por ordenadores. Según Law – Kelton (1991) de acuerdo a la naturaleza del sistema y los objetivos específicos del estudio los modelos pueden ser:

- Modelos estáticos o dinámicos
- Modelos continuos o discretos
- Modelos deterministas o aleatorios (azar)

Los modelos estáticos son aquellos que no consideran el tiempo dentro de sus variables: en éstos se interpreta la realidad en un instante concreto. Un modelo estático puede ser una construcción, una pieza, un objeto cualquiera o un dispositivo, en el cual se establece una relación entre sus características o variables de estado con otras primarias. Los modelos dinámicos por el contrario sí consideran la variación temporal del sistema modelado. En la naturaleza predominan los fenómenos y procesos en los cuales el tiempo es un factor importante a considerar.

Los modelos continuos tratan las variables de estado del sistema modelado como variables en función del tiempo de trabajo o actuación del sistema, mientras que los discretos (o modelos de eventos discretos) consideran sólo acciones o eventos

característicos del sistema simulado para los que no se toma en consideración su evolución, sino sólo el momento en que acontecen [Alvear et al. 2007].

Los modelos deterministas no consideran los factores aleatorios del sistema en el modelo y, para un conjunto dado de datos de entrada, los resultados de la solución del modelo siempre son los mismos. Por el contrario los modelos estocásticos toman en consideración estos factores aleatorios. Para ello se vale de la aplicación de los métodos de la teoría de probabilidades, la estadística matemática y los métodos Monte Carlo [14].

Los modelos dinámicos deterministas generan los mismos resultados si se parte del mismo escenario (mismos datos y mismos algoritmos). En los modelos dinámicos estocásticos se introduce ruido en una o más etapas del proceso mediante un generador de datos aleatorios, con lo cual se generan diferentes resultados a partir de un mismo escenario de partida.

Para estudiar el fenómeno del fuego, los modelos más utilizados son los modelos deterministas. Algunos autores insisten en la importancia de emplear modelos estocásticos, teniendo en cuenta la naturaleza aleatoria de casi todos los procesos intrínsecos que ocurren durante un incendio [Watts 2002], sin embargo éstos en relación a los primeros están en una etapa de desarrollo inicial.

5.4 Introducción al modelado y simulación computacional de incendios

El modelado y la simulación computacional de incendios MSCI se pueden definir como: unas aplicaciones informáticas que reproducen las condiciones de temperatura, presión, velocidad, concentración de gases etc., que se dan en el escenario de un incendio. El objetivo primordial es simular lo más fielmente posible los efectos del fuego durante el desarrollo de un incendio. Los MSCI también suelen denominarse: modelos computacionales, modelos de simulación de incendios o programas de simulación computacional de incendios, entendido como un modelo matemático implementado en un ordenador con el fin de realizar experimentos [Alvear et al. 2007].

El origen de los programas de simulación computacional de incendios se sitúa a finales de los años 70 del siglo XX, cuando se estudiaron los primeros modelos de zona en compartimentos cerrados. El entonces *National Bureau of Standards* y ahora *National Institute for Standards and Technology* NIST de EEUU y en particular el

equipo liderado por el profesor Howard Emmons iniciaron con sus investigaciones este campo de estudio, el cual desde sus inicios generó prometedoras expectativas de evolución.

En las investigaciones preliminares el objetivo principal era resolver la ecuación de la energía en un compartimento donde ya se había iniciado un incendio. Luego fue reemplazada por el concepto de un volumen de gas dividido en dos capas: una caliente, que ocupa la parte superior del compartimento y una fría que ocupa la parte inferior, con un intercambio de calor y masa entre las dos zonas y con escape de gases calientes al exterior y circulación de gases fríos originados en la capa inferior. Lo cual dio origen a los primeros *Zone Models* (modelos de zona) y en particular al que se llamó «Harvard I» que puede considerarse como el pionero del modelado computacional de incendios [Alvear et al. 2007].

A inicios de los años 80 comenzó el desarrollo de los modelos conocidos como *Field Models* (modelos de campo). En estos modelos se resolvían las ecuaciones de conservación de masa, momento y energía en forma diferencial. La capacidad computacional de los ordenadores de entonces limitó el tamaño de los primeros modelos de campo a recintos muy reducidos, sin embargo con la capacidad de describir el inicio del fuego y su propagación en un recinto cerrado. El avance progresivo de las técnicas de CFD influyó de manera importante en el origen y desarrollo de los MSCI.

Las técnicas del CFD surgen como una rama de la dinámica de fluidos encargada de posibilitar el estudio de los complejos sistemas que ésta comprende. Se basa en aproximaciones numéricas de las ecuaciones físicas que la gobiernan. La dinámica de fluidos estudia los movimientos de los fluidos (gases y líquidos) debidos a la acción de fuerzas, o a su interacción con otros medios y con el contorno que los delimita. El fuego se estudia a partir de estos parámetros. Los gases que forman parte fundamental del fenómeno son considerados por sus propiedades fluidos compresibles. La dinámica de fluidos forma parte de un campo más amplio denominado mecánica de fluidos, del cual derivan tanto la estática de fluidos (estudia los fluidos en reposo), como la dinámica de fluidos (estudia los fluidos en movimiento). En la actualidad, la mecánica de fluidos es una parte esencial de muchas áreas de la tecnología, la ciencia y la ingeniería. Es destacable su papel en el diseño de toda clase de vehículos (aviones, barcos, coches, etc.), estudios del flujo de aire atmosférico, medicina y biología (flujo de sangre y otros fluidos), ingeniería industrial, etc.

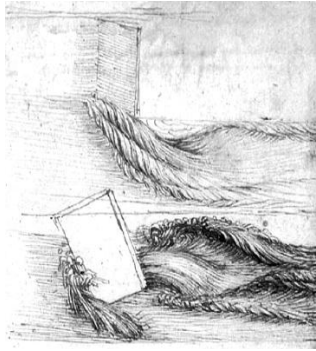


Fig. 5.14 Dibujos de Leonardo Da Vinci. Estudios sobre los fluidos.
Fuente: <http://www.ib.cnea.gov.ar/~fluidos/galeria.html>

La aparición de los MSCI se unió, aunque de forma tardía, al desarrollo de MSC usados en otras disciplinas como: la cosmonáutica y aeronáutica, la electrónica, las comunicaciones, las ciencias atmosféricas, los procesos industriales, entre otros. Desde los años 70 estas disciplinas alcanzaron un desarrollo notable, en parte gracias a los MSC, lo cual significó el reconocimiento de estos instrumentos como rama científica en los años 90, aumentando la rigurosidad metodológica de los procesos, la credibilidad y la efectividad.

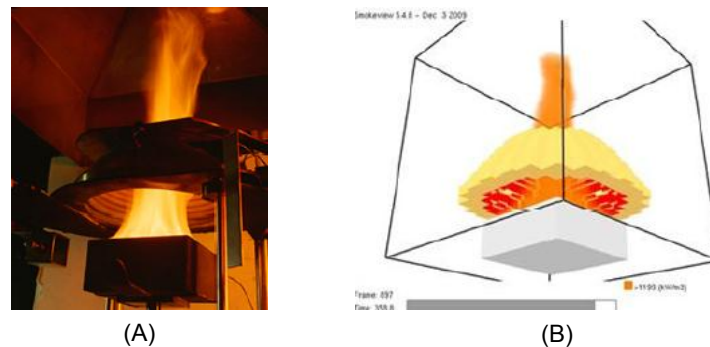


Fig. 5.15 Ensayo con un calorímetro de cono.
(A) Objeto real (B) Objeto simulado
Fuente: Laboratorio del fuego EPSEB Universidad Politécnica de Cataluña UPC.

El funcionamiento de estos programas consiste en la implementación de métodos numéricos capaces de resolver las ecuaciones diferenciales y algebraicas que gobiernan los procesos asociados al incendio, como las ecuaciones de conservación de masa, momento y energía en flujos turbulentos entre otras. Una cualidad muy importante de los MSCI es su capacidad de predecir de forma precisa y realista el comportamiento probable de un incendio dentro de unos límites establecidos. Esta capacidad ha ido en aumento con el paso de los años: cada nueva generación de programas presenta mejoras sustanciales en la resolución del fenómeno. Esto hace vislumbrar un futuro prometedor para la investigación con técnicas de simulación

computacional. Hoy en día existen alrededor del mundo diferentes equipos de investigación con el objetivo de incrementar sus prestaciones, disminuir el nivel de incertidumbre y obtener cada vez resultados más fiables.

El uso de MSCI se ha ido extendiendo a diversos ámbitos profesionales. Actualmente es empleado por: ingenieros de seguridad contra incendios (ISCI), arquitectos, técnicos de bomberos, miembros de comités de redacción de códigos y normativas, fabricantes de materiales y productos, investigadores, educadores etc. Estos instrumentos facilitan las tareas en diversas actividades tales como: el estudio de los aspectos científicos y tecnológicos de los incendios, la investigación de siniestros producidos por el fuego, el estudio de nuevas medidas de protección contra incendios en la edificación, la predicción de posibles riesgos de propagación del fuego en edificios singulares etc. El MSCI permite considerar múltiples escenarios de fuego y estimar sus consecuencias sin tener que realizar costosos experimentos para cada caso a analizar, lo cual representa un ahorro de tiempo y dinero considerable.

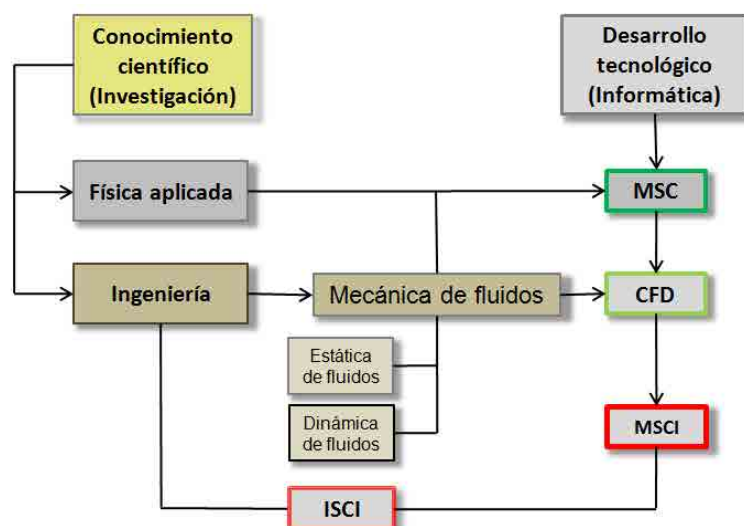


Fig. 5.16 Esquema del origen de los MSCI como disciplina de estudio del fenómeno del fuego.
Fuente: elaboración propia

El análisis de la evolución y de las consecuencias de un incendio implica diversos factores que van más allá de los procesos físicos que controlan el fenómeno del fuego. Otras variables a considerar en una situación de incendio son: el comportamiento humano, la resistencia de las estructuras, el comportamiento de los materiales, el funcionamiento de medios de protección, sistemas de control de humo y ventilación etc. El campo de los modelos numéricos que cubre estas áreas ha sido muy prolífico durante la última década. Actualmente existe gran variedad de modelos numéricos que permiten estudiar los incendios considerando diversos aspectos relacionados con las consecuencias de los incendios. Un estudio publicado por Olenick y Carpenter en

2003 clasifica unos 170 modelos con diferentes objetivos y aplicaciones: modelos de zonas, de mecánica computacional de fluidos, de resistencia de estructuras, de simulación de evacuación, de simulación para medidas de protección activa, etc. Durante los últimos cinco años la investigación relacionada con la dinámica del incendio se ha expandido a sectores tan importantes y complejos como los incendios forestales. Sin embargo el desarrollo en esta área del conocimiento se considera que está en una etapa preliminar.

Como se indicó en el punto anterior los MSCI pueden ser: estocásticos o deterministas. Dada la importancia de los dos conceptos en relación al estudio del comportamiento del fuego se considera oportuno detenerse sobre algunos aspectos que los caracterizan.

Modelos estocásticos

Los modelos estocásticos, también llamados probabilísticos porque se fundamentan en la teoría de la probabilidad, tratan el crecimiento del fuego como una serie de sucesos o estados secuenciales. Su funcionamiento se basa en reglas matemáticas establecidas que controlan el paso de un suceso a otro, por ejemplo, desde la fase de ignición de un objeto hasta cuando se ha quemado por completo. Se asignan probabilidades como funciones del tiempo a cada punto de transferencia, basándose en el análisis de datos experimentales relevantes y datos estadísticos de accidentes por incendios. Estos modelos no utilizan directamente las ecuaciones químicas y físicas que describen los procesos del incendio. Los modelos estocásticos de incendio se pueden clasificar en tres categorías: de redes, estadísticos y de simulación. Cada una de ellas se refiere a la incertidumbre que supone el proceso de propagación del fuego.

Un modelo de red es una representación gráfica de vías o rutas por las que pueden discurrir objetos, energía, información o decisiones lógicas, entre un punto y otro. Los modelos de red analizan situaciones concretas con el propósito de minimizar el tiempo o la distancia a recorrer entre un punto y otro, determinar decisiones óptimas etc. Su campo de aplicación es amplio, y su mayor utilidad está centrada en la resolución de problemas en procesos complejos. Su representación gráfica se realiza a través de árboles de sucesos y árboles de fallos (Fig. 5.17). En los modelos de redes aplicados al crecimiento del fuego se considera que el paso de una etapa a otra y el efecto de las variables, están regulados por probabilidades asignadas por el usuario. Éstas se

basan en datos históricos, evaluaciones de ingeniería o ambos datos. Puede ser especialmente útil para evaluar la eficacia de sistemas de detección y alarma contra incendios y de supresión y extinción del fuego.

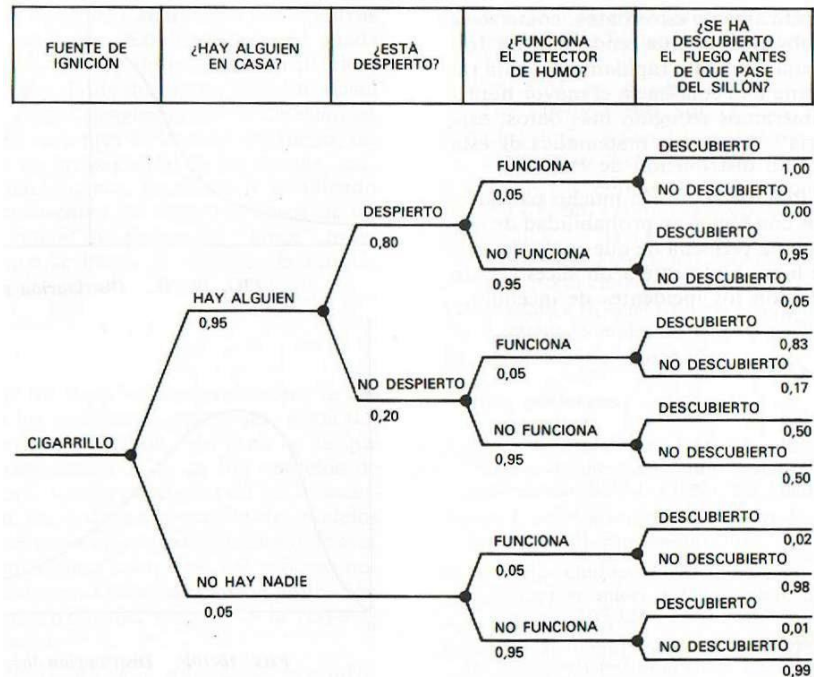


Fig. 5.17 Árbol de sucesos de un sillón tapizado quemado por un cigarrillo. Modelo estocástico de red.

Fuente: NFPA (National Fire Protection Association) Manual de protección contra incendios NFPA, 1991

Los modelos estadísticos suponen la descripción de fenómenos aleatorios mediante una distribución de probabilidades. Los campos de la probabilidad y la estadística están estrechamente relacionales entre sí. Buena parte de los conceptos estadísticos, como el muestreo y el contraste de hipótesis se basan en la teoría de la probabilidad representan la posibilidad de que se produzca un suceso basándose en diversos datos históricos [NFPA 1991].

Los modelos de simulación son una combinación de los probabilísticos y los deterministas. Estos modelos consideran los eventos de fuego como deterministas una vez que el incendio está claramente definido. Sin embargo, se supone que las variables del modelo siguen modelos probabilísticos. Por tanto, las variables del modelo determinista se consideran aleatorias. Tales variables pueden ser los muebles que se han quemado o la distancia hasta una puerta abierta en el momento en que se declaró el incendio. Los modelos de evacuación de personas en escenarios de incendio son un típico ejemplo de este tipo de modelos de simulación.

Modelos deterministas

A diferencia de los modelos estocásticos no contienen ningún elemento aleatorio. Los modelos deterministas suponen que, dada una situación física definida, la propagación y comportamiento del fuego está totalmente determinada. En este tipo de sistema las variables de salidas e internas quedan perfectamente determinadas al especificar las variables de entrada, los parámetros y las variables de estado. Los modelos deterministas del fuego pueden ir desde una sencilla correlación de una línea de datos hasta modelos muy complejos que requieren horas de cálculo con ordenadores potentes. El aspecto común a todos estos modelos es que el desarrollo de un fuego se fija por las variables que establecen en el entorno en que se desarrolla. Las condiciones físicas que determinan la propagación y resultados del fuego se llaman la hipótesis del fuego. Incluye los combustibles afectados, la disposición de esos combustibles, las características de edificio y sus sistemas de protección contra incendios, la localización de las fuentes de ignición, la ubicación y capacidad de sus ocupantes y muchas otras variables que afectan el resultado del fuego. Por tanto la definición de la hipótesis del fuego es muy importante para todos los modelos deterministas. Estos modelos representan los procesos que surgen en incendios de recintos cerrados, consideran expresiones matemáticas interrelacionadas, basadas en la física y química. Como se mencionó antes, un modelo determinista maneja un amplio espectro de modelos que pueden ser más o menos complejos. Comprende desde una expresión matemática sencilla hasta modelos que describen el comportamiento de un incendio en uno o en varios recintos. Estos procesos pueden ser de gran complejidad porque incluyen muchos procesos físico-químicos. Estos modelos complejos se pueden clasificar en dos grandes grupos:

- Modelos de zona
- Modelos de campo

Un modelo de zona es un programa computacional que predice los efectos del desarrollo de un incendio en un recinto. Este modelo supone que el recinto del incendio se divide (o discretiza) idealmente en dos zonas o volúmenes de control: una superior, ocupada por los gases calientes de la combustión y una inferior ocupada por aire frío. En cada zona se asume una temperatura y concentración de gases uniforme. El plano que divide las zonas es la interface térmica, la cual se mueve verticalmente en función del tiempo transcurrido durante el incendio, normalmente en la evolución del incendio la capa superior invade la totalidad de la capa inferior.

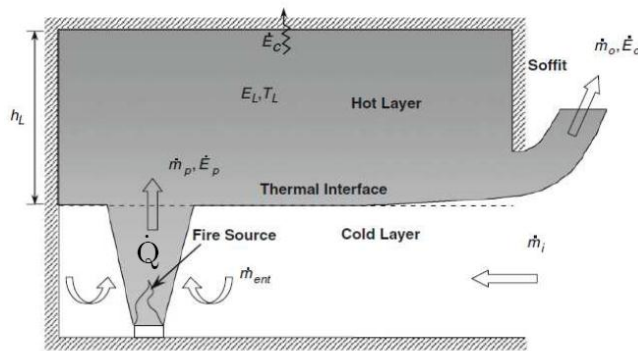


Fig 5.18 Gráfico de un modelo de dos zonas
 Fuente: Enclosure fire dynamics, B. Karlsson, J.Quintiere, 1999

Estos modelos resuelven las ecuaciones diferenciales que definen la conservación de la masa y de la energía para cada una de las zonas, considerando los intercambios entre las capas. En la mayoría de las aplicaciones el recinto no se considera como un espacio cerrado: normalmente se incorpora en los cálculos el suministro de aire que representan puertas, ventanas y ventilaciones.

Los modelos de zona son útiles para estudiar recintos de configuración simple y tamaño pequeño. Se basan en un número limitado de hipótesis, requieren poco tiempo de cálculo y ofrecen un nivel de detalle adecuado. Los cálculos del modelo proporcionan estimaciones sobre la evolución del estado de las capas de gas superior e inferior en función del tiempo. También aportan información sobre la pérdida de calor a través de las paredes y la velocidad de los gases a través de las aberturas. Los resultados obtenidos a través de un modelo de zona acerca del espesor de la capa inferior de gases en función del tiempo resultan de interés para estudiar las condiciones de evacuación y rescate de víctimas. Los modelos de zona más utilizados son: CFAST (NIST, EE.UU) y Ozone (Universidad de Lieja, Bélgica). Otros programas de zona son: LAVENT (NIST, EE.UU), el CCFM, FISBA, ARGOS, MRFC, FLAMME_S, FIGARO, CSTBZ.

▪ **Modelos de campo CFD**

Los modelos de campo son también llamados CFD (*Computational Fluid Dynamics*) modelos de dinámica de fluidos computacional y tratan de forma general los principios que gobiernan la dinámica de los fluidos. Están constituidos por las ecuaciones diferenciales o integro-diferenciales que gobiernan el sistema y por las condiciones de frontera. Dentro de estas ecuaciones se encuentran las de conservación de masa, energía, momento y especies; también contiene un conjunto de ecuaciones en relación

a la transferencia del calor por radiación y las ecuaciones que conforman el modelo de combustión.

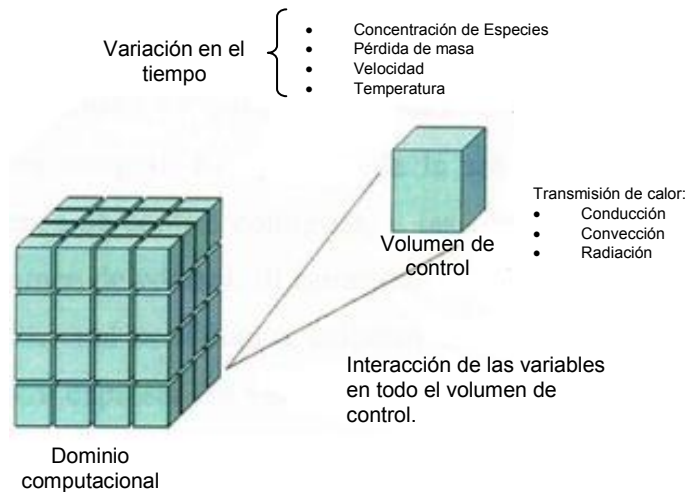


Fig. 5.19 Esquema de la discretización de un escenario utilizando un modelo de campo.
Fuente: López, 2006

Existen varias aproximaciones numéricas para resolver los modelos de campo. Las más importantes son: diferencias finitas, volumen finito y elementos finitos. Este tipo de métodos numéricos realiza una discretización en el espacio y el tiempo. El espacio es discretizado en forma de un conjunto de volúmenes de control de una escala pequeña respecto al volumen total del dominio computacional. Los pequeños volúmenes son llamados celdas o volúmenes de control. La discretización del tiempo se hace de forma tal que se utilizan intervalos de tiempo para resolver, mediante los métodos numéricos, las ecuaciones que gobiernan el sistema considerando su evolución en el tiempo. Para cada una de las celdas de control el procesador calcula la temperatura, velocidad y concentración, así como todas las interacciones posibles, lo cual para flujos turbulentos puede ser más complicado. Esto nos da una idea de la complejidad que engloban los modelos de campo.

Con el tiempo se han creado diferentes programas de propósito general como son los modelos de dinámica de fluidos computacional (CFD) *Computacional Fluid Dynamics* para resolver diversos problemas relacionados con los fluidos, como ejemplo está el FLUENT. También hay diferentes modelos de campo centrados en el estudio del fenómeno del fuego. Se basan en paquetes de CFD a los cuales se les incorporan las ecuaciones relacionadas con la combustión y el transporte de calor y energía. Dos de los modelos empleados con mayor frecuencia a nivel internacional son: JASMINE desarrollado en UK por FRS y el FDS desarrollado en los EEUU por el NIST. Otros modelos conocidos son ALOFT-FT, CFX, FIRE, SOFIE, SOLVENT, FLOTRAN,

FLUENT, VESTA entre otros. La mayoría de CFD emplea modelos empíricos de turbulencia o modelos de grandes remolinos (LES) *Large Eddy Models*. En las aproximaciones LES se asume que el mínimo tamaño de un vórtice es el tamaño de la celda de control. De este modo se excluyen los sistemas con una alta turbulencia.

Los modelos de campo son considerados los modelos más avanzados para abordar el fenómeno del incendio. A diferencia de los modelos de zona éstos realizan pocas simplificaciones de los procesos de transferencia de calor y masa. La principal diferencia entre ambos modelos radica en que mientras los modelos de zonas dividen el recinto en dos regiones principales, los modelos de campo se basan en una solución tridimensional en la cual se divide el recinto en miles o millones de volúmenes de control. Por tanto, mediante los modelos de campo se obtiene información más detallada que con los modelos de zona. Esta cualidad tiene como desventaja que se precisa de mayores tiempos de cómputo y de gran capacidad en los equipos empleados. Los modelos de campo permiten la descripción de incendios en configuraciones geométricas complejas y la incorporación de una gran variedad de fenómenos físicos asociados al fenómeno del fuego. Pueden ser empleados para estudiar situaciones de incendio en el exterior, como por ejemplo un evento de fuego en un depósito de combustible. Su funcionamiento está basado en la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes así como las correspondientes a la turbulencia, la combustión y el transporte de masa y calor.

La descripción de la dinámica del incendio obtenida a través de los modelos de campo con el tiempo se ha ido acercando cada vez más a su comportamiento característico real. Es por ello que la aplicación de técnicas de simulación basadas en estos modelos goza cada vez más de mayor aceptación. En la actualidad en algunos países son usados por empresas de ingeniería y arquitectura para estudiar soluciones de protección contra incendios en edificios singulares, en casos donde no es posible aplicar las medidas prescritas por las normas. También son cada vez más empleados para estudiar soluciones de protección basadas en el concepto *Performance Based Design* (ver apartado 3.7.1) o investigar casos de incendio, por ejemplo los siniestros de incendio del *World Trade Center* de Nueva York y en el edificio *Windsor en Madrid* han sido estudiados con el modelo FDS (Fig. 5.20).

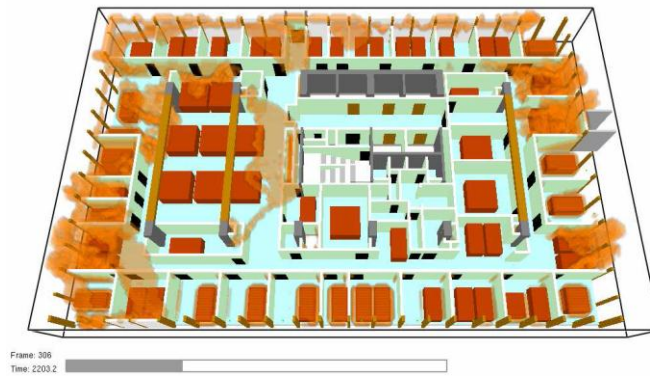


Fig. 5.20 Estudio del incendio del edificio Windsor de Madrid.
 Modelo de simulación de la planta 21.
 Fuente: Assessment of the thermal response of high rise buildings under natural fires using
 CFD and FEM analysis, Capote et al., 2009

Los continuos esfuerzos de investigación y desarrollo en torno a los modelos de incendio permiten prever que mediante estos modelos se conseguirá una aproximación cada vez más ajustada a la realidad de los incendios, minimizando el nivel de incertidumbre. La confianza en la capacidad de predicción de los modelos de simulación aumentará en la medida que aumente su uso para realizar diversos estudios, y éstos puedan ser validados. La divulgación científica y su cada vez más extendido concepto de red de colaboración en investigación pueden contribuir de forma importante en este aspecto.

5.4.1 Fire Dynamics Simulator FDS

La fase experimental de la presente tesis se ha realizado mediante modelos de dinámica de fluidos computacional (modelos de campo). Se ha elegido en concreto el programa FDS *Fire Dynamics Simulator* versión 5 [McGrattan et al. 2008]. También se han empleado dos programas complementarios al proceso de modelado:

- Pyrosim: es un programa que permite crear el escenario a estudiar, mediante una interfaz gráfica en tres dimensiones que facilita su modelado.
- Smokeview: es el programa compañero del FDS. Se podría considerar el post procesador del FDS porque lee los archivos de resultados creados por el FDS.

A continuación se explican los aspectos más importantes de los programas empleados.

Aspectos generales

FDS es un modelo de dinámica de fluidos CFD en el que se considera el fuego como un fluido. Es un programa en base Fortran 90 creado específicamente para reproducir situaciones de incendio en recintos. El programa resuelve numéricamente las ecuaciones que describen el desarrollo del incendio a partir de unos parámetros de entrada introducidos desde un archivo de texto. Para la observación de los resultados requiere de otro programa el Smokeview SMV, el cual lee los archivos de salida creados por FDS. El programa SMV posee una sencilla interfaz basada en menús, con la cual es posible observar los resultados en la pantalla del ordenador ya sea en forma de animación o de instantáneas. Los diferentes parámetros que se observan en los resultados han de ser especificados previamente por el usuario del programa.

Los programas FDS y SMV han sido desarrollados por el *National Institute of Standards and Technology* (NIST) [15] del Departamento de Comercio de los EE.UU. y más específicamente por el *Building and Fire Research*, en cooperación con el *Technical Research Centre of Finland* VTT. Son programas de dominio público no sujetos a protección de copyright, disponibles bajo el concepto “*free software*” [16] conocido en español como código abierto (no hay que confundirlo con programa gratuito), lo cual se refiere al software distribuido y desarrollado libremente. Esta condición le confiere beneficios de comunicación multidireccional y discusión que tienen como propósito mejorar la aplicación. El portal de grupos de discusión de los programa FDS - SMV [17] está abierto a la comunidad de usuarios, grupos de investigación, personal especializado de protección contra incendios etc., y crea un puente de intercambio de conocimiento que beneficia el desarrollo del programa.

El funcionamiento del FDS se basa en la resolución numérica de una forma de las ecuaciones de Navier-Stokes denominadas “de bajo número de Mach” apropiadas para baja velocidad y flujos creados por efectos térmicos, con énfasis en el transporte de humo y calor derivados de los incendios. El número de Mach (Ma) define la relación de la velocidad del fluido y la velocidad del sonido en el fluido. Para números de Ma pequeños, $Ma < 0,3$ el flujo es considerado como incompresible. Si $Ma < 1$, el flujo es subsónico y si $Ma > 1$, el flujo es supersónico, a esta velocidad pueden entrar en juego ondas de choque. Si $Ma > 5$, la compresión puede dar lugar a altas temperaturas capaces de cambiar la composición química del fluido a tales flujos se les llama hipersónicos (López 2006:26). Es por ello que se indica de forma muy clara que el

FDS es apropiado para analizar procesos a bajas velocidades. No lo es por tanto para calcular fenómenos que involucran detonaciones o explosiones.

Las ecuaciones generales de la dinámica de fluidos describen gran variedad de fenómenos físicos, muchos de los cuales no tienen relación con los incendios. Por tanto, no tiene sentido mantener esta generalidad que conlleva una enorme complejidad. Por ello las ecuaciones que describen el transporte de masa, momento y energía en fluidos inducidos por incendios deben ser simplificadas para que puedan ser solucionadas eficientemente para escenarios de interés práctico. Las simplificaciones introducidas por Rehm y Baum han sido ampliamente usadas por la comunidad científica y son las conocidas como ecuaciones de combustión para “pequeños números de Mach” y describen el movimiento de gases a baja velocidad que ocurre por la cesión de calor y las fuerzas de flotabilidad (Alvear et al., 2007: 69). La base teórica del modelo FDS se fundamenta en este tipo de simplificaciones.

A continuación se describen las principales ecuaciones que gobiernan el modelo. El estudio detallado de estos principios físicos no forma parte de los propósitos de la presente tesis. Para mayor información se pueden consultar las referencias técnicas disponibles en el programa [McGrattan et al. 2008].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho u = 0 \quad [5.1]$$

$$\frac{\partial \rho Y_i}{\partial t} + u \cdot \nabla \rho Y_i = -\rho Y_i \nabla \cdot u + \nabla \cdot \rho D_i \nabla Y_i + \dot{m}_i''' \quad [5.2]$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u) + \nabla \cdot \rho u u = -\nabla p + \rho f_T + \nabla \cdot \tau_{ij} \quad [5.3]$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \nabla \cdot \rho h u = \frac{D_p}{D_t} + \dot{q}''' - \nabla \cdot q_r + \nabla \cdot k \nabla T + \nabla \cdot \sum_i h_i (\rho D)_i \nabla Y_i \quad [5.4]$$

$$p_0 = R \rho T \sum_i \frac{Y_i}{M_i} \quad [5.5]$$

- 5.1 Conservación de la masa
- 5.2 Conservación de las especies
- 5.3 Conservación del momento (Navier-Stokes)
- 5.4 Conservación de la energía
- 5.5 Ecuación de estado

Las derivadas parciales de las ecuaciones de conservación de la masa, el momento y la energía se aproximan en diferenciales finitos y la solución se da en función del tiempo en una rejilla tridimensional rectilínea compuesta por miles o millones de celdas de control. FDS calcula la temperatura, densidad, presión, velocidad, concentración de especies químicas, etc., para cada celda del dominio computacional en cada discretización de tiempo. También calcula la temperatura en las superficies sólidas presentes, el flujo de calor, velocidad de combustión, velocidad de pérdida de material y otros parámetros. La radiación es calculada en base a técnicas de volúmenes finitos. También se emplean partículas lagrangianas para simular el movimiento de los humos y de las gotas de los rociadores.

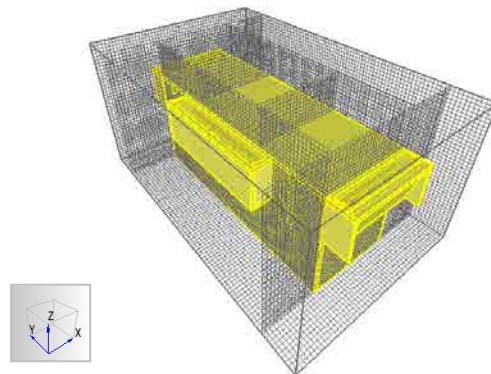


Fig. 5.21 Dominio computacional y escenario de incendio.
 Estudio sobre de la propagación del fuego en centros de transformación eléctrica.
 Fuente: Autora. Laboratorio del fuego EPSEB Universidad Politécnica de Cataluña UPC.

Los cálculos se realizan dentro de un dominio computacional formado por bloques rectangulares que conforman una rejilla rectilínea cartesiana. El tamaño de la rejilla es muy importante: se busca llegar a un compromiso en el cual se utilice un tamaño de rejilla que permita un gasto computacional razonable sin perder calidad en los resultados. La rejilla permite caracterizar la geometría del problema y dentro de ésta es posible definir las “obstrucciones” que son los objetos que conforman el escenario cuya geometría es forzada a coincidir con las celdas de la rejilla. En cada elemento finito las propiedades son consideradas homogéneas. Para las partes “vacías”, es decir que no contiene ningún objeto y por tanto contienen gases, el programa calcula: la temperatura del gas, la velocidad del gas, la concentración de especies químicas, la

concentración de humos, la presión, el *HRR* por volumen unitario y la densidad del gas. Para los elementos sólidos (obstrucciones), cuyas propiedades han sido definidas previamente por el usuario, el programa calcula: la temperatura de los límites y del interior, el flujo de calor (convectivo y radiativo) y la velocidad de combustión. Finalmente, para todo el sistema, el programa revuelve: el *HRR* total, los tiempos de activación de los detectores de calor y humos, los flujos de masa y energía a través de las aberturas y los límites.

Otro aspecto muy importante es el modelo utilizado para tratar las turbulencias que se encuentran en la zona de pirolisis al límite entre la llama y el aire. En el FDS las turbulencias son tratadas por defecto mediante el modelo de *Large Eddy Simulación* (LES). Sin embargo es posible también realizar una *simulación numérica directa* *Direct Numerical Simulation* (DNS). En este caso la rejilla empleada es mucho más fina. El modelo de simulación directa DNS es más completo en cuanto a la exactitud de los resultados que ofrece. El mayor inconveniente que tiene es que el tamaño de las celdas para la solución de los remolinos en todas las escalas debe ser tan pequeño que la actual potencia computacional limita las dimensiones de los escenarios a los que se puede aplicar. En el modelo DSN los flujos turbulentos se estudian a partir de las ecuaciones de cantidad de movimiento no promediadas en el tiempo y sin utilizar modelos de turbulencia. Por este método se calculan todas las escalas de movimiento de un flujo turbulento e incluyen todo, desde el mayor contenido de energía hasta las escalas viscosas para un número de Reynolds mucho mayor que uno. DNS requiere por tanto de un número importante de nodos y por ello demanda de un coste computacional elevado.

Por otro lado, el modelo LES se basa en un filtrado espacial de las ecuaciones de gobierno del fluido, de modo que se resuelven computándose las grandes escalas (el movimiento turbulento de grandes remolinos), mientras que para escalas más pequeñas se asume un modelo que permite considerar de forma aproximada su influencia en el comportamiento del flujo (Alvear et al., 2007: 85). En este método se asume que un vórtice es, cuando mucho, tan pequeño como una celda del volumen de control, pero no más que eso.

Como se ha dicho antes, el modelo predeterminado en el FDS es el LES. La turbulencia es tratada utilizando el modelo de escala de sub-celda (Subgrid-scale, SGS) de Smagorinsky [McGrattan et al. 2008]. Esto se debe a que en la simulación de grandes vórtices las escalas grandes pierden energía debido a la transferencia de esta

a las escalas de sub-celdas. Las grandes escalas (remolinos) son simuladas directamente y las escalas pequeñas (sub-celda) son modeladas con el modelo de turbulencia SGS (López, 2006: 27). Como se dijo antes en el método LES se emplea el submodelo de Smagorinsky. Este emplea filtrado espacial rectangular y modela los pequeños remolinos con expresiones que permiten un cálculo de los coeficientes de viscosidad, de conductividad térmica y de disipación (Alvear et al., 2007: 87). Pese a su utilidad se considera que el modelo de Smagorinsky es muy sencillo y por tanto, que no es muy efectivo para simular flujos muy complejos o con números de Reynolds grandes [Ferziger 2002].

El FDS puede ser utilizado para modelar fenómenos como:

- Transporte de calor y productos de la combustión desarrollados a bajas velocidades.
- Transferencia de calor por radiación y convección entre el gas y las superficies sólidas.
- Procesos de pirolisis sobre las superficies.
- Desarrollo de la llama y crecimiento del incendio.
- Activación de rociadores automáticos, detectores de calor y de humo.

Resultados que se pueden obtener mediante el FDS

FDS es capaz de calcular la temperatura, densidad, presión, velocidad y composición química, entre otros aspectos, en cada celda de control en un intervalo de tiempo. Adicionalmente FDS calcula la temperatura en las superficies sólidas, el flujo de calor, la pérdida de masa etc. El usuario define previamente a la fase de cálculos los parámetros que desea incluir en la simulación. De todos ellos dependerá la cantidad de memoria requerida en los equipos de cómputo y el coste computacional de los modelos. Las cantidades típicas que aporta en la fase gas son: la temperatura del gas, la velocidad, la conservación de las especies gaseosas (agua, CO₂, CO, N₂), la concentración de humo, la presión, la velocidad a la cual se libera el calor por unidad de volumen, la fracción de mezclado (relación aire/ combustible), densidad del gas etc. En las superficies de los sólidos el programa puede predecir cantidades adicionales relacionadas con el balance de energía entre el gas y la fase sólida, lo cual incluye: la temperatura en el interior y en la superficie, el flujo de calor por radiación y convección y la tasa de quemado.

Algunas cantidades son registradas de forma global como son: el flujo de calor por radiación, convección y conducción; los rociadores y tiempos de activación de los

detectores; el flujo de masa y de energía a través de las aberturas como lo pueden ser puertas o ventanas y a través de las superficies sólidas como por ejemplo las paredes de los escenarios.

5.5 El modelado y simulación computacional de incendios como instrumento de evaluación

Los MSCI son un valioso instrumento que permite una aproximación al estudio de la dinámica del fuego en diferentes situaciones de incendio. En la actualidad tiene un papel importante en la investigación de los aspectos científicos y tecnológicos de los incendios. Durante los últimos años su implementación ha contribuido al estudio de nuevos sistemas de extinción, evaluación de soluciones de protección contra el fuego en edificios singulares, investigación de causas en casos de siniestro por incendio etc. También son de gran utilidad en la evaluación de riesgos y la previsión de posibles consecuencias de los incendios.

Según se ha explicado en el capítulo 4, el fuego es un fenómeno complejo, multidisciplinar, que asocia diversos procesos físicos y químicos en su desarrollo y que tiene un comportamiento sensible a distintos factores. El conjunto de procesos que definen una situación de incendio es tan diverso que realizar su modelización sería impracticable con los medios existentes en la actualidad; la descripción matemática de todos los fenómenos fisicoquímicos que involucra resultaría imposible de calcular.

Debido a esta gran complejidad del fenómeno, un modelo de simulación no reproduce de forma exacta una situación real, sino que es una representación simplificada de ésta. Por ello las predicciones que ofrece deben tomarse en un sentido orientativo, más que como un hecho real. No obstante, el valor científico de los resultados obtenidos a través de la modelización es relevante, puesto que se pueden estudiar múltiples escenarios de fuego y estimar distintas variables. También el grado de aproximación a la realidad de los resultados puede ser muy satisfactorio, esto dependerá del un planteamiento adecuado del modelo matemático, en el cual las relaciones físicas que se calculan han de ser las que dominan la situación real.

Por medio de la simulación es posible evaluar posibles rutas que puede tomar el fuego en una situación determinada. También puede ayudar a establecer con cierto nivel de detalle hipótesis razonables de ignición, propagación y efectos del incendio. Mediante la simulación es posible plantearse preguntas del tipo: “Qué pasaría si” relativas a la

contribución al fuego de un determinado elemento, configuración, material, mobiliario, etc.

Los MSCl son el fruto de un esfuerzo conjunto y multidisciplinar que ha tomado muchos años. Responde a un trabajo en el cual la transferencia de conocimientos entre equipos de investigación alrededor del mundo ha sido relevante. El resultado es un gran compendio de modelos matemáticos con la capacidad de ser implementados en un ordenador. A través de estos paquetes computacionales (programas), es posible obtener una respuesta tanto física como visual del comportamiento del fuego en un caso determinado. De ahí la importancia de entender como una disciplina el modelado y la simulación computacional de incendios, puesto que no se trata sólo de la aplicación de la herramienta informática, sino que su implementación ha de ir acompañada de un adecuado conocimiento de la dinámica del fuego.

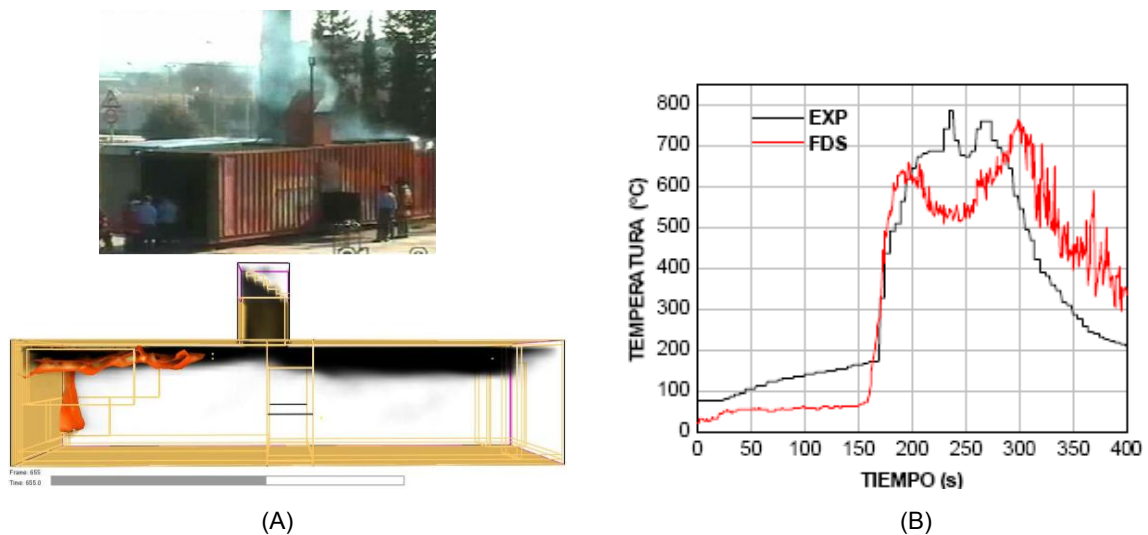


Fig. 5.22 (A) Imágenes un ensayo real y la simulación del mismo (B) Comparativa de temperaturas obtenidas en el ensayo real y la simulación. Se aprecia un alto grado de coincidencia.

Pruebas fuegos en recintos Bomberos de la Generalitat
 Fuente: López, 2006

El programa computacional FDS, empleado para llevar a cabo el presente estudio, cuenta con una amplia aceptación en ámbito de la simulación computacional de incendios. Ha sido utilizado por equipos de investigación de diferentes países del mundo y cuenta con un gran número de publicaciones relacionadas con su implementación. El cálculo computacional permite considerar distintos escenarios, variables y realizar estimaciones sobre las consecuencias de los incendios sin incurrir en costosos experimentos. Dado que el fuego es un fenómeno destructivo, resultaría inviable económicamente realizar pruebas reales para realizar el estudio que se plantea en esta tesis.

La experimentación real no sólo plantea impedimentos económicos por los enormes costes que acarrea quemar objetos a escala real o reducida. Sino que en ocasiones pueden no ser una garantía para obtener resultados concluyentes. Un ejemplo en este sentido son las pruebas de ensayo que se realizan para certificar las soluciones de protección contra el fuego para muros cortina (ver apartado 3.5.1). Los ensayos correspondientes no son realizados bajo las condiciones finales de uso, es decir, en condiciones exteriores, sino bajo condiciones controladas en un laboratorio cubierto. Lo cual, en un fenómeno tan sensible a los factores climatológicos como el fuego, puede resultar relevante.

Como en cualquier práctica de simulación computacional, la premisa para su aplicación consiste en partir de una formulación concreta y asequible de acuerdo a los objetivos que se buscan con la simulación. Algunos autores se preocupan por tener muy presente la diferencia del sistema real y el sistema simulado, siendo éste último el reflejo de aquellas relaciones, funciones y características del sistema real que se consideran relevantes para realizar el sistema simulado. Trasladado a nuestro caso concreto, podemos hablar de incendio real al gran sistema del fenómeno y de incendio simulado al sub conjunto de características del sistema real que interesan para estudiar unos aspectos concretos.

El estudio del fuego a través de la simulación ha ido en aumento durante la última década. En algunos países como EE.UU, Inglaterra, Francia y Australia, por mencionar algunos, ha ido ganando relevancia su utilización. En los últimos años se han dado notables progresos en los modelos que describen el inicio y propagación del fuego en diferentes compartimentos del edificio. Esto sólo ha sido posible a partir del conocimiento pluridisciplinar del fenómeno del fuego y sus diversos procesos asociados.

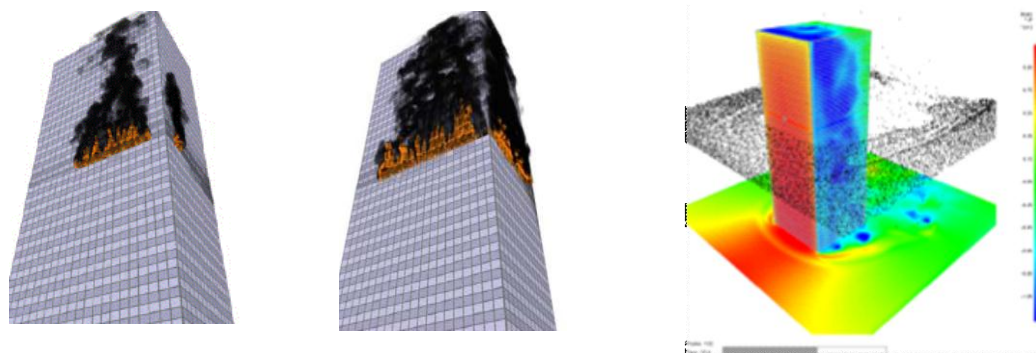


Fig. 5.23 Reproducciones gráficas mediante el programa smokeview.
 Fuente: Simulación computacional aplicada al estudio de los incendios en edificios de gran altura.
 García-Loma-Osorio, 2007

El nivel de incertidumbre de la simulación se deriva de las necesarias simplificaciones que se realizan del fenómeno respecto a la realidad. El grado de aproximación al fenómeno real consiste en una adecuada elección de las variables planteadas y los datos empleados. Dichos datos son fruto de ensayos y modelos validados previamente. Las consideraciones derivadas del análisis permiten acercarse al posible comportamiento del fuego en las situaciones planteadas. Éstas son tomadas de las tendencias observadas y evaluadas cualitativamente. De todos modos las asunciones y parámetros aplicados deben emplearse desde una base de conocimiento de la dinámica del fuego y con una necesaria base de datos obtenidos de la experimentación.

Los modelos de combustión están en una fase muy preliminar, también los procesos relacionados con la radiación están en un grado de desarrollo menor. Mientras que los fenómenos de la fase gaseosa relacionados con la convección aportan una descripción muy aceptable.

Un fenómeno probabilístico, sensible a diferentes factores, también caóticos como las corrientes de viento o como el fuego, incorpora en su propia naturaleza la incertidumbre. No hay dos fuegos que se desarrollen de la misma forma. También los ensayos de laboratorio pueden traer consigo cierto grado de incertidumbre, sin embargo son valiosos para establecer puntos de referencia. Algunos datos de laboratorio sobre la difusión de la llama en un material difícilmente se pueden correlacionar con el comportamiento de ese mismo material en un incendio real. Los materiales probados a pequeña escala, en condiciones de laboratorio, diseminan la

llama lentamente, se comportan por tanto de forma muy distinta que en una situación de incendio.

Si bien las técnicas de modelado y simulación computacional no son métodos de ensayo alternativo a los normalizados, sí son una herramienta valiosa para obtener orientaciones sobre el comportamiento del fuego en determinados casos. La presente investigación se apoya en estas técnicas para evaluar diferentes aspectos relacionados con el diseño de las fachadas en relación a la propagación exterior del fuego.

5.5.1 Fases del proceso de modelización

Según Banks (1998) en el desarrollo de una simulación se pueden distinguir las siguientes etapas:

Formulación del problema: En este paso debe quedar perfectamente establecido el objeto de la simulación. Es importante plantear detalladamente algunos factores como: los resultados que se esperan del simulador, el plan de experimentación, el tiempo disponible, las variables de interés, el tipo de fenómenos a estudiar, el tratamiento estadístico de los resultados, la complejidad de la interfaz del simulador, etc. Se debe establecer si el simulador será operado por el usuario o si el usuario sólo recibirá los resultados.

Definición del sistema: El sistema a simular debe estar perfectamente definido: los parámetros, la frontera del sistema a estudiar y las interacciones con el medioambiente que serán consideradas.

Formulación del modelo: La elección del modelo matemático. Esta formulación comienza con el desarrollo de un modelo simple que captura los aspectos relevantes del sistema real. Los aspectos relevantes del sistema real dependen de la formulación del problema.

Recolección de datos: La naturaleza y cantidad de datos necesarios están determinadas por la formulación del problema y del modelo. Los datos pueden ser provistos por registros históricos, experimentos de laboratorios o mediciones realizadas en el sistema real. Los mismos deberán ser procesados adecuadamente para darles el formato exigido por el modelo. En el caso de este estudio, los datos de entrada en relación a los materiales considerados y sus reacciones proceden de la biblioteca de materiales realizada por el NIST para esta aplicación. Dicha biblioteca está basada en datos experimentales obtenidos por diferentes expertos.

Implementación del modelo computacional: El modelo a simular ha de implementarse como programa computacional mediante algún lenguaje informático. Existen lenguajes específicos de simulación que facilitan esta tarea; también existen programas que ya cuentan con modelos implementados para casos especiales. El programa empleado para el modelado y simulación de las diferentes situaciones planteadas es un programa específico para el estudio del fuego. Sus características fueron expuestas en el punto 5.4.1.

Tabla 5.1 Programas empleados durante la fase experimental del estudio.

Programa	Tarea	Creador
FDS <i>Fire dynamics simulator</i> Programa de uso libre.	Programa computacional que realiza los cálculos necesarios para la simulación del proceso.	NIST
SMV <i>Smokeview</i> Programa de uso libre.	Programa para observar los resultados en forma de animación.	NIST
PyroSim Nota: Thunderhead Engineering cedió una licencia académica temporal para llevar a cabo la presente investigación.	Interfaz gráfica que traduce los datos gráficos a lenguaje programable en FDS. Permite elaborar los diferentes escenarios mediante una interfaz gráfica de manejo simple.	Thunderhead Engineering

Verificación y calibración: En esta etapa se comprueban posibles errores durante la implementación del modelo. El uso del programa en este estudio se realiza a nivel de caja gris. Por tanto se controlan y revisan los datos de entrada (*inputs*) y se analizan, revisan y verifican los de salida. Sin embargo no se realiza ningún ajuste relacionado con las ecuaciones empleadas por el programa para calcular las diferentes situaciones de fuego planteadas.

Validación: En esta etapa se comprueba la exactitud del modelo desarrollado. Esto se lleva a cabo comparando las predicciones del modelo con: mediciones realizadas en el sistema real, datos históricos o datos de sistemas similares. Como resultado de esta etapa puede surgir la necesidad de modificar el modelo o recolectar datos adicionales. La etapa de validación en este estudio se plantea como una futura vía de desarrollo del tema. Realizar las comprobaciones experimentales requeridas resulta inviable económicamente para la autora de la tesis.

Diseño de experimentos: En esta etapa se deciden las características de los experimentos a realizar: el tiempo de arranque, el tiempo de simulación y el número de simulaciones. No se debe incluir aquí la elaboración del conjunto de alternativas a probar para seleccionar la mejor: la elaboración de esta lista y su manejo es tarea de

la optimización y no de la simulación. Debe quedar claro cuando se formula el problema si lo que el cliente desea es un estudio de simulación o de optimización.

Experimentación: En esta etapa se realizan las simulaciones de acuerdo al diseño previo. Los resultados obtenidos son debidamente recolectados y procesados.

Interpretación: Se analiza la sensibilidad del modelo con respecto a los parámetros que tienen asociados la mayor incertidumbre. Si es necesario, se deberán recolectar datos adicionales para refinar la estimación de los parámetros críticos.

Documentación: Incluye la elaboración de la documentación técnica y manuales de uso. La documentación técnica debe contar con una descripción detallada del modelo.

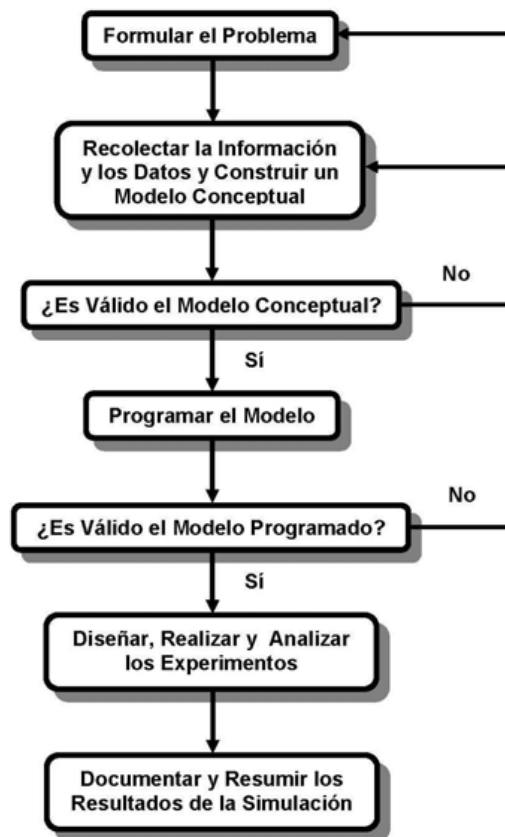


Fig. 5.24 Metodología de siete pasos para el desarrollo de estudios de simulación.
 Fuente: Los modelos de simulación computacional de incendios: ciclo de vida
 Grupo Gidai, Universidad de Cantabria. Capote et al., 2004

En el capítulo siguiente se detallan las características de los escenarios realizados y todo lo referente a la aplicación del modelo FDS en el estudio.

Bibliografía:

[Abott et al. 1991] M. B. Abott, K. Havnø, S. Lingberg, The fourth Generation of numerical modelling in Hydraulics, IAHR Journal of Hydraulic Research. Vol. 29, N° 5, pp.581-600, 1991.

[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 Diaz de Santos, Santander, 2007, ISBN 8479788321, 9788479788322.

[Banks 1998] (coord.) J. Banks, Handbook of Simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice, John Wiley & Sons, 1998.

[Bellinger 1997] G. Bellinger, Modeling & Simulation. Outsights Corp., 1997.

[Capote et al. 2006] J. A. Capote, D. Alvear, O. Abreu, M. Lázaro, P. Espina, Algunos Conceptos y Definiciones del Modelado y Simulación Computacional de Incendios, Grupo GIDAI, Universidad de Cantabria, Santander, Marzo 2006.

[Casti 1998] J. L. Casti, El Quinteto de Cambridge, Editorial Taurus, Madrid, 1998, ISBN 8430602852.

[Cunningham et al. 2000] C. H. Cunningham, Lecture Notes of CSci405: Computer Simulation, Department of Computer and Information Science, University of Mississippi, 2000.

[DiNenno 1991] P. J. DiNenno, Manual de protección contra incendios. El futuro de los modelos de fuego. Sección 10 Capítulo 14, NFPA, 1991.

[Ferziger 2002] J. Ferziger, Computational Methods for Fluid Dynamics, Milovan Peric, Springer 2002.

[Friedman 1991] R. Friedman, Survey of Computer Models for Fire and Smoke, Factory Mutual Research Corporation, Norwood, MA, 1991.

[Giambiasi 1996] N. Giambiasi, Introduction à la modélisation et à la simulation, Materiales del curso de D.E.A.; Université d'Aix-Marseille III. 1996.

[Goodchild et al. 1993] M. F. Goodchild, B. O. Parks, L. T. Steyaert, Environmental modeling with GIS, Oxford University Press, 1993.

[Joly 1988] F. Joly, La cartografía. Oikos-Tau. Barcelona. 1988, ISBN 8428106339.

[Law – Kelton 1991] A. M. Law, W. D. Kelton, Simulation modeling and Analysis, McGraw-Hill, New York, 1991.

[López 2006] S. López Moreno, Estudio teórico y experimental del comportamiento del fuego en sistemas cerrados, tesis de maestría, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, México, 2006.

[Maune 2007] D.F. Maune, Digital Elevation Model Technologies and Applications: the DEM Users Manual, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2007.

[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.

[NFPA 1991] Manual de protección contra incendios. Introducción a los modelos de fuego. Sección 10 Capítulo 8, C. Beyler, NFPA, 1991, ISBN 8471006456.

[Olenick – Carpenter 2003] S. M. Olenick, D. J. Carpenter, An Updated International Survey of Computer Models for Fire and Smoke, Journal of Fire Protection Engineering, vol. 13 no. 2, pp.87-110, May 2003.

[Salas 1993] J. D. Salas, Analysis and Modeling of Hydrologic Time Series. En David R. Maidment (comp.), Handbook of hydrology, cap. 19, McGraw-Hill, 1993.

[Reynoso 2006] C. Reynoso, Complejidad y el caos: Una exploración antropológica, Editorial SB, 2006, ISBN 9871256043.

[Wagensberg 1985] J. Wagensberg, Ideas sobre la complejidad del mundo, Tusquets Editores, 1985, ISBN 978-84-7223-453-6.

[Watts 2002] J. M. Watts Jr., Probabilistic fire models. Section 11, Chapter 6: Fire protection handbook. NFPA, 2002.

Citas electrónicas:

[Ibáñez 2008] J.J. Ibáñez, Pensamiento Cualitativo y Pensamiento Cuantitativo en la Práctica Científica, 2008.

<http://www.madrimasd.org/blogs/universo/2008/09/05/100251>. Consulta: 20/08/2009.

[Ibáñez 2006] J.J. Ibáñez, El Uso de las Nuevas Tecnologías y la Paradoja tecnológica, 2006 de Burrough.

<http://www.madrimasd.org/blogs/universo/2006/02/15/13724>. Consulta: 20/08/2009.

[Ibáñez 2008] J.J. Ibáñez, Concepto y tipos de Modelos Científicos, 2008.

<http://www.madrimasd.org/blogs/universo/2008/05/10/91441>. Consulta: 21/08/2009.

[López et al. 2001] A. López, G. López, F. Javier Martínez, R. Pérez, El modelo de la red de distribución como herramienta de gestión y toma de decisiones: la importancia de la calibración del mismo, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Universidad Politécnica de Valencia, 2001,

http://area.us.es/ciberico/archivos_word/142b.doc. Consulta: 04/02/2010.

[Maiztegui et al. 2002]. A. Maiztegui y otros, Papel de la tecnología en la educación científica: una dimensión olvidada. Revista latinoamericana. Núm. 28 Enseñanza de la tecnología. Enero-Abril, 2002.

<http://www.rieoei.org/rie28a05.htm>. Consulta: 10/02/2010.

[Wainer 1996] G. A. Wainer, Introducción a la Simulación de Eventos Discretos, Report n: 96-005. Departamento de Computación – FCEN, Universidad de Buenos Aires, 996.

http://www.ucema.edu.ar/u/rst/Simulacion_de_Sistemas/Teoria/Introduccion_a_la_Simulacion_de_Eventos_Discretos.pdf. Consulta: 10/08/2009.

Notas:

¹ Aunque la construcción de modelos arranca desde el renacimiento, el uso moderno de la palabra simulación data de 1940, cuando los científicos Von Neuman Y Ulam que trabajaban en el proyecto Monte Carlo, durante la segunda Guerra Mundial, resolvieron problemas de reacciones nucleares cuya solución experimental sería muy cara y el análisis matemático demasiado complicado. Una de las primeras aplicaciones de simulación con computadoras fue en el proyecto Manhattan, donde se estudió la difusión aleatoria de neutrones para el desarrollo de la bomba atómica, usando métodos de Montecarlo.

En el campo de la investigación, las técnicas de simulación son ampliamente conocidas y aplicadas. En los años 40, los físicos atómicos introducen este método para calcular el blindaje de plomo que debía utilizarse para frenar los neutrones producidos por la fisión nuclear: se recurre a la utilización de números aleatorios, generando miles de eventos que son evaluados en forma estadística. Surge así el conocido Método Monte Carlo.

² Básicamente la teoría de las catástrofes representa la propensión de los sistemas estructuralmente estables a manifestar discontinuidad (pueden producirse cambios repentinos del comportamiento o de los resultados), divergencia (tendencia de las pequeñas divergencias a crear grandes divergencias) e histéresis (el estado depende de su historia previa, pero si los comportamientos se invierten, conducen entonces a que no se vuelva a la situación inicial). Sus aplicaciones son en principio la de simulaciones de objetos naturales, de tal forma que se utiliza en geología, en mecánica, en hidrodinámica, en óptica geométrica, en fisiología, en biología, en lingüística, en dirección estratégica y en sociología. Erik Christopher Zeeman ha generado gran controversia al considerar su aplicación en las ciencias humanas. La teoría de las catástrofes comparte ámbito con la teoría del caos y con la teoría de los sistemas disipativos desarrollada por Ilya Prigogine. <http://es.wikipedia.org>

³ Un Sistema de Información Geográfica SIG o GIS, por su acrónimo inglés *Geographic Information System*, es una integración organizada de hardware, software y datos geográficos diseñado para capturar, almacenar, manipular, analizar y desplegar en todas sus formas la información geográficamente referenciada con el fin de resolver problemas complejos de planificación y gestión. También puede definirse como un modelo de una parte de la realidad referido a un sistema de coordenadas terrestre y construido para satisfacer unas necesidades concretas de información. En el sentido más estricto, es cualquier sistema de información capaz de integrar, almacenar, editar, analizar, compartir y mostrar la información geográficamente referenciada. En un sentido más genérico, los SIG son herramientas que permiten a los usuarios crear consultas interactivas, analizar la información espacial, editar datos, mapas y presentar los resultados de todas estas operaciones.

⁴ Un sistema dinámico es un sistema complejo que presenta un cambio o evolución de su estado en el tiempo, el comportamiento en dicho estado se puede caracterizar determinando los límites del sistema, los elementos y sus relaciones; de esta forma se pueden elaborar modelos que buscan representar la estructura del mismo sistema.

⁵ En la interacción humano-computadora, la entrada de la información producida por el usuario es una parte básica del proceso. El usuario define y comunica las variables y datos de entrada que serán procesados mediante los programas informáticos.

⁶ El término *cluster* (a veces españolizado como clúster) se aplica a los conjuntos o conglomerados de computadoras construidos mediante la utilización de componentes de hardware comunes y que se comportan como si fuesen una única computadora.

⁷ El desarrollo científico tecnológico también ha sido definido como un conjunto de teorías y de técnicas que permiten el aprovechamiento práctico del conocimiento científico.

⁸ En 1983 la UNESCO dio la siguiente definición de tecnología: «Tecnología es el saber hacer y el proceso creativo que puede utilizar herramientas, recursos y sistemas para resolver problemas, para aumentar el control sobre el medio natural y el creado por los seres humanos, con objeto de mejorar la condición humana» (citado por Gilbert, 1992). Resulta difícil ver en dicha definición algo que excluya la actividad científica. Más recientemente, en la Conferencia Mundial sobre la Ciencia para el siglo XXI, auspiciada por la UNESCO y el Consejo Internacional para la Ciencia, se declaraba: «Para que un país esté en condiciones de atender a las necesidades fundamentales de su población, la enseñanza de las ciencias y de la tecnología es un imperativo estratégico. Como parte de esa educación científica y tecnológica, los estudiantes deberían aprender a resolver problemas concretos y a atender a las necesidades de la sociedad, utilizando sus competencias y conocimientos científicos y tecnológicos». Y se añade: «Hoy más que nunca es necesario fomentar y difundir la alfabetización científica en todas las culturas y en todos los sectores de la sociedad [...] a fin de mejorar la participación de los ciudadanos en la adopción de decisiones relativas a las aplicaciones de los nuevos conocimientos» (Declaración de Budapest, 1999).

⁹ Frase expresada por el autor en el contexto de: Valdés, R., y Valdés, P. (1994): «Utilización de los ordenadores en la enseñanza de las Ciencias», en: Enseñanza de las Ciencias, 12(3), pp. 412-415.

¹⁰ Frase expresada por el autor en el contexto de: Bybee, R. (1997): «*Towards an understanding of scientific literacy*», en W. Gräber, y C. Bolte (eds.): *Scientific Literacy*. Kiel, IPN.

¹¹ Edafología. Ciencia que trata de la naturaleza y condiciones del suelo, en su relación con las plantas.

¹² Métodos numéricos. El análisis numérico o cálculo numérico es la rama de las matemáticas que se encarga de diseñar algoritmos para, a través de números y reglas matemáticas simples, simular procesos matemáticos más complejos aplicados a procesos del mundo real. <http://es.wikipedia.org>

¹³ Un ordenador analógico es un tipo de computadora que utiliza dispositivos electrónicos o mecánicos para modelar el problema a resolver utilizando un tipo de cantidad física para representar otra.

¹⁴ El método de Montecarlo es un método no determinístico o estadístico numérico, usado para aproximar expresiones matemáticas complejas y costosas de evaluar con exactitud. El método se llamó así en referencia al Casino de Montecarlo (Principado de Mónaco) por ser "la capital del juego de azar", al ser la ruleta un generador simple de números aleatorios. El nombre y el desarrollo sistemático de los métodos de Montecarlo datan aproximadamente de 1944 y se mejoraron enormemente con el desarrollo de la computadora. <http://es.wikipedia.org>

¹⁵ NIST (*National Institute of Standards and Technology*) Fundado en 1901, NIST es una agencia federal no reguladora dentro del Departamento de Comercio estadounidense. La misión del NIST es promover la innovación estadounidense y el espíritu competitivo industrial a fin de mejorar la seguridad económica y la calidad de la vida. <http://www.nist.gov>

¹⁶ Free software no se refiere a un programa gratuito sino a un programa de uso libre. Código abierto es el término con el que se conoce al software distribuido y desarrollado libremente. El código abierto tiene un punto de vista más orientado a los beneficios prácticos de compartir el código que a las cuestiones morales y/o filosóficas las cuales destacan en el llamado software libre.

¹⁷ Portal de grupos de discusión del FDS-SMV. <http://groups.google.com/group/fds-smv/>.

