

# WP1 : Acciones Térmicas y Mecánicas

L.G. Cajot, M. Haller & M. Pierre

*PROFILARBED S.A, Esch/Alzette, Gran Ducado de Luxemburgo*

SUMARIO: El objetivo técnico general de esta propuesta es difundir eficazmente **Conocimientos sobre Ingeniería de Seguridad Estructural ante Incendio**, provenientes de numerosos proyectos financiados por la CECA durante los últimos 25 años, para su uso práctico. La finalidad es que esta difusión sea lo más amplia posible, en diversos países y en los diferentes idiomas nacionales. De la primera parte de este trabajo se ocupa el Paquete de Trabajo 1, que describe las herramientas actuales para la determinación de las **Acciones Térmicas**, que han sido implantadas en los actuales Eurocódigos.

## 1 INTRODUCCIÓN

En los años sesenta, ocurrieron diversos incendios dramáticos, como por ejemplo, el incendio en el supermercado ‘Innovation’ de Bruselas, que causó más de 300 muertes, y el incendio en la discoteca ‘Le cinq Sept’ en Saint-Laurent-du-Pont (Francia). Estos incendios dieron lugar a la elaboración de múltiples normativas nuevas en toda Europa.

Las normativas actuales abarcan una diversidad de temas, entre los cuales se incluyen:

- Medios de escape.
- Propagación del fuego, que incluye: “Resistencia al fuego” y “Reacción ante el fuego”.
- La resistencia al fuego de la estructura según los periodos de resistencia, R30, 60, 90 o 120.
- Los sistemas de ventilación y control de humos y calor.
- Medidas activas contra incendios, como pueden ser los extintores de mano, los detectores de humo o los rociadores automáticos.
- Accesos para Bomberos.

Aun cuando el contexto general y las nociones generales de seguridad contra el fuego son las mismas en cualquier parte de Europa, las exigencias reglamentarias no son uniformes. Esto se analizó en el marco del proyecto NFSC1 [11] y ha sido actualizado gracias a los datos recopilados durante el reciente proyecto CECA “Exigencias ante Incendio Basadas en el Riesgo” [18]. Por ejemplo, para un edificio de una planta, la resistencia al fuego requerida llega a ser hasta de R120 en España, mientras que en Suiza no se requiere ninguna resistencia al fuego [18]. Para un edificio de oficinas de altura media, se necesita una Resistencia al fuego de R60 en Holanda, en comparación con la R120 requerida en Francia [11]. Los parámetros principales que definen los requerimientos son la altura del edificio y la ocupación del mismo, relacionada esta última con el número de ocupantes y el tipo de actividad. Los requerimientos de la resistencia al fuego deben basarse en los parámetros que influyen en el crecimiento y desarrollo del fuego. Estos incluyen:

- Fuego [probabilidad de aparición de Fuego, propagación del Fuego, duración del Fuego, carga de Fuego, gravedad del Fuego...]
- Condiciones de ventilación
- Recinto de fuego (tipo, dimensiones, geometría)
- Tipo de elemento estructural
- Condiciones de evacuación
- Seguridad de los equipos de rescate

- Riesgo para los edificios colindantes
- Medidas activas contra incendios

Las normativas actuales no tienen en cuenta adecuadamente la influencia de los rociadores en la supresión o extinción del fuego. Los datos recogidos en [11, 18] muestran que, exceptuando muy pocos casos, los requerimientos actuales son idénticos, independientemente de la existencia de rociadores. Con el fin de considerar todos estos factores físicos de un modo sistemático, mediante diferentes proyectos de investigación CECA y en base al “Concepto de Seguridad frente a Fuego Natural” [11, 12, 13, 18], se ha desarrollado un método más realista y verosímil para analizar la seguridad estructural en caso de fuego, incluyendo las medidas activas contra el fuego y las características de fuego reales. Esta metodología se ha desarrollado en base a métodos y análisis estadísticos, probabilistas y deterministas, y es aplicable a todo tipo de materiales estructurales y edificios.

La figura 1.1 muestra una comparación entre las curvas de fuego “natural” para distintas configuraciones (dimensiones del recinto, cargas de fuego, muros de compartimentación, características del combustible,...) y la curva de Fuego-ISO estándar.

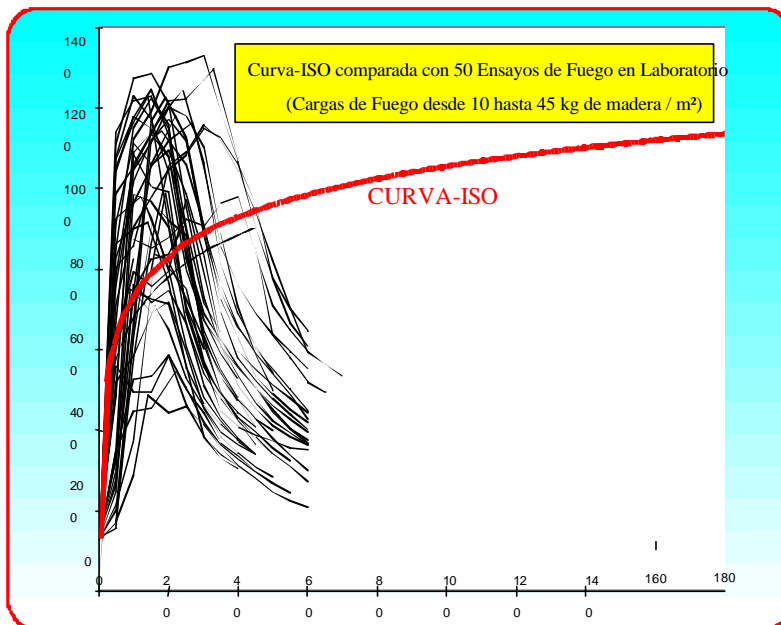


Figura 1.1. Curvas de temperatura-tiempo de fuegos naturales y del Fuego ISO

Esto muestra las dificultades para entender el comportamiento de los elementos en el caso de fuegos reales utilizando datos obtenidos de acuerdo con la curva única de Fuego-ISO. Un fuego real posee características que no son tenidas en consideración en la curva de Fuego-ISO estándar. En la Figura 1.2 se muestran las características de un fuego real, que incluyen:

- Una fase latente: ignición y fuego latente a temperatura muy baja, con una duración que es a menudo difícil de calcular. Esta fase no se muestra en la Figura 1.2.
- Una fase de crecimiento llamada pre flash-over (fuego localizado): la duración de esta fase depende principalmente de las características del recinto. El fuego permanece localizado hasta un posible flash-over.
- Un flash-over: el flash-over es un fuego generalizado. Esta fase es por lo general muy corta.
- Un fuego post flash-over: esta fase se corresponde con un fuego generalizado cuya duración depende de la carga de fuego y la ventilación.

- Una fase de decrecimiento: el fuego comienza a decrecer hasta que todos los materiales combustibles han ardido completamente.

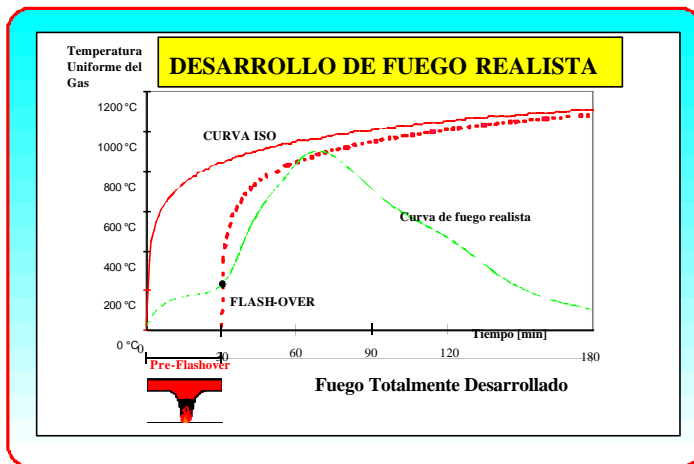


Figura 1.2. Fases del fuego natural

## 2 METODOLOGÍA

### 2.1 Introducción

Para determinar el desarrollo del fuego en un recinto de fuego es necesario conocer un gran número de parámetros. Algunos de estos parámetros vienen determinados por las características del edificio. Sin embargo, la característica principal, la “carga de fuego”, es normalmente una función de la actividad y puede no ser constante durante toda la vida del edificio. La carga de fuego puede definirse por una distribución estadística. Para el diseño estructural a temperatura ambiente, las cargas mecánicas como pueden ser el propio peso, la carga impuesta y el viento se definen también por una distribución estadística.

Del mismo modo, se ha determinado la seguridad contra el fuego en un edificio mediante un método probabilista. En el concepto global de seguridad contra el fuego natural, el objetivo se define mediante un valor de fallo objetivo. El objetivo no es cambiar el nivel de seguridad existente en la realidad mediante códigos preceptivos, sino cuantificar dicho nivel mediante la probabilidad realista de fallo correspondiente o índice de seguridad. La combinación de medidas activas y pasivas puede utilizarse para alcanzar un nivel de seguridad aceptable.

El método general de cuantificación de la seguridad se basa en el método empleado para el diseño estructural a temperatura ambiente y define la carga de fuego de cálculo teniendo en cuenta la probabilidad de ocurrencia del fuego y la influencia de las medidas activas contra el fuego.

La carga de fuego de cálculo se usa entonces en los modelos de cálculo de fuego para evaluar el comportamiento estructural ante el fuego. Aquí se describen los modelos para determinar la temperatura en el interior del recinto.

### 2.2 Objetivos

El objetivo es alcanzar un nivel de seguridad aceptable. Este nivel de seguridad aceptable puede definirse en comparación con los otros riesgos existentes en la vida, incluyendo la ruina estructural del edificio en condiciones normales. El objetivo de probabilidad de alcanzar la ruina estructural en condiciones normales es de  $7,23 \cdot 10^{-5}$  por vida de edificio [10]. El objetivo es:  $P_f$  (probabilidad de fallo)  $\leq P_t$  (objetivo de probabilidad)

Como se define en los Eurocódigos, el fuego es una acción accidental. Se ha llevado a cabo un extenso estudio estadístico para determinar la probabilidad de que se de una ocurrencia de fuego. La ignición es una función de la actividad del edificio. Se ha encontrado una buena correlación entre estadísticas procedentes de distintos países europeos [11]. Cuando el fuego ha comenzado, la ruina puede ocurrir solamente si el fuego alcanza unas condiciones muy graves. Es necesario definir la probabilidad de que el fuego crezca hasta convertirse en un fuego a gran escala. En esta fase, las medidas activas, los ocupantes

y los bomberos tienen todos ellos un papel relevante. Esto significa que, en un gran número de casos, este fuego será detenido muy rápidamente, y no llegará a crecer. Según las estadísticas, las acciones de las medidas activas y la intervención de los bomberos, consideradas en el edificio, han sido evaluadas para determinar la probabilidad de un fuego a gran escala. Así que, según las medidas activas (rociadores, detectores,...) y pasivas (división en recintos) utilizadas en el edificio, la actividad desarrollada en el edificio y la intervención de los bomberos, se calcula una carga de fuego de cálculo a partir del objetivo de probabilidad. Este procedimiento aparece desarrollado y detallado en el capítulo 5.

### 2.3 Método de cálculo del desarrollo del fuego

Existen distintos niveles de métodos de cálculo del desarrollo del fuego:

- Modelos simplificados: principalmente fuegos paramétricos
- Modelos de zona: estos modelos tienen en cuenta todos los parámetros principales que controlan el fuego
- Modelos de campo: demasiado complicados para ser utilizados como herramienta de diseño general. Sin embargo, los modelos de campo son la única herramienta válida para geometrías sofisticadas [19].

Las adopciones del modelo de una zona están relacionadas con un fuego generalizado con temperatura uniforme en el recinto, mientras que los modelos de dos zonas se relacionan con una capa de humo estratificada de un fuego localizado.

El parámetro principal del desarrollo del fuego es la velocidad de generación de calor (RHR). Esta velocidad de generación de calor va en función de las dimensiones y tipo de actividad del recinto, así como del tiempo. El fuego es inicialmente un fuego localizado en la fase de pre flash-over. El comienzo de esta fase se caracteriza por un crecimiento del fuego que ha sido cuantificado según la hipótesis del fuego- $t^2$ . Esto significa que la velocidad de generación de calor se define mediante una ecuación parabólica. Los edificios se clasifican en 4 categorías según la velocidad de propagación del fuego: lenta, intermedia, rápida y ultra-rápida. La velocidad de generación de calor alcanzará un valor máximo, correspondiente a un estado permanente definido por condiciones controladas por el combustible o por la ventilación.

Una de las evaluaciones consiste en conocer la evolución del RHR y determinar si el fuego crecerá hasta alcanzar el flash-over o se mantendrá como un fuego localizado. Cuando no se alcanzan las condiciones de flash-over o fuego generalizado, el fuego se mantiene localizado. En dicho estado, se utiliza un modelo de dos zonas para evaluar el efecto general de la capa de humo. El efecto local en las proximidades del fuego también se estudia mediante modelos empíricos desarrollados en un estudio anterior, 'fuego natural en recintos grandes' [8]. Hasemi [17] realizó investigaciones experimentales para determinar las acciones térmicas localizadas de un fuego, a partir de las cuales se desarrolló un método simplificado. La combinación de ambos modelos permite determinar el campo de temperatura, tanto en las proximidades del fuego, como a distancia del mismo.

### 2.4 Comportamiento estructural ante incendio

Según esta acción térmica, debe calcularse la transferencia térmica a los elementos estructurales. Pueden emplearse los modelos de diferentes niveles. A partir del campo de temperatura en la estructura y de la combinación de las cargas mecánicas en caso de fuego, puede determinarse el comportamiento estructural con modelos que pueden también corresponder a distintos niveles.

Pueden aplicarse modelos simplificados que utilizan cálculos elemento/elemento. En general, este modelo se basa en la noción de la temperatura crítica. Si la temperatura de calentamiento está por debajo de la temperatura crítica, no se produce el fallo, pero si la temperatura de calentamiento es superior a la temperatura crítica, entonces se produce el fallo. Es un criterio de 'pasa no pasa'. El objetivo se alcanza, por tanto, si el tiempo hasta llegar al fallo es superior a la exposición al fuego natural exigida.

Pueden usarse modelos más sofisticados, por ejemplo, los cálculos de elementos finitos. Los resultados del modelo se obtienen generalmente en cuanto a la deformación durante toda la duración del fuego. En algunos casos, el criterio de rendimiento (medir en que nivel se cumplen los objetivos) puede darse respecto a la deformación.

Conocer el comportamiento estructural ante fuego permite realizar una evaluación en base a una serie de criterios de prestaciones en cuanto a la deformación límite o daño estructural.

La elección del criterio de prestación para la realización del cálculo dependerá de las consecuencias del fallo y de la función del edificio. Para determinados edificios de varias plantas y alto valor, esto puede significar que no debe ocurrir ningún fallo estructural durante toda la duración del fuego. Las características de estos modelos se desarrollan en el Paquete de Trabajo 3.

## 2.5 Datos necesarios

Para aplicar esta metodología, deben conocerse las características del edificio. Esta metodología se aplica recinto a recinto. Debe definirse el recinto no sólo en cuanto a su geometría, sino también en cuanto a las características térmicas de las paredes que pueden acumular y transferir gran parte de la energía generada por el fuego, y las aberturas que permiten el intercambio de aire con el exterior del recinto. En el capítulo 3 se proporcionan algunas normas y tablas para determinar todos estos datos.

## 3 CARACTERÍSTICAS DEL RECINTO DE FUEGO

### 3.1 Introducción

En el método de la “Seguridad ante Fuego Natural”, el diseño de seguridad contra el fuego se basa en acciones térmicas determinadas físicamente. En contraste con el diseño convencional, los parámetros como la cantidad de carga de fuego, la velocidad de generación de calor y la cantidad de ventilación juegan un papel importante en el diseño del fuego natural. En la mayoría de los edificios, el número de escenarios de fuego posibles es infinito y es necesario reducirlo. Solamente se estudiarán los “peores casos creíbles de escenarios de incendio”. Si se eligen los escenarios de incendio de cálculo, existen diversos modelos de fuego disponibles para el cálculo de las acciones térmicas.

### 3.2 Elementos de cierre del recinto

En el Concepto de Seguridad ante Fuego Natural, el desarrollo del fuego se describe en el recinto de incendio. La hipótesis es que el fuego no se propagará a otros recintos. Que esto sea cierto dependerá del comportamiento ante el fuego de las construcciones de cierre (suelos, pared [incluidas puertas], etc.).

Es necesario comprender dicho comportamiento para poder evaluar su capacidad para actuar como barreras contra el fuego. Están disponibles las siguientes opciones:

- Ensayos ad-hoc: el elemento puede ser expuesto a una curva de temperatura-tiempo en un horno, como se calcula con los modelos de fuego basados en escenarios de fuego fatalistas.
- Valoración profesional: este método utiliza los datos de ensayo disponibles de los ensayos de resistencia-ISO en elementos de cierre.
- Empleo directo de los requerimientos-ISO: las normativas nacionales definen los recintos de fuego con resistencia al fuego-ISO para paredes, techos, puertas y suelos, dependiendo del uso y de la geometría del edificio.

Las primeras dos opciones pueden emplearse para un número limitado de elementos de cierre y conllevan un alto coste. En la práctica, debe utilizarse a menudo la tercera opción.

### 3.3 Pared: características térmicas

La pérdida de calor en el recinto es un factor importante para determinar la temperatura. Las pérdidas de calor por los cierres del recinto ocurren por convección y por radiación. Es necesario conocer las propiedades térmicas de las paredes.

Los tres parámetros principales que caracterizan las propiedades térmicas de un material son:

- capacidad calorífica  $c_p$
- densidad  $\rho$
- conductividad  $\lambda$

La conductividad y la capacidad calorífica dependen de la temperatura.

En los modelos simplificados, solamente se emplea la inercia térmica, denominada factor  $b$ . Dicho factor  $b$  se determina mediante la siguiente ecuación (3.1) a partir de las propiedades térmicas:

$$b = \sqrt{I \cdot r \cdot c_p} \quad (3.1)$$

- Para el cálculo del factor b, la densidad  $\rho$ , la capacidad de calor específico  $c_p$  y la conductividad térmica  $\lambda$  de los cierres pueden medirse a temperatura ambiente [1].

En el caso de paredes de diversos materiales, se sugiere deducir el factor-b mediante el siguiente método:

- Cuando un material (2) esta aislado por un material pesado (1), de tal manera que  $b_1 < b_2$ , el factor b es el factor b del material 1 :  $b = b_1$ .
- Por el contrario, si  $b_1 > b_2$ , podemos definir un espesor límite para el material 1 equivalente a (3.2):

$$S_{1,lim} = \sqrt{\frac{t_d I_1}{c_1 r_1}} \quad \text{donde } t_d \text{ es el tiempo de fuego hasta la fase de decrecimiento.} \quad (3.2)$$

Después el factor b se determina:

Si  $s_1 > s_{1,lim}$  entonces  $b = b_1$

$$\text{Si } s_1 < s_{1,lim} \text{ entonces } b = \frac{s_1}{s_{1,lim}} b_1 + \left(1 - \frac{s_1}{s_{1,lim}}\right) b_2$$

La tabla 3.1 muestra las características térmicas de los materiales más comúnmente utilizados para distintas temperaturas.

Tabla 3.1. Características térmicas de los materiales

Material	Temperatura	l (W/m/K)	r (kg/m <sup>3</sup> )	c <sub>p</sub> (J/kg°K)
<b>Hormigón de peso normal</b>	20	2	2300	900
	200	1,63	2300	1022
	500	1,21	2300	1164
	1000	0,83	2300	1289
<b>Hormigón ligero</b>	20	1	1500	840
	200	0,875	1500	840
	500	0,6875	1500	840
	1000	0,5	1500	840
<b>Acero</b>	20	54	7850	425
	200	47	7850	530
	500	37	7850	667
	1000	27	7850	650
<b>Material aislante de yeso</b>	20	0,035	128	800
	200	0,06	128	900
	500	0,12	128	1050
	1000	0,27	128	1100
<b>Cemento de cierre</b>	20	0,0483	200	751
	250	0,0681	200	954
	500	0,1128	200	1052
	800	0,2016	200	1059
<b>Plancha de CaSi</b>	20	0,0685	450	748
	250	0,0786	450	956
	450	0,0951	450	1060
	1050	0,157	450	1440
<b>Madera</b>	20	0,1	450	1113
	250	0,1	450	1125
	450	0,1	450	1135
	1050	0,1	450	1164
<b>Ladrillo</b>	20	1,04	2000	1113
	200	1,04	2000	1125
	500	1,18	2000	1135
	1000	1,41	2000	1164
<b>Vidrio</b>	20	0,78	2700	840

### 3.4 Características de las aberturas

Las aberturas de un recinto pueden ser ventanas, puertas y respiraderos. La gravedad de un fuego en un recinto dependerá de la cantidad de aberturas existentes en dicho recinto.

Respecto al factor de abertura  $O$  utilizado en los modelos simplificados, éste se define según la ecuación (3.3) para una única abertura vertical:

$$O = A_w \sqrt{H} \quad (3.3)$$

Cuando deben considerarse diversas aberturas verticales, hay que utilizar el área global y una altura equivalente. Estas se determinan mediante las ecuaciones (3.4) y (3.5):

$$A_w = \sum A_{wi} \quad (3.4)$$

$$H = \left[ \frac{\sum A_{wi} \sqrt{H_i}}{\sum A_{wi}} \right]^2 \quad (3.5)$$

donde  $A_w$  es el área de la abertura,  $H$  la altura de la abertura e  $i$  hace referencia al n°<sub>*i*</sub> de aberturas.

### 3.5 Ventilación mecánica

El empleo de la presurización es un modo de protección interesante para escaleras.

La **ventilación mecánica** también se utiliza con frecuencia en sistemas de ventilación y control de calor y humos (SHEVS: **s**moke and **h**eat **e**xhaust **v**entilation system).

## 4 CARACTERÍSTICAS DEL FUEGO

El objetivo de este capítulo es proporcionar toda la información que necesita un diseñador cuando se enfrenta a un problema de fuego. El primer dato que se necesita para diseñar un edificio contra el fuego es definir la energía que va a afectar a la estructura. Una forma de obtener este dato sería realizar un ensayo de fuego real en el edificio. Esto no resultaría barato y además sólo proporcionaría información para uno de los múltiples incendios que podrían darse en el edificio. Se ha combinado la información de los ensayos de fuego, de los modelos existentes y de la dinámica de incendio para poder así obtener una caracterización del fuego para distintos casos.

### 4.1 Carga de fuego

El primer problema consiste en saber cuál es la carga de fuego que debe considerarse en el diseño. Resulta poco frecuente que la carga de fuego se conozca mediante un método determinista. Por lo general, ésta debe ser definida mediante un método estadístico.

#### 4.1.1 Método determinista

La carga de fuego  $Q$  en un recinto de fuego se define como la energía total capaz de ser generada en caso de fuego. Parte de esa energía total se utilizará para calentar el recinto (paredes y gas del interior), el resto de dicha energía se liberará a través de aberturas. Los componentes del edificio, tales como los revestimientos de paredes y techos, y los contenidos del edificio, como por ejemplo los muebles, constituyen la carga de fuego. Dividida por el área del suelo, la carga de fuego  $Q$  proporciona la densidad de carga de fuego  $q_f$ .

En la EC 1, la densidad de carga de fuego característica viene dada por la ecuación (4.1):

$$q_f = \frac{I}{A_f} \sum_i (\Psi_i \cdot m_i \cdot H_{ui} \cdot M_i) \quad (4.1)$$

donde:

$M_i$  = la masa del material  $i$  (kg)

$H_{ui}$  = el valor calorífico neto del material  $i$  (MJ/kg) (véase Tabla 4.1)

$m_i$  = el factor que describe el comportamiento ante la combustión del material  $i$

$\Psi_i$  = el factor de estimación de la carga de fuego protegida del material  $i$

$A_f$  = la superficie del suelo del recinto de incendio [m<sup>2</sup>]

$H_{ui} \cdot M_i$  representa la cantidad total de energía contenida en el material  $i$  y liberada en el caso de una combustión completa. El factor 'm' es un factor no dimensional entre 0 y 1, que representa la eficiencia de

la combustión:  $m = 1$  corresponde a una combustión completa y  $m = 0$  al caso de materiales que no contribuyen al fuego en absoluto.  
Se recomienda un valor de  $m = 0,8$  para materiales estándar. Para la madera, se recomienda un valor de  $17,5 \text{ MJ/kg}$  para  $H_u$  siendo  $14 \text{ MJ/kg}$  para  $(mH_u)$ .

Tabla 4.1. Valor calorífico neto de los materiales combustibles  $H_u$  (MJ/kg) recomendado para el cálculo de la carga de fuego.

<b>Sólidos</b>	
Madera	17,5
Otros materiales celulósicos <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ropa</li> <li>• Corcho</li> <li>• Algodón</li> <li>• Papel, cartón</li> <li>• Seda</li> <li>• Paja</li> <li>• Lana</li> </ul>	20
Carbón <ul style="list-style-type: none"> <li>• Antracita</li> <li>• Carbón vegetal</li> <li>• Hulla</li> </ul>	30
<b>Productos químicos</b>	
Parafinas <ul style="list-style-type: none"> <li>• Metano</li> <li>• Etano</li> <li>• Propano</li> <li>• Butano</li> </ul>	50
Olefinas <ul style="list-style-type: none"> <li>• Etileno</li> <li>• Propileno</li> <li>• Buteno</li> </ul>	45
Aromáticos <ul style="list-style-type: none"> <li>• Benceno</li> <li>• Tolueno</li> </ul>	40
Alcoholes <ul style="list-style-type: none"> <li>• Metanol</li> <li>• Etanol</li> <li>• Etil alcohol</li> </ul>	30
Combustibles <ul style="list-style-type: none"> <li>• Gasolina, petróleo</li> <li>• Gas-oil</li> </ul>	45
Plásticos de hidrocarburos puros <ul style="list-style-type: none"> <li>• Polietileno</li> <li>• Poliestireno</li> <li>• Polipropileno</li> </ul>	40
<b>Otros productos</b>	
ABS (plástico)	35
Poliéster (plástico)	30
Poli-isocianuro y poliuretano (plásticos)	25
Polivinilcloruro, PVC (plástico)	20
Betún, alquitrán	40
Cuero	20
Linóleo	20
Cubiertas de caucho	30
NOTA Los valores expresados en esta tabla no son aplicables al cálculo del contenido de energía de los combustibles.	

#### 4.1.2 Método estadístico

La densidad de carga de fuego puede calcularse sumando todas las cargas de fuego presentes en un edificio: es un método determinista. Existe información disponible sobre la densidad de carga de fuego característica para algunos tipos de edificios concretos, tales como oficinas y escuelas. Este método estadístico solo es válido para aquellos tipos de edificios donde pueden esperarse cantidades similares de carga de fuego. En dichos casos, la densidad de carga de fuego puede darse como una distribución estadística con un valor medio y una desviación estándar.

En la siguiente tabla se suministran estos valores para algunos tipos de edificios. Los valores se basan en la distribución Gumbel tipo I. Los valores (para 80, 90 y 95% fractiles) se calculan utilizando esta distribución, adoptando un coeficiente de variación de 0,3. Estos valores de la tabla 4.2 se derivan de un compendio de valores comúnmente aceptados extraídos de algunos documentos internacionales [2, 21, 22].

Tabla 4.2. Datos sobre la densidad de carga de fuego para distintos edificios [MJ/m<sup>2</sup>] (Ajustados con una distribución Gumbel tipo I).

	Desviación estándar	Media	80% fractil	90 % fractil	95 % fractil
Vivienda	234	780	948	1085	1217
Hospital	69	230	280	320	359
Hotel (habitación)	93	310	377	431	484
Biblioteca	450	1500	1824	2087	2340
Oficina (estándar)	126	420	511	584	655
Colegio	85,5	285	347	397	445
Centro comercial	180	600	730	835	936
Teatro (cine)	90	300	365	417	468
Transporte (espacio público)	30	100	122	139	156

#### 4.2 Tipo de fuego

Otra pregunta a responder sería qué cantidad de la carga de fuego total arderá en caso de fuego y cómo afectará esto a la curva de Temperatura-tiempo desarrollada en el escenario.

Los fuegos (excepto los provocados o los causados por una explosión, que quedan fuera del alcance del estudio) nunca comienzan al mismo tiempo en la totalidad del recinto de fuego. Siempre empiezan como un fuego localizado que, dependiendo de una serie de condiciones, se desarrollará hasta convertirse en un fuego a gran escala.

Las diferencias principales entre un fuego localizado y un fuego totalmente desarrollado se muestran en la Tabla 4.3

Tabla 4.3. Diferencias entre fuegos localizados y fuegos totalmente desarrollados

	Carga de fuego	Temperatura del gas
<b>Fuego localizado</b>	Sólo una parte del recinto esta en llamas	Dos zonas (dos curvas temperatura-tiempo)
<b>Fuego totalmente desarrollado</b>	La carga de fuego distribuida uniformemente por todo el recinto esta en llamas	Una zona (una curva de temperatura-tiempo)

En las situaciones en que la totalidad del recinto está implicada en el fuego, se adopta una temperatura de gas uniforme. En un fuego totalmente desarrollado, toda la carga de fuego está ardiendo, de manera que todo el recinto se encuentra lleno de humo, productos de combustión y aire, que están tan bien mezclados, que el gas en todo el recinto puede considerarse homogéneo y representarse mediante una única temperatura. En el capítulo 6 se describe detalladamente un método que permite determinar la(s) curva(s) de Temperatura-tiempo (T-t) para evaluar el comportamiento estructural en caso de que el fuego sea localizado o totalmente desarrollado.

### 4.3 Fuego de diseño

Una vez caracterizada la carga de fuego, hay que saber a que velocidad arderá dicha carga de fuego. Esto nos llevará a la RHR.

#### 4.3.1 Fuegos controlados por el combustible y por la ventilación

La carga de fuego define la energía disponible, pero la temperatura del gas en un fuego depende de la Velocidad de Generación de Calor. La misma carga de fuego ardiendo a gran velocidad o haciéndolo lentamente puede dar lugar a curvas de temperatura del gas completamente distintas.

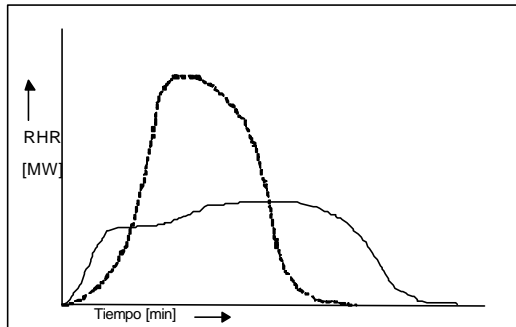


Figura 4.1. Dos curvas RHR correspondientes a la misma cantidad de carga de fuego, ya que la superficie bajo ambas curvas es la misma.

El RHR es el origen del incremento de la temperatura del gas, así como la fuerza que impulsa la propagación del gas y el humo. Un fuego convencional comienza siendo pequeño y luego atraviesa una fase de crecimiento. Entonces pueden suceder dos cosas, dependiendo de que durante el proceso de crecimiento exista siempre oxígeno suficiente para mantener la combustión o no.

O bien, cuando el tamaño del fuego alcanza su valor máximo sin ninguna limitación de oxígeno, el RHR se ve limitado por la carga de fuego disponible (**fuego controlado por el combustible**).

O, si el tamaño de las aberturas en el recinto resulta demasiado pequeño para permitir que entre suficiente aire en el mismo, entonces el oxígeno disponible limita el RHR y se dice que es un **fuego controlado por la ventilación**. Tanto los fuegos controlados por la ventilación, como los controlados por el combustible pueden experimentar flash-over.

Este importante fenómeno, el flash-over, marca la transición de un fuego localizado a un fuego que alcance a todas las superficies combustibles expuestas en el interior del recinto. Ambas fases pueden verse ilustradas en la Figura 4.2, que contiene gráficos de la velocidad de combustión frente al parámetro de la ventilación  $A_w \sqrt{h}$ , con  $A_w$  como el área de abertura y  $h$  la altura de la abertura. Se muestran los gráficos para distintas densidades de carga de fuego. Comenzando por el lado izquierdo de la figura en la fase controlada por la ventilación, con el parámetro de la ventilación en aumento, la velocidad de combustión aumenta hasta alcanzar su valor límite, que a su vez está determinado por la densidad de la carga de fuego, y después permanece aproximadamente constante (fase controlada por el combustible).

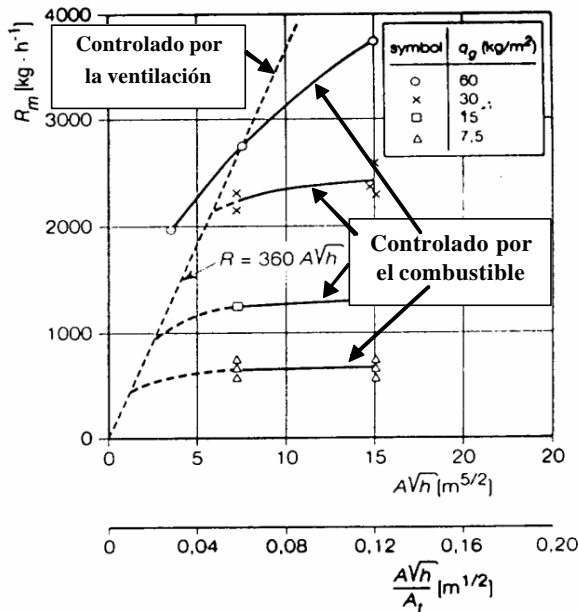


Figura 4.2. Velocidad de quemado para distintas densidades de carga de fuego.

#### 4.3.2 RHR DE DISEÑO

El aumento de la velocidad de generación de calor hasta alcanzar el valor máximo (véase Figura 4.3) viene expresado por (4.2):

$$RHR = (t / t_a)^2 \quad (4.2)$$

donde:

- RHR = Velocidad de generación de calor del fuego durante la fase de crecimiento (MW)
- t = tiempo (s)
- $t_a$  = constante de tiempo incluida en la Figura 4.4 (s)

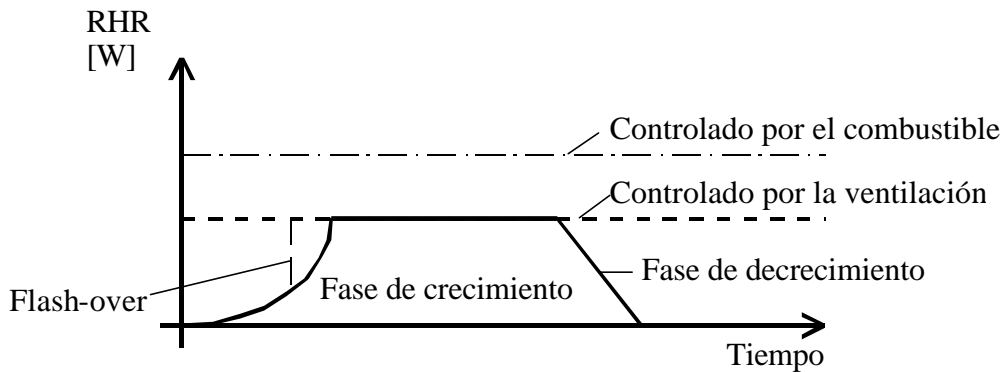


Figura 4.3 Velocidad de generación de calor en función del tiempo

Se distinguen tres fases: creciente, estacionaria (post flash-over) y decreciente.

El parámetro de crecimiento del fuego [1, 2] cambia según el tipo de edificio. En la Figura 4.4 se proporciona ayuda para clasificar y determinar dicho parámetro.

Tras la fase de crecimiento, la curva de RHR se mantiene constante con un valor de RHR máximo correspondiente a las condiciones controladas por el combustible (véase la figura 4.4) o por la ventilación. En [1, 2] y [7] esta fase de decrecimiento se muestra un descenso lineal de RHR. Se suministran fórmulas para calcular el momento de inicio del periodo de decrecimiento, así como la duración del mismo. En

base a los resultados de los ensayos, la fase de decrecimiento puede calcularse que comienza aproximadamente cuando el 70% de la carga de fuego total ha sido consumida. En la siguiente Figura 4.4, se muestra la propuesta de curva RHR para el proyecto NFSC. La curva incluye la fase de crecimiento, estado uniforme y fase de decrecimiento.

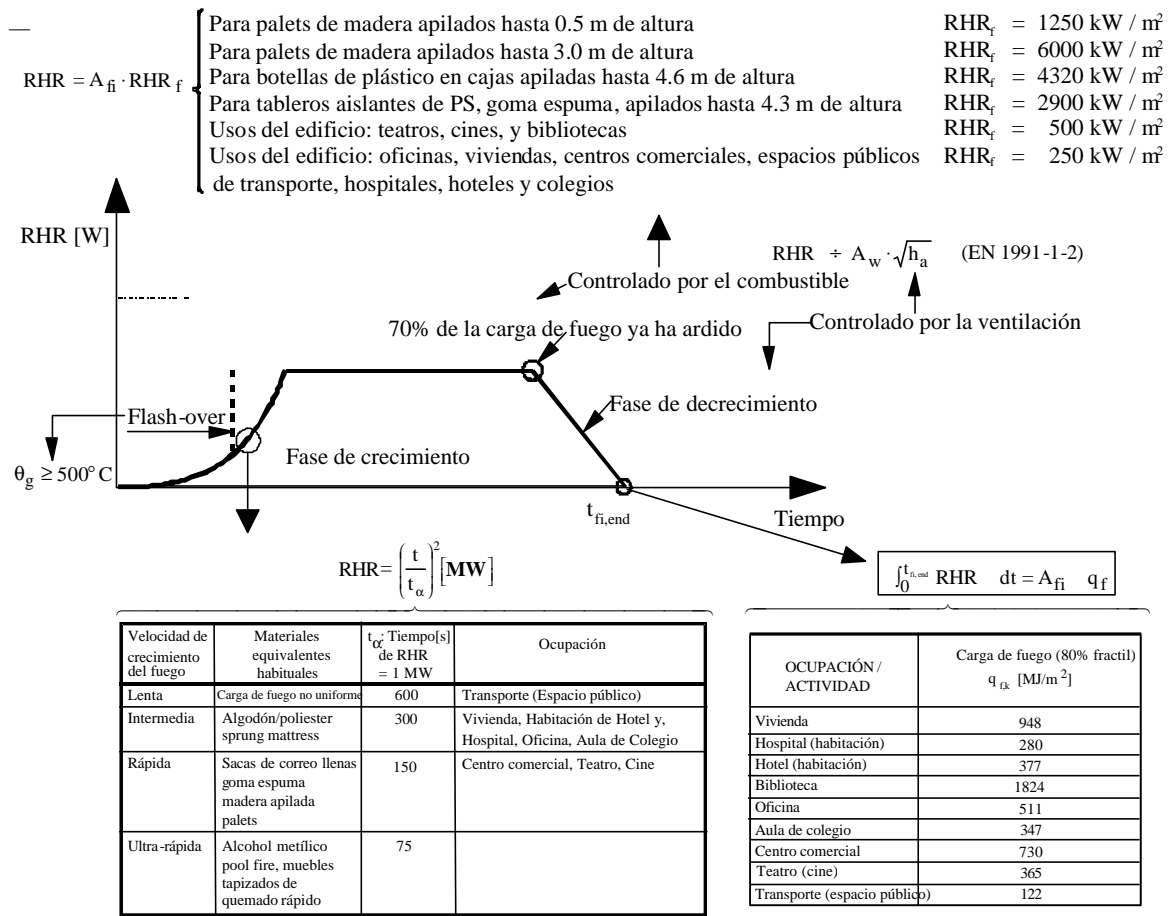


Figura 4.4 Curva de RHR de diseño [1]

#### 4.3.3 Datos experimentales

Otra forma de obtener la curva RHR consiste en realizar un ensayo. Las técnicas para medir velocidades de generación de calor (excepto en una bomba calorífica) no estuvieron disponibles hasta hace unos pocos años, cuando se desarrolló el principio de calorimetría del consumo de oxígeno. Los anteriores intentos necesitaban de una medición directa de la entalpía sensible, lo cual resulta muy difícil de realizar correctamente. Sin embargo, la técnica del consumo de oxígeno ha permitido realizar estas mediciones fácilmente y con gran precisión. El principio de consumo de oxígeno afirma que, dentro de una pequeña banda de incertidumbre, el calor generado en la combustión de cualquier combustible ordinario posee una relación directa con la masa de oxígeno consumida de la corriente del flujo de los caudales de combustión [6]. Se ha empleado esta técnica y se ha establecido la base de datos con los resultados de los ensayos. En las publicaciones existentes existen diversas fuentes para extraer los datos para el valor de RHR [3,4,5,6]. El modelo Hazard [5] de simulación de dos zonas contiene en su estructura una base de datos en la que se muestran diversos elementos y se proporciona información sobre la RHR de los mismos entre otras cosas. Dichos elementos tienden a ser únicamente objetos encontrados en el hogar, como sillas, televisores, y árboles de navidad. Esto conduce obviamente a una limitación del campo de uso. Aunque en su ámbito de uso particular, resulta ser una fuente de información muy valiosa, ya que incluye todas las fases a lo largo de una curva RHR. Argos [4] es otra base de datos descubierta en la estructura de un programa de simulación de fuego. En Argos, se suministran distintas ecuaciones para fuegos de materiales compactos, de materiales fundentes, fuegos de líquidos y fuegos latentes. Dichas ecuaciones definen la RHR en

función de la velocidad de propagación del fuego en las direcciones vertical y horizontal. En la base de datos Argos, se suministran los valores numéricos válidos para distintos materiales y objetos.

Otra fuente de información de los resultados de los ensayos es el documento "Fuegos Iniciales", redactado por la Universidad de Lund [3]. Este documento posee el mismo formato que la base de datos Hazard pero incluye más resultados. En el citado documento se puede hallar información, no solo sobre artículos domésticos, sino también sobre objetos como diversos tipos de vehículos. En Francia, CTICM ha realizado ensayos de fuego sobre coches nuevos (fabricados en 1996) [9], sobre habitaciones de hotel y sobre muebles reales y ha medido la RHR. Estos datos experimentales resultan muy interesantes porque la mayoría de los ensayos de fuego sobre los que se han publicado informes se han realizado utilizando cajones de madera como combustible.

## 5 ASPECTO PROBABILÍSTICA

### 5.1 Introducción

La probabilidad de que se inicie un fuego en una piscina resulta obviamente mucho menor que en un taller de pintura. La probabilidad de que dicho fuego se propague y se convierta en un fuego totalmente desarrollado depende del área del recinto y de las medidas activas contra incendio, como pueden ser rociadores, detectores automáticos de fuego mediante humo o calor, transmisión automática de la alarma al cuerpo de bomberos e intervención de los bomberos.

Distintos proyectos de investigación CECA [11, 18] han permitido recopilar datos estadísticos y deducir la probabilidad de que:

- un fuego comience
- los ocupantes no logren extinguir el fuego
- las medidas activas automáticas (rociadores, ...) no logren extinguir el fuego
- los bomberos no logren extinguir el fuego

La probabilidad de que la intervención de los bomberos tenga éxito depende principalmente del tiempo de detección del fuego (detección de fuego automática mediante humo o calor) y el tiempo hasta llegar al edificio (transmisión automática de la alarma y distancia del cuartel de bomberos al edificio).

A partir de estas probabilidades se puede deducir el factor  $\gamma_{q,f}$  de la carga de fuego mediante un método basado en el Anexo C de la prEN 1990 [10] y realizar los cálculos de fiabilidad. Este método se resume en el capítulo 5.4.

Dicho factor  $\gamma_{q,f}$  ha sido dividido en los sub-coeficientes  $\delta_{q1}$ ,  $\delta_{q2}$ ,  $\delta_{ni}$  para considerar las dimensiones del recinto, el tipo de edificio y las distintas medidas activas contra el fuego. La carga de fuego característica  $q_{f,k}$  debe ser multiplicada por  $\gamma_{q,f} = \delta_{q1} \times \delta_{q2} \times \delta_{ni}$  para la obtención de la carga de fuego de diseño  $q_{f,d}$ .

La carga de fuego de diseño,  $q_{f,d}$  es utilizada entonces por las herramientas "Modelos de Fuego Natural" (véase el siguiente capítulo 6) para calcular el calentamiento debido al fuego natural de cálculo.

### 5.2 Estadísticas

Este estudio estadístico está basado en los datos [11] procedentes de

- Suiza: información detallada y análisis de todos los incendios ( $\pm 40.000$  incendios) que causaron daños superiores a 1.000.000 CHF en Berna entre 1986 y 1995
- Francia: incendios en edificios industriales ocurridos entre enero de 1983 y febrero de 1984, todas las intervenciones de los bomberos en 1995 (3.253.855 intervenciones, de las cuales 312.910 fueron por incendios).
- Holanda: incendios en edificios industriales ocurridos entre enero de 1983 y enero de 1985.
- Finlandia: todos los incendios en edificios en 1995 (2.109 incendios para un total de 1.150.494 edificios).  
En este ámbito [18] se han añadido resultados adicionales de Finlandia de los años 1996-1999, basados en la combinación de la información de la base de datos estadísticos nacional sobre fuegos "PRONTO" del Ministerio de Interior y otras bases de datos estadísticos nacionales relevantes.
- Los informes de los bomberos de Luxemburgo en 1995 y 1997.

además de datos internacionales de distintas fuentes sobre diversos aspectos de seguridad contra incendios, especialmente sobre el rendimiento de los rociadores. Los datos para la base de datos sobre los

efectos de los rociadores fueron compendiados o recogidos en EEUU, Finlandia, Alemania, Francia, Australia y Reino Unido [13].

Las siguientes estadísticas se refieren principalmente a viviendas, oficinas y edificios industriales y se han adoptado para desarrollar el procedimiento. Este procedimiento se ha extendido a otras actividades mediante el coeficiente  $d_{q1}$  proporcionado en la tabla 5.6.

### 5.3 Probabilidades

#### 5.3.1 Análisis del árbol de eventos

Puede establecerse un árbol de eventos (véase la Figura 5.1) desde el inicio del fuego para describir el crecimiento del fuego utilizando los valores por defecto recomendados de la Tabla 5.1.

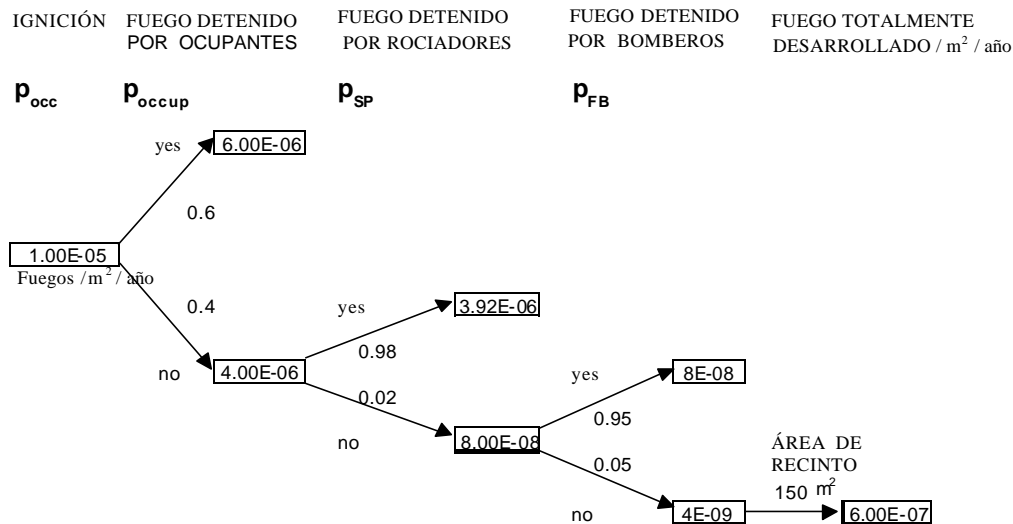


Figura 5.1. Ejemplo de un árbol de eventos para el crecimiento del fuego en una oficina con un área de recinto de  $150 \text{ m}^2$

Tabla 5.1: Factores del árbol de eventos

		Vivienda	Oficina	Ed. Industrial
Ocurrencia del fuego [ $1/(\text{m}^2 \cdot \text{año})$ ]	$p_{occ}$	$30 \cdot 10^{-6}$	$10 \cdot 10^{-6}$	$10 \cdot 10^{-6}$
Fuego detenido por ocupantes	$p_{occup}$	0,75	0,60	0,45
Fuego detenido por rociadores	$p_{SP}$	véase la Tabla 5.5		
Fuego detenido por bomberos	$p_{FB}$	0,90 - 0,95	0,90 - 0,95	0,80 - 0,90

#### 5.3.2 Ocurrencia y crecimiento del fuego

La probabilidad de un incendio grave al año capaz de poner en peligro la estabilidad estructural puede expresarse como (5.1):

$$P_{fi} = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot A_{fi} \cdot P_4 \quad (5.1)$$

con:

$p_1$ : probabilidad de incendio grave incluyendo el efecto de los ocupantes y un cuerpo oficial de bomberos estándar (por  $\text{m}^2$  de suelo y año)

$p_2$ : factor de reducción adicional dependiente de los tipos de cuerpos de bomberos y el tiempo transcurrido entre la alarma y la intervención de los bomberos

- $p_3$ : factor de reducción si existe detección de fuego automática (mediante humo o calor) y / o transmisión automática de la alarma
- $p_4$ : factor de reducción si existe sistema de rociadores ( $p_4$  es también la probabilidad de que los rociadores no logren detener el fuego)
- $A_{fi}$ : área de las superficies del recinto de fuego

Nota: El factor  $p_1$  incluye las acciones de los ocupantes y del cuerpo oficial de bomberos para evitar que el incendio se convierta en un incendio grave, no debe confundirse con la frecuencia de ocurrencia del fuego.

La influencia del tipo de cuerpo de bomberos, tiempo transcurrido entre la alarma y la intervención de los bomberos, detección automática y transmisión de alarma automática ( $p_2$ ,  $p_3$ ) no se ha tenido en cuenta en la Tabla 5.1, el factor  $p_1$  de la Tabla 5.2 es en realidad  $p_{occ} \cdot (1 - p_{occup}) \cdot (1 - p_{FB})$ .

De acuerdo con [11, 18], los valores recomendados para  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$  y  $p_4$ .

Tabla 5.2. Frecuencia de inicio del fuego y crecimiento hasta convertirse en incendio grave incluyendo un cuerpo oficial de bomberos estándar

Ocupación/Actividad	$p_1$ [ $10^{-7}/(m^2 \cdot \text{año})$ ]
Oficina	2 – 4
Vivienda	4 – 9
Edificio industrial	5 – 10

Tabla 5.3. Factor de reducción adicional dependiente del tipo de cuerpo de bomberos y del tiempo transcurrido entre la activación de la alarma y la intervención de los bomberos

$p_2$	Tiempo entre Alarma y Acción de los BOMBEROS		
	$\leq 10'$	$10' < t \leq 20'$	$20' < t \leq 30'$
Tipo de BOMBEROS			
Profesionales	0,05	0,1	0,2
No profesionales	0,1	0,2	1

Tabla 5.4. Factor de reducción para la detección de fuego automática (mediante humo o calor) y la transmisión automática de la alarma

Medidas Activas	$p_3$
Detección por Humo	0,0625
Detección por Calor	0,25
Transmisión de Alarma Automática al Cuerpo de Bomberos	0,25

Tabla 5.5. Factor de reducción para el sistema de rociadores

Tipo de rociador	$p_4$
Normal (p.e. siguiendo las normativas)	0,02
Alto nivel (p.e. válvula con chequeo electrónico, dos suministros de agua independientes)	0,01 - 0,005
Bajo nivel (p.e. sin seguir las normativas)	$\geq 0,05$

## 5.4 Método

### 5.4.1 Determinación de los valores de diseño de las acciones y resistencias – Factor de Seguridad $g$ de los Eurocódigos – Principio para condiciones normales de uso

La resistencia  $R$  y la Acción  $S$  van de acuerdo con las distribuciones estadísticas, que a su vez están definidas por las desviaciones estándar ( $\sigma_S, \sigma_R$ ) y las medias ( $m_S, m_R$ ). Para garantizar una seguridad suficiente, es necesario que el fallo ( $S > R$ ) ocurra sólo con una probabilidad muy baja  $p_f$  representada por el área sombreada (véase la Figura 5.2). Este área puede medirse mediante el índice de seguridad  $\beta$ . En condiciones normales, los Eurocódigos requieren una probabilidad de fallo máxima  $p_t$  de  $7,23 \cdot 10^{-5}$  para la vida del edificio, que se corresponde con un índice de seguridad  $\beta_t$  de 3,8.

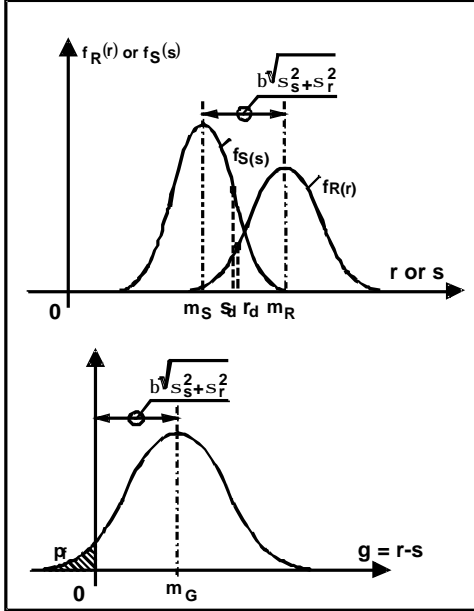


Figura 5.2. Método probabilista

Para las dos variables  $S$  y  $R$ , correspondientes a la acción y la resistencia, los valores de diseño vienen dados respectivamente por  $s_d$  y  $r_d$ .

Sin embargo, existen muchas acciones: (el propio peso, la carga variable, nieve, viento, terremotos, fuego ...) y muchas resistencias (resistencia a compresión del hormigón, punto de fluencia del acero de los perfiles, de las barras de armadura ...)

Por consiguiente, el problema es mucho más complejo que la comparación entre dos variables estadísticas. Por eso los Eurocódigos han adoptado un método semi-probabilista basado en el método FORM (Método de Fiabilidad de Primer Orden - *First Order Reliability Method*).

Esta simplificación de los Eurocódigos consiste en considerar:

$$\mathbf{a}_R = \frac{\mathbf{s}_R}{\sqrt{\mathbf{s}_R^2 + \mathbf{s}_S^2}} = 0,8 \text{ para la resistencia.} \quad (5.2)$$

$$\mathbf{a}_S = \frac{\mathbf{s}_S}{\sqrt{\mathbf{s}_R^2 + \mathbf{s}_S^2}} = (-0,7) \text{ para la acción principal y } (-0,28) \text{ para la acción secundaria} \quad (5.3)$$

$$\Rightarrow s_{d,i} = \text{Valor de Cálculo} = m_{S,i} + 0,7 \mathbf{b} \mathbf{s}_{S,i}$$

$$\Rightarrow r_{d,i} = \text{Valor de Cálculo} = m_{R,i} - 0,8 \mathbf{b} \mathbf{s}_{R,i}$$

Considerando valores constantes de los factores de ponderación  $\alpha_{s,i}$ , los valores de cálculo  $s_{d,i}$  para las acciones pueden definirse sin referirse a la resistencia, ya que estos valores de cálculo dependen únicamente del índice de seguridad  $\beta$ , de la media y la desviación estándar de la distribución estadística correspondiente y, por supuesto, del tipo de distribución (véanse las fórmulas de la Figura 5.2 [10]).

Estos valores de diseño  $s_{d,i}$  de las acciones son, pues, los valores de las acciones que deben ser considerados para obtener la seguridad requerida. Si  $\beta$  es igual a 3,8 como en los Eurocódigos, esto implica que el riesgo de fallo es igual a  $7,23 \cdot 10^{-5}$  durante la vida del edificio.

En consecuencia, para cada acción, se puede definir el coeficiente de seguridad  $\gamma$ , que es la relación entre el valor de cálculo  $s_d$  y el valor característico, que es el valor habitual de referencia:

$$\mathbf{g} = \frac{S_d}{S_k} \quad (5.4)$$

De este modo, podemos hallar los coeficientes de seguridad proporcionados en los Eurocódigos: respecto a la acción, 1,35 y 1,5 para el propio peso y para las cargas impuestas; en cuanto a la resistencia 1,0, 1,15 y 1,5 respectivamente para el acero estructural, las barras de armadura y el hormigón [1, 16, 20, 24]. Seguidamente, incluimos como ejemplo el cálculo de  $\gamma_s$  de 1,15 para las barras de armadura [20]:

- $\beta = 3,8$  ;  $\alpha_a = 0,8$
- Ley estadística: Lognormal
- Coeficientes de variación  $\left( = \frac{\mathbf{s}}{m} \right)$ :
  - $V_R =$  coeficiente de variación del Valor de cálculo  $= \sqrt{V_G^2 + V_m^2 + V_f^2} = 0,087$
  - $V_m =$  coeficiente de variación de la Incertidumbre del modelo  $= 0,05$
  - $V_G =$  coeficiente de variación de la Geometría del elemento  $= 0,05$
  - $V_f =$  coeficiente de variación de la Propiedad mecánica  $= 0,05$
- Valor de cálculo:  $X_d = m_X \exp(-\mathbf{a}_R \mathbf{b} V_R)$   
 $= m_X \exp(-0,8 \mathbf{b} V_R)$
- Valor característico:  $X_k = m_X \exp(-k V_f)$   
 con  $k = 1,645$  correspondiente al 5 % fractil
- Factor de seguridad :  $\gamma_s = \frac{X_k}{X_d} = \exp(0,8 \mathbf{b} V_R - k V_f)$   
 $= \exp(0,8 \cdot 3,8 \cdot 0,087 - 1,645 \cdot 0,05)$   
 $= 1,198$

#### 5.4.2 Objetivo de valor

La consideración de una probabilidad de fallo  $p_t$  de  $7,23 \cdot 10^{-5}$  durante la vida del edificio ( $1,3 \cdot 10^{-6}$  por año) se define en la prEN 1990 [10]. Ese requerimiento de seguridad ( $\beta > 3,8$ ) para el estado límite último en condiciones normales se ha adoptado también como el criterio de aceptación para la resistencia estructural al incendio. De hecho, se podría diferenciar la seguridad requerida en caso de incendio. Esta idea se ha desarrollado en el informe final de [11] (capítulo 2.8 del Anexo B del apartado WG5), donde se propone utilizar un objetivo de probabilidad de fallo  $p_t$  [1/año] dependiendo de la evacuación de la gente:

$p_t = 1,3 \cdot 10^{-4}$  para evacuaciones normales  $p_t$  [1/año]

$p_t = 1,3 \cdot 10^{-5}$  para evacuaciones difíciles (hospitales, etc.)

$p_t = 1,3 \cdot 10^{-6}$  para evacuaciones imposibles (p.e. edificios de gran altura).

Podría conducir a futuras mejoras de interés pero se decidió conservar el valor de la prEN 1990 [10] aceptado por todos, mientras que se necesitaron diversas discusiones para conseguir convencer a las Autoridades de que adoptasen nuevos objetivos de valores inferiores.

#### 5.4.3 Fuego de cálculo y probabilidad condicional

El Anexo C de la prEN 1990 [10], que describe el concepto semi-probabilista que conduce a los valores de diseño para las acciones y para las propiedades materiales, se ha ampliado hasta la resistencia estructural ante incendio.

A temperatura ambiente, los factores de seguridad para las acciones  $\gamma_{s,i}$  y las propiedades de los materiales  $\gamma_{R,i}$  se han deducido mediante un método semi-probabilista, que considera implícitamente que la probabilidad de fallo de la estructura  $p_f$  es inferior a una probabilidad objetivo de fallo  $p_t$  de  $7,23 \cdot 10^{-5}$  durante la vida funcional del edificio, que equivale al factor de seguridad  $\beta$  de 3,8:

$$p_f \text{ (probabilidad de fallo)} \leq p_t \text{ (probabilidad objetivo)} \quad (5.5)$$

En caso de incendio, la acción principal la constituye el fuego, que puede ser cuantificado mediante la carga de fuego expresada en kg de madera o en MJ. Sin embargo, esta carga de fuego resulta ser una acción real para la estructura solamente cuando existe un incendio.

La carga de fuego influye en la estructura sólo con una cierta probabilidad  $p_{fi}$ , siendo  $p_{fi}$  el producto de  $p_{start}$  (probabilidad de que comience el fuego) y  $p_{spread}$  (probabilidad de que este fuego iniciado alcance el flash-over o se convierta en un fuego totalmente desarrollado).

En caso de incendio, lo cual se considera una acción accidental, la ecuación (5.5) sería:

$p_{f,fi}$  (probabilidad de fallo en caso de incendio) ·  $p_{fi}$  (probabilidad de incendio)  $\leq p_t$  (probabilidad objetivo) lo cual puede expresarse como:

$$\begin{aligned} - p_{f,fi} &\leq (p/p_{fi}) \\ - p_{f,fi} &\leq p_{t,fi} \quad \Rightarrow \quad \beta_{f,fi} = \beta_{fi,t} \end{aligned} \quad (5.6)$$

Mientras que el objetivo de  $p_t$  de  $7,23 \cdot 10^{-5}$  nos lleva al índice de seguridad constante  $\beta_t$  a temperatura ambiente, en caso de incendio, no existe un valor fijo del índice de seguridad (denominado  $\beta_{fi,t}$  en caso de incendio) ya que el objetivo de valor  $p_{t,fi}$  depende según la ecuación (5.6) de la probabilidad de incendio  $p_{fi}$ . Conociendo  $\beta_{fi,t}$ , el valor de diseño de la carga de fuego puede deducirse tal y como se explica en el siguiente apartado.

#### 5.4.4 Carga de fuego de cálculo y factor $d$

La fiabilidad de los cálculos (véase el capítulo 7.4 de [11]) ha mostrado que el factor de ponderación para la acción principal a temperatura ambiente se reduce considerablemente en caso de incendio y, por tanto, puede ser considerado como una acción secundaria, mientras que la carga de fuego se convierte en la acción principal.

Además, estos cálculos han puesto de manifiesto que la consideración del factor de ponderación de (-0,7) para la acción principal debe ser modificada y que debe elegirse un valor de (-0,9) para  $\alpha_{qf}$ .

De acuerdo con las densidades de la carga de fuego proporcionadas en el documento de Reino Unido “La Aplicación de los Principios de Ingeniería de Seguridad contra el Fuego a la Seguridad en Edificios” [14] y el análisis del Prof. Fontana [15], los datos de cargas de fuego se adaptan bien a una distribución Gumbel tipo I. Se ha elegido un coeficiente de variación  $V_{qf}$  de 0,3 [11].

Según [10], el valor de diseño (véanse las cargas variables) para la distribución Gumbel viene dado por:

$$q_{f,d} = m_{qf} \left\{ 1 - \frac{\sqrt{6}}{p} V_{qf} \left[ 0,577 + \ln \left( -\ln F(0,9 \mathbf{b}_{fi,t}) \right) \right] \right\} \quad (5.7)$$

con  $m_{qf}$  como valor medio de la carga de fuego y  $\phi$  como función de distribución de la distribución normal.

Tal y como se propone en [16], debe considerarse un factor de seguridad en el modelo para calcular el efecto de la acción  $\gamma_{SD} = 1,05$ .

Elegiendo un valor característico  $q_{f,k}$  de 80 % fractil (véase el Anexo E de la EN1991-1-2 [1] y [11]), el factor  $\gamma_{qf}$  pasa a ser:

$$\begin{aligned} \mathbf{g}_{qf} &= \frac{q_{f,d}}{q_{f,k}} = 1,05 \frac{\left\{ 1 - \frac{\sqrt{6}}{p} V_{qf} \left[ 0,577 + \ln \left( -\ln F(0,9 \mathbf{b}_{fi,t}) \right) \right] \right\}}{\left\{ 1 - \frac{\sqrt{6}}{p} V_{qf} \left[ 0,577 + \ln \left( -\ln 0,8 \right) \right] \right\}} \\ &= 2,38 \text{ para } \beta = 3,8 \text{ y } 0,82 \text{ para } \beta = 0 \end{aligned} \quad (5.8)$$

La evolución de  $\gamma_{qf}$  en función de  $\beta_{fi,t}$  se muestra en la Figura 5.3.

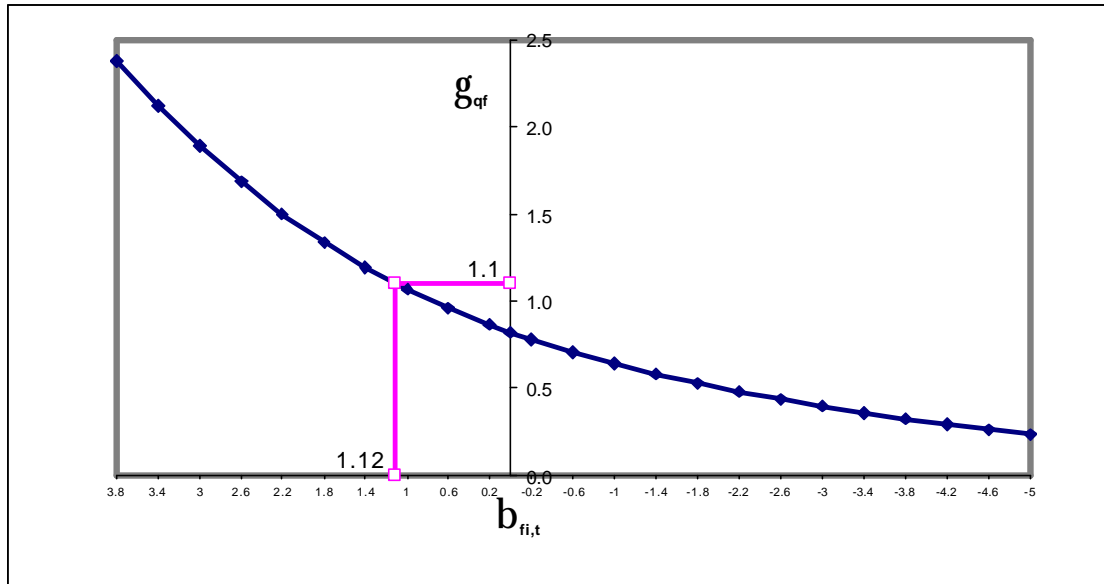


Figura 5.3. Factor de seguridad  $\gamma_{qf}$  en función de  $\beta_{fi}$

El índice de seguridad  $\beta_{fi,t}$  puede calcularse a partir de la probabilidad de un incendio grave  $p_{fi}$  mediante la siguiente fórmula:

$$b_{fi,t} = f^{-1} \left( \frac{p_t}{p_{fi}} \right) = f^{-1} \left( \frac{7,23 \cdot 10^{-5}}{p_{fi}} \right)$$

$f^{-1}$  es el inverso de la Distribución Normal Estándar acumulativa

La Figura 5.3 permite entonces deducir el factor  $\gamma_{qf}$  para la carga de fuego.

Este método global conlleva:

- determinar la probabilidad de un incendio grave  $p_{fi}$
- calcular  $(p_t/p_{fi})$
- deducir el objetivo del índice de fiabilidad  $\beta_{fi,t}$
- obtener el factor  $\delta_{qf}$

Este método se ha diferenciado dividiendo el  $\gamma_{qf}$  en 3 coeficientes  $\delta_{q1}$ ,  $\delta_{q2}$  y  $\delta_{ni}$  para considerar la influencia sobre  $p_{fi}$  de las dimensiones del recinto, el riesgo de activación del fuego y las medidas activas contra incendio, respectivamente (véase la tabla 5.6).

Tabla 5.6. Tabla resumen de factores  $\delta$  [1]

Área del Suelo del Recinto $A_f$ [m <sup>2</sup> ]	Peligro de Activación del Fuego $d_{q1}$	Peligro de Activación del Fuego $d_{q2}$	Ejemplos de Ocupaciones
25	1,10	0,78	galería de arte, museo, piscina
250	1,50	1,00	vivienda, hotel, oficina
2500	1,90	1,22	manufactory for machinery & engines
5000	2,00	1,44	Laboratorio químico, Laboratorio, Taller de pintura
10000	2,13	1,66	Fábrica de fuegos de artificio o de pinturas

$d_{ni}$ Función de las Medidas Activas de Seguridad contra Incendio									
Extinción Automática del Fuego		Detección Automática del Fuego			Extinción Manual del Fuego				
Sistema Automático de Extinción por Agua	Suministro de Agua Independiente	Detección y Alarma Automática		Transmisión de Alarma Automática a Bomberos	Cuerpo Interno de Bomberos	Cuerpo Externo de Bomberos	Rutas de Acceso Seguras	Dispositivos contra Incendio	Sistema de Extracción de Humo
$\delta_{n1}$	0   1   2 $\delta_{n2}$	por Calor $\delta_{n3}$	por Humo $\delta_{n4}$	$\delta_{n5}$	$\delta_{n6}$	$\delta_{n7}$	$\delta_{n8}$	$\delta_{n9}$	$\delta_{n10}$
0,61	1,0   0,87   0,7	0,87 o 0,73		0,87	0,61 o 0,78		0,9 o 1 1,5	1,0 1,5	1,0 1,5

\* Para medidas normales contra incendio, que deberían estar casi siempre presentes, como son las Rutas de Acceso Seguras, Dispositivos contra Incendio, Sistemas de Extracción de Humo en escaleras,  $\delta_{n1}$  debe considerarse 1.5 en caso de que dichas medidas sean insatisfactorias o inexistentes.

Cuando se han determinado los factores  $\delta_{q1}$ ,  $\delta_{q2}$  y  $\delta_{ni}$ , puede deducirse la carga de fuego de diseño  $q_{f,d}$ :

$$q_{f,d} = d_{q1} \cdot d_{q2} \cdot d_{ni} \cdot q_{f,k}$$

Entonces, la carga de fuego de diseño es utilizada por las herramientas presentadas en el capítulo 6.

## 6 CÁLCULO DEL DESARROLLO DE FUEGO

### Introducción

Al simular numéricamente el desarrollo del fuego, pueden realizarse distintas simplificaciones de la dinámica de fuegos. Este capítulo explica los modelos a aplicar en la situación de pre flash-over (los modelos de fuego localizado y los modelos de dos zonas) y en la situación de post flash-over (fuego totalmente desarrollado). Los Modelos de campo (CFD: Dinámica de Fluidos por Ordenador - Computer Fluid Dynamics) se han excluido en este capítulo; son demasiado complejos y requieren demasiado tiempo para ser empleados como una herramienta simple.

### 6.1 Fuego localizado

En un fuego localizado, existe una acumulación de productos de combustión en una capa por debajo del techo (capa superior), con un interface horizontal entre esta capa caliente y la capa inferior donde la temperatura de los gases se mantiene mucho más fría.

Esta situación se representa bien con un modelo de dos zonas, útil para todas las condiciones de pre flash-over. Además de servir para calcular la evolución de la temperatura del gas, estos modelos se utilizan para conocer la propagación del humo en los edificios y para evaluar la seguridad de los ocupantes en función de la altura de la capa de humo, la concentración de gases tóxicos, el flujo de irradiación y la densidad óptica.

La acción térmica sobre los elementos horizontales situados por encima del fuego depende también de la distancia existente entre dichos elementos y el fuego. Esta puede calcularse mediante modelos específicos para la evaluación del efecto local sobre elementos adyacentes, como pueden ser el método de Heskestad o el de Hasemi [17].

### 6.1.1 Modelos de dos zonas

Modelo de zona es el nombre que se le da a una serie de programas numéricos que calculan el desarrollo de la temperatura de los gases en función del tiempo, integrando las ecuaciones diferenciales ordinarias, que expresan la conservación de la materia y la conservación de la energía para cada zona del recinto. Dichos modelos se basan en la hipótesis fundamental de que la temperatura es uniforme en cada zona.

Los modelos de zona suministran, no sólo la evolución de la temperatura de los gases en el recinto, sino también información adicional, como las temperaturas en las paredes o la velocidad de los gases a través de las aberturas.

Los datos que deben suministrarse para un modelo de zona son:

- datos geométricos, como las dimensiones del recinto, las aberturas y los tabiques;
- las propiedades materiales de las paredes;
- datos del fuego, como la curva RHR, la velocidad de pirolisis o el calor de combustión del combustible.

En un modelo de dos zonas, las ecuaciones que expresan el equilibrio de la materia y de la energía se ejecutan para cada una de las dos capas y se consideran los intercambios entre las dos capas mediante modelos de arrastre de aire.

Como resultado de la simulación, se obtiene la temperatura del gas en cada una de las dos capas, así como información sobre las temperaturas de las paredes y el flujo a través de las aberturas. Un resultado importante es la evolución en función del tiempo del espesor de cada capa. El espesor de la capa inferior, que permanece a una temperatura bastante fría y no contiene productos de combustión, es muy importante para el cálculo de la habitabilidad del recinto para los ocupantes. La figura 6.1 muestra cómo se modela un recinto mediante un modelo de dos zonas, con representación de distintas condiciones de materia y energía.

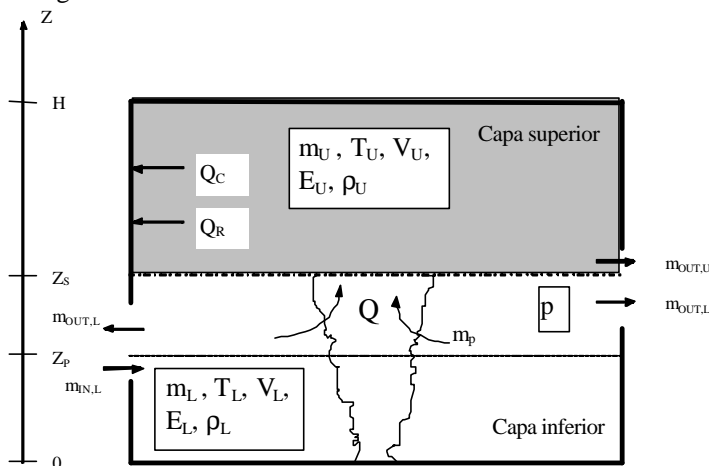


Figura 6.1. Recinto en un modelo de dos zonas

La figura 6.1 es típica de una situación simple en la que el recinto intercambia materia y energía solamente con el ambiente exterior. Este tipo de modelos posee la capacidad de analizar edificios más complejos, en los que el recinto de origen intercambia materia y energía con el ambiente exterior, pero también con otros recintos del edificio. Esto resulta particularmente interesante para analizar la propagación del humo desde el recinto de origen hacia otros recintos adyacentes. Dicha situación, analizada con modelos de dos zonas multi-compartimento, se muestra en la Figura 6.2.

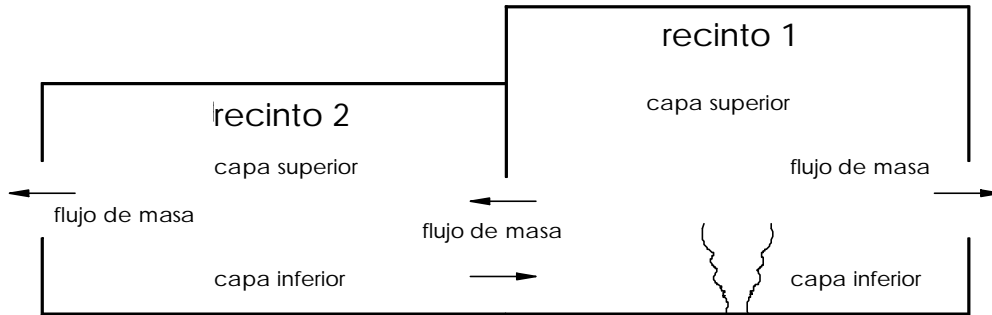


Figura 6.2. Recinto en un modelo de dos zonas multi-compartimento

### 6.1.2 El método Heskestad

La acción térmica de un fuego localizado puede determinarse utilizando el método Heskestad [1]. Deben establecerse diferencias en cuanto a la altura relativa de la llama al techo.

Las longitudes de llama  $L_f$  de un fuego localizado (véase la Figura 6.3) vienen dadas por:

$$L_f = -1,02 D + 0,0148 Q^{2/5}$$

Cuando la llama no impacta en el techo de un recinto ( $L_f < H$ ; véase la Figura 6.3) o en casos de fuego al aire libre, la temperatura  $T_{(z)}$  en la pluma a lo largo del eje simétrico vertical de la llama se obtiene con:

$$T_{(z)} = 20 + 0,25 Q_c^{2/5} \cdot (z-z_0)^{-5/3}$$

donde

$D$  es el diámetro del fuego [m], véase la Figura 6.3

$Q$  es la velocidad de generación de calor [W] del fuego

$Q_c$  es la sección de transmisión de la velocidad de generación de calor [W], con  $Q_c = 0,8 Q$  por defecto

$z$  es la altura [m] a lo largo del eje de la llama, véase la Figura 6.3

$H$  es la distancia [m] entre el origen del fuego y el techo, véase la Figura 6.3

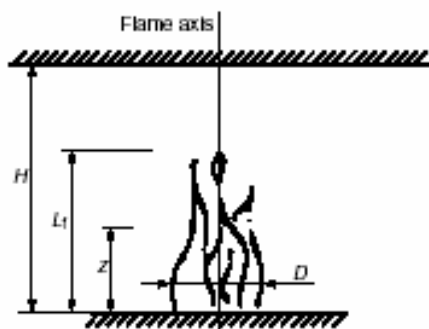


Figura 6.3. Modelo de fuego localizado para llamas que no impactan en el techo

### 6.1.3 Método de Hasemi [1, 17]

El método de Hasemi [1, 17] es una herramienta sencilla para evaluar el efecto localizado sobre elementos horizontales situados por encima del fuego. Se basa en los resultados de los ensayos realizados en el Instituto para el Estudio de Edificios de Tsukuba, Japón.

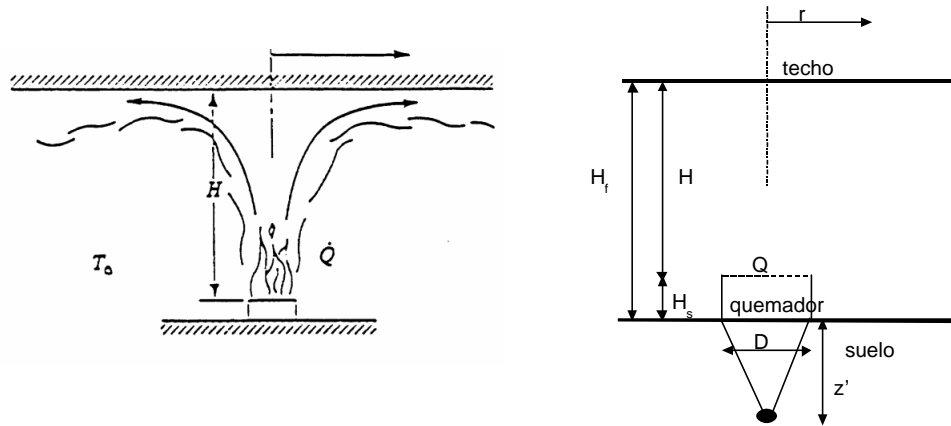


Figura 6.4. Esquema de un fuego localizado y descripción del Fuego de Hasemi  
Los datos para la aplicación del método son:

- Q Velocidad de Generación de Calor del fuego [W]
- $H_f$  altura entre suelo y techo [m]
- D diámetro (o longitud característica) del fuego [m]
- $H_s$  distancia vertical entre el suelo y el asiento del origen del fuego [m]

Las variables son:

- H distancia entre el origen del fuego y el techo [m]
- $Q^*$  Velocidad de Generación de Calor adimensional [-]
- $Q_H^*$  Velocidad de Generación de Calor adimensional [-]
- $z'$  posición vertical de la fuente virtual de calor, respecto del origen del fuego [m]
- $L_H$  longitud horizontal de la llama sobre el techo [m]
- r distancia horizontal, en el techo, desde el centro del fuego [m]

El método consiste en:

Calcular H 
$$H = H_f - H_s \quad (6.1)$$

Calcular  $Q^*$  
$$Q^* = \frac{Q}{1,11 \times 10^6 D^{2,5}} \quad (6.2)$$

Calcular  $Q_H^*$  
$$Q_H^* = \frac{Q}{1,11 \times 10^6 H^{2,5}} \quad (6.3)$$

Calcular  $z'$  
$$z' = 2,4 D (Q^{*2/5} - Q^{*2/3}) \quad Q^* < 1,00 \quad (6.4)$$

$$z' = 2,4 D (1,00 - Q^{*2/5}) \quad Q^* \geq 1,00 \quad (6.5)$$

Calcular  $(L_H + H)/H$  
$$\frac{L_H + H}{H} = 2,90 Q_H^{*0,33} \quad (6.6)$$

Calcular  $L_H$  a partir del valor calculado en la ecuación anterior y del valor de H

Calcular el valor del flujo  $q''$  en [kW/m<sup>2</sup>] a una distancia r, de acuerdo con

$$q'' = 100 \quad y < 0,30 \quad (6.7)$$

$$q'' = 136,30 - 121,00 y \quad 0,30 < y < 1,0 \quad (6.8)$$

$$q'' = 15 y^{-3,7} \quad y > 1,0 \quad (6.9)$$

donde 
$$y = \frac{r + H + z'}{L_H + H + z'} \quad (6.10)$$

El flujo  $q''$  recibido por el techo descende en función de la velocidad y aumenta en función de  $Q$ . En la Figura 6.5 se muestran estas funciones para el caso:

$r = 0 \quad H = 5 \text{ m} \quad D = 3 \text{ m}$

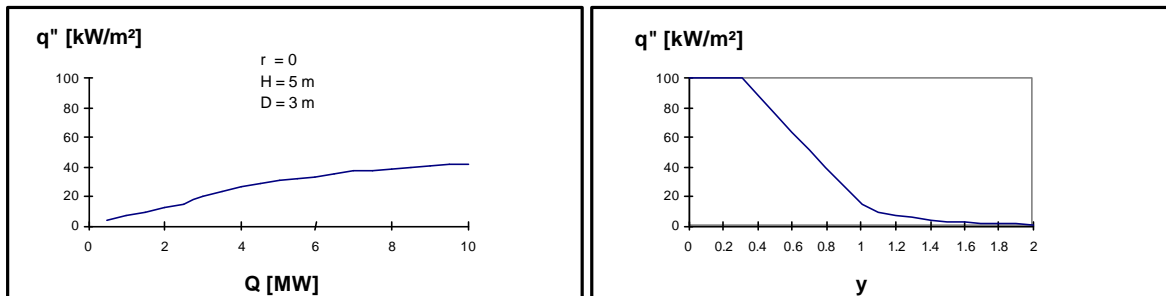


Figura 6.5  $q''$  en función de  $y$  y de  $Q$

#### 6.1.4 Combinación del modelo de dos zonas con el modelo de fuego localizado

En un fuego localizado, la distribución de la temperatura del gas en el recinto puede calcularse mediante un modelo de dos zonas. En este modelo, la temperatura del gas en cada capa se calcula con la hipótesis de que ésta es uniforme en cada capa. Esta temperatura media en la zona caliente es por lo general suficientemente precisa en lo que respecta a los fenómenos globales: cantidad de humo que debe extraerse del recinto, probabilidad de flash-over, ruina total de la cubierta o techo, etc.

Cuando se trata de calcular el comportamiento local de un elemento estructural situado justo por encima del fuego, la hipótesis de una temperatura uniforme puede no resultar segura y el modelo de dos zonas debe combinarse con la fórmula del fuego localizado suministrada en el párrafo 6.1.3.

Las temperaturas en las proximidades de la viga se obtienen – para cada punto a lo largo de la viga – tomando la temperatura más alta predicha por cada uno de los modelos.

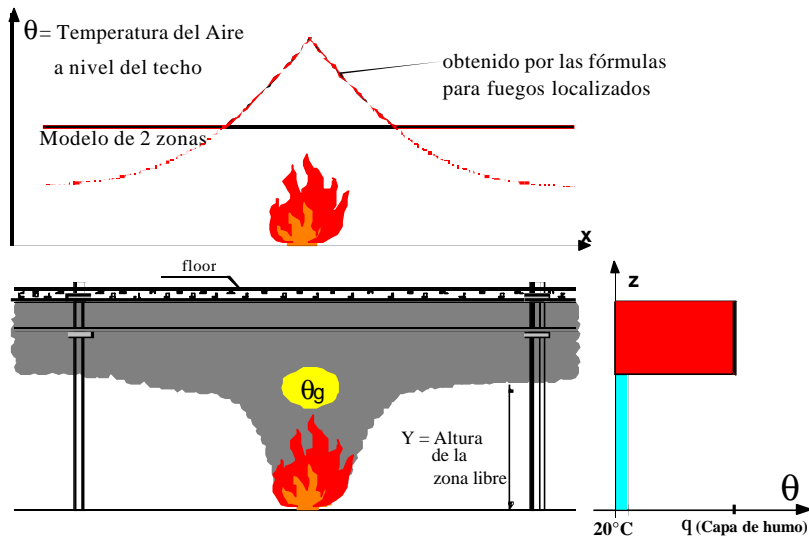


Figura 6.6. Combinación del modelo de dos zonas con el modelo de fuego localizado

La altura de la zona del humo y las temperaturas de los gases calientes al nivel de las estructuras de acero a distintas distancias del fuego pueden calcularse mediante el modelo TEFINAF [8]. Este modelo combina un modelo de dos zonas, que proporciona la altura y la temperatura media de la zona caliente y la fórmula del fuego localizado, que suministra el pico de temperatura justo por encima del fuego y a diferentes distancias del fuego.

## 6.2 FUEGO COMPLETAMENTE DESARROLLADO

Para establecer el modelo de un fuego totalmente desarrollado en el interior de un edificio, existen varios tipos de modelos. Algunos de los más utilizados se describen en este capítulo.

El concepto de fuego natural es una alternativa a los fuegos nominales definidos en los códigos preceptivos (ISO, curvas de hidrocarburo...).

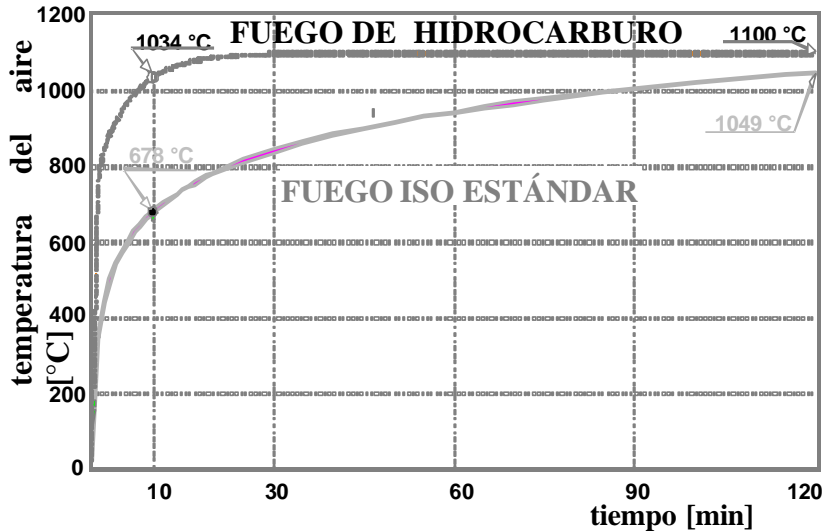


Figura 6.7. Curvas de fuego Estándar y de Hidrocarburo

Los modelos de campo (CFD) no se han incluido en este capítulo. Son demasiado complejos y se necesita demasiado tiempo y demasiados datos para utilizarlos como una herramienta de ingeniería simplificada.

### 6.2.1 Fuegos paramétricos

Los fuegos paramétricos proporcionan un medio simplificado para considerar los fenómenos físicos más importantes que pueden influir en el desarrollo de un fuego en un edificio en particular. Al igual que los fuegos nominales, constan de relaciones temperatura-tiempo, pero dichas relaciones contienen algunos parámetros que se consideran representativos de aspectos concretos de la realidad.

En casi todos los fuegos paramétricos que pueden encontrarse en las publicaciones, los parámetros considerados de una forma u otra son:

- la geometría del recinto,
- la carga de fuego en el interior del recinto,
- las aberturas en las paredes y/o en la cubierta y
- el tipo y naturaleza de los distintos elementos de construcción que constituyen los cierres del recinto.

Los fuegos paramétricos se basan en la hipótesis de que la temperatura es uniforme en el recinto, lo cual limita su campo de aplicación a fuegos de post flash-over en recintos de dimensiones moderadas. Sin embargo, estos fuegos constituyen un paso adelante significativo hacia la consideración de la naturaleza real de un fuego en particular cuando se le compara con los fuegos nominales, mientras que conservan la simplicidad de algunas expresiones analíticas, es decir, no se requieren sofisticadas herramientas informáticas para su aplicación.

En el anexo informativo A de la EN 1991-1-2 [1] se realiza una propuesta para un fuego paramétrico de este tipo. Resulta válida para recintos de hasta 500 m<sup>2</sup> de superficie en planta, sin aberturas en la cubierta y para una altura máxima del recinto de 4 m.  $b$  debe estar comprendido entre 1.000 y 2.200 J/m<sup>2</sup>s<sup>1/2</sup>K, y  $O$  debe oscilar entre 0,02 y 0,20. ( $O$  y  $b$  se definen a continuación).

Se han realizado algunas correcciones para mejorar la propuesta de la ENV1991-2-2 [23], que son:

- un modo más correcto de calcular la disipación térmica (factor  $b$ ) en paredes construidas con capas de distintos materiales;
- la introducción de una duración mínima del fuego, teniendo en cuenta un fuego controlado por el combustible cuando la carga de fuego es baja y las aberturas son grandes;

- un factor de corrección, que considera el gran flujo de masa a través de las aberturas en el caso de los fuegos controlados por el combustible.

Esta nueva formulación del fuego paramétrico se presenta a continuación y es válida para cualquier  $b$ .

La evolución de la temperatura del gas en el interior del recinto viene dada por:

$$Q_g = 1.325 \left( 1 - 0,324 e^{-0,2t^*} - 0,204 e^{-1,7t^*} - 0,472 e^{-19t^*} \right) + 20^\circ \text{C} \quad (6.11)$$

con

$$t^* = G t \quad (6.12)$$

$$G = \frac{(O/0,04)^2}{(b/1.160)^2} \quad (6.13)$$

$$O = A_v \sqrt{h} / A_t \quad (6.14)$$

y

$t$  tiempo, en horas,

$A_v$  superficie de aberturas verticales, en  $\text{m}^2$ ,

$h$  altura de aberturas verticales, en m,

$A_t$  área total del recinto (paredes, techo y suelo, incluyendo aberturas), en  $\text{m}^2$ ,

$b$  es el llamado factor  $b$  en  $[\text{J}/\text{m}^2\text{s}^{1/2}\text{K}]$ . Va en función de la inercia térmica de los cierres (véase § 3.3 para el cálculo de  $b$ ).

La duración de la fase de calentamiento se determina con:

$$t_{\max} = \max \left( 0,2 \times 10^{-3} q_{t,d} / O ; t_{\lim} \right) \quad [\text{horas}] \quad (6.15)$$

con:

$q_{t,d}$  valor de diseño de la densidad de carga de fuego en relación a  $A_t$ , en  $\text{MJ}/\text{m}^2$ ,

$t_{\lim}$  20 minutos, similar a la duración del fuego en combustión libre  $t_F$  considerado en el Anexo B de la EN 1991-1-2 [1].

Al aplicar la ecuación 6.15, existen dos posibilidades distintas:

- O bien la duración de la fase de calentamiento del fuego calculada a partir del primer término de la ecuación,  $0,2 \times 10^{-3} q_{t,d} / O$ , es superior al tiempo límite elegido  $t_{\lim}$ , en cuyo caso las ecuaciones 6.11 a 6.14 y las ecuaciones 6.21 a 6.23 se aplican como tales, sin ninguna modificación.
- O la duración de la fase de calentamiento del fuego calculada a partir del primer término de la ecuación,  $0,2 \times 10^{-3} q_{t,d} / O$ , es inferior al tiempo límite elegido  $t_{\lim}$ . En este caso, las ecuaciones 6.11 a 6.14 se aplican con un factor de abertura modificado,  $O_{\lim}$ , calculado como aquel que conduce al tiempo límite elegido a partir de la siguiente ecuación:

$$O_{\lim} = 0,1 \times 10^{-3} q_{t,d} / t_{\lim} \quad (6.16)$$

Las ecuaciones 6.15 y 6.16 se modifican de la siguiente forma:

$$t_{\lim}^* = G_{\lim} t \quad (6.17)$$

$$G_{\lim} = \frac{(O_{\lim}/0,04)^2}{(b/1.160)^2} \quad (6.18)$$

y  $t_{\lim}^*$  se utiliza en la ecuación 6.11 en lugar de  $t^*$ .

Por último, para considerar el efecto de la ventilación durante la fase de calentamiento, en el caso de  $t_d = t_{\lim}$ :

Si  $O > 0,04$  y  $q_{t,d} < 75$  y  $b < 1.160$

$$\text{entonces } k = 1 + \left( \frac{O - 0,04}{0,04} \right) \left( \frac{q_{t,d} - 75}{75} \right) \left( \frac{1.160 - b}{1.160} \right) \quad (6.19)$$

$$y \quad \Gamma_{\text{lim}} = k \frac{(O_{\text{lim}}/0,04)^2}{(b/1.160)^2} \quad (6.20)$$

La curva de temperatura-tiempo durante la fase de enfriamiento viene dada por:

$$\Theta_g = \Theta_{\text{max}} - 625(t - t_{\text{max}}^* \cdot x) \quad \text{para} \quad t_d^* \leq 0,5 \quad (6.21)$$

$$\Theta_g = \Theta_{\text{max}} - 250(3 - t_{\text{max}}^*)(t - t_{\text{max}}^* \cdot x) \quad \text{para} \quad 0,5 \leq t_d^* \leq 2,0 \quad (6.22)$$

$$\Theta_g = \Theta_{\text{max}} - 250(t - t_{\text{max}}^* \cdot x) \quad \text{para} \quad 2,0 \leq t_d^* \quad (6.23)$$

con  $q_{\text{max}}$  como la temperatura máxima al final de la fase de calentamiento, dada por 6.11 donde  $t = t_d$  dada por 6.15.

$$t_{\text{max}}^* = (0,2 \times 10^{-3} q_{t,d} / O) \cdot \Gamma$$

$$x = 1 \quad \text{para} \quad t_{\text{max}} > t_{\text{lim}}$$

$$x = \frac{t_{\text{lim}} \cdot \Gamma}{t_{\text{max}}^*} \quad \text{para} \quad t_{\text{max}} = t_{\text{lim}}$$

Un ejemplo de resultados (carga de fuego  $q_{t,d} = 180 \text{ MJ/m}^2$ ,  $b = 1.160 \text{ J/m}^2\text{s}^{1/2}\text{K}$ , factor de abertura  $O$  desde  $0,04 \text{ m}^{1/2}$  hasta  $0,20 \text{ m}^{1/2}$ ) se muestra en la Figura 6.8.

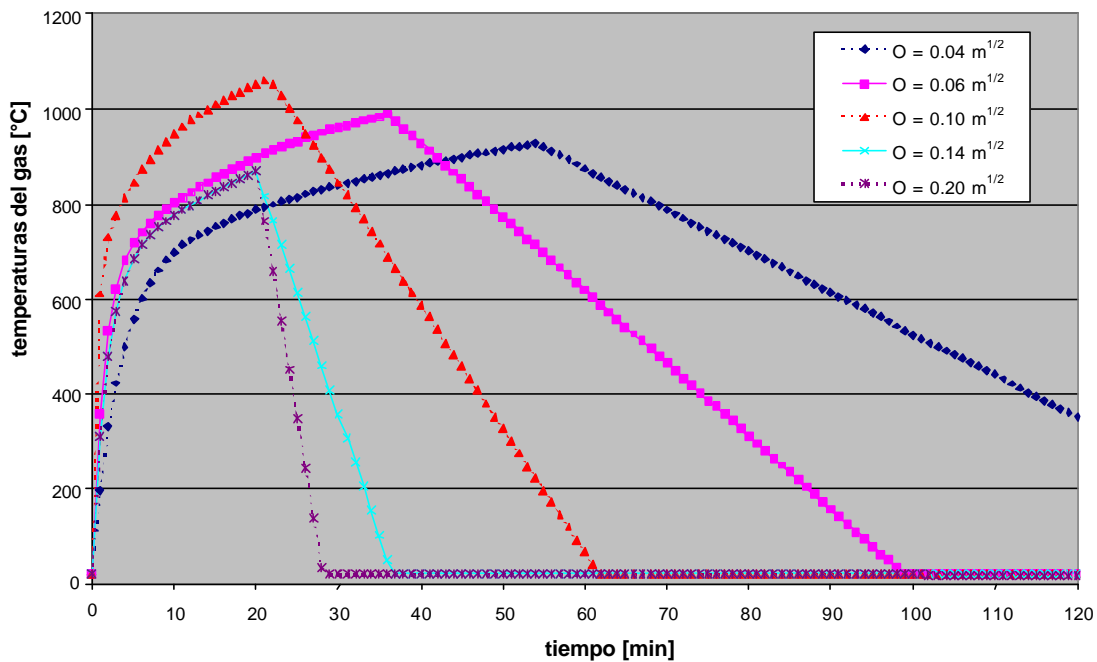


Figura 6.8. Ejemplo de fuegos paramétricos [1]

Con el fuego paramétrico, se ha realizado la comparación entre los resultados de los ensayos [12] y los resultados de las predicciones mejoradas. La figura 6.9 representa la temperatura máxima en el gas. El coeficiente de correlación, que alcanzaba el valor de 0,19 con las fórmulas de la ENV 1991-2-2 [23], tiene ahora un valor de 0,83.

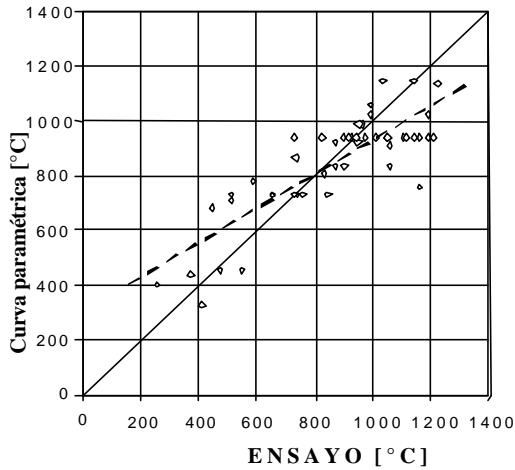


Figura 6.9. Temperatura máxima del gas en el recinto

### 6.2.2 Modelos de zona

Los modelos de zona ya han sido presentados en el capítulo 6.1.1, donde se realizó una breve descripción de un modelo de dos zonas. El campo de aplicación de un modelo de dos zonas es la fase de pre flash-over del fuego. Para un fuego totalmente desarrollado, debe utilizarse un modelo de una zona.

### 6.2.3 Modelo de una zona

El modelo de una zona se basa en la hipótesis fundamental de que, durante el fuego, la temperatura del gas es uniforme en el recinto. Los modelos de una zona son válidos para condiciones de post flash-over. Los datos deben ser suministrados con un mayor grado de detalle que para las curvas paramétricas y son los mismos que los requeridos por el modelo de dos zonas.

La figura 6.10 muestra como se realiza el modelo de un fuego totalmente desarrollado, con una representación de distintas condiciones de equilibrio de materia y energía.

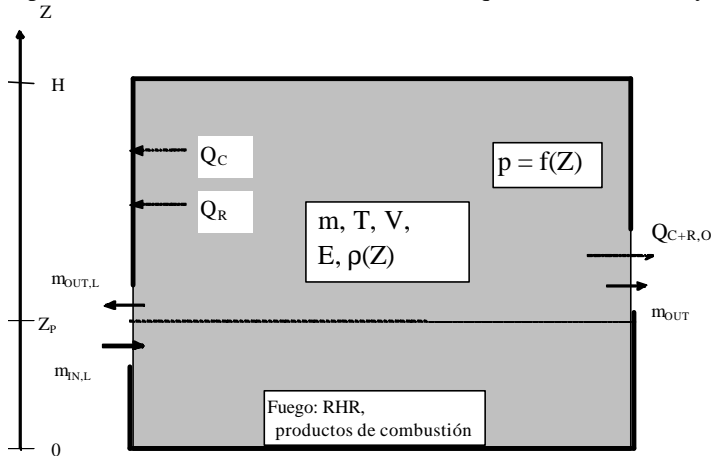


Figura 6.10. Recinto en un modelo de una zona

En el ámbito de los proyectos CECA, NFSC 1 y 2 [11, 12], el modelo de dos zonas Ozone ha sido desarrollado en la Universidad de Lieja, junto con PROFILARBED-Research, y ha sido validado, tomando como referencia los resultados de 54 ensayos experimentales. La figura 6.11 muestra una comparación de la temperatura máxima del gas como resultado de la medición en los ensayos y de los cálculos realizados con el modelo. Cada uno de los puntos representa un ensayo y la línea continua oblicua es la situación de los puntos, que coinciden perfectamente. La línea de puntos representa la regresión lineal entre todos los puntos.

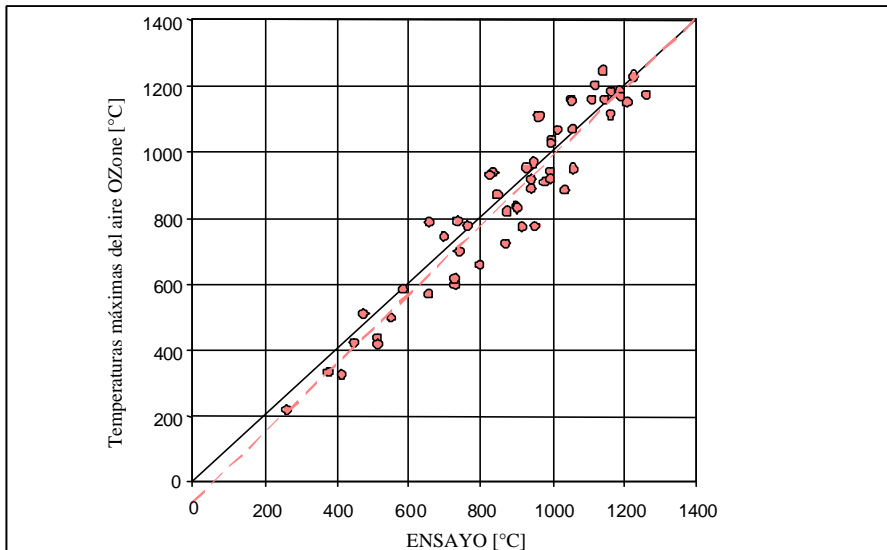


Figura 6.11. Temperatura máxima del gas en el recinto

En la Figura 6.12 se representa otra comparación. Para cada ensayo, se computó la evolución de la temperatura en una sección de acero típica sin protección – HEB 200,  $A_m/V = 147 \text{ m}^{-1}$  – sometida primero a la temperatura del gas registrada y después a la temperatura del gas computada. Esto permitió dibujar el gráfico donde cada ensayo aparece representado por la temperatura máxima en la sección de acero sin protección.

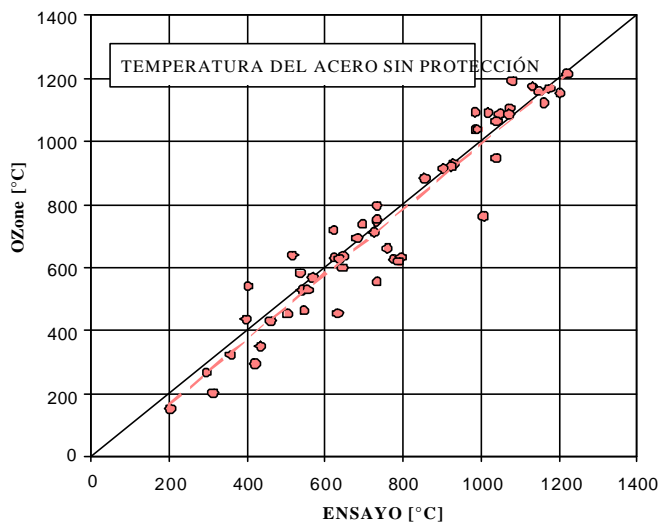


Figura 6.12. Temperatura máxima en la sección de acero sin protección

### 6.3 Combinación de los modelos de una y dos zonas. Elección del modelo

Tras haber definido las características del fuego, es decir, la curva RHR, la geometría del recinto y las características de las paredes, es necesario elegir el modelo de fuego natural a aplicar de acuerdo con el escenario considerado. Dicha elección se realizará de acuerdo con el dominio de aplicación de los modelos.

Para ello, se considera que la primera aplicación debe ser una aplicación de un “modelo de dos zonas”. La cuestión es cómo y cuándo tiene lugar la transición de la aplicación del “modelo de dos zonas” a la aplicación del “modelo de una zona”.

Los resultados de un “modelo de dos zonas” se suministran en forma de dos variables principales:

- la temperatura de la zona superior  $T_u$ ;
- la altura del interface de las dos zonas  $H_i$

Estas dos variables condicionarán la simulación con el modelo de zona (véase la figura 6.15). Las siguientes cuatro condiciones pueden limitar la aplicación de un “modelo de dos zonas”:

- condición 1 (C1):  $T_u > 500^\circ\text{C}$   
la alta temperatura de los productos de combustión (superior a  $500^\circ\text{C}$ ) conduce a un flash-over mediante el flujo de radiación a las otras cargas de fuego del recinto;
- condición 2 (C2):  $H_i < H_q$  y  $T_u > T_{\text{ignición}}$   
el descenso de la altura de interface ( $H_i$ ) es tal que el material combustible se encuentra en la capa de humo (altura máxima con combustible  $H_q$ ), y si la capa de humo posee una temperatura elevada (superior a  $T_{\text{ignición}}$  que se considera  $300^\circ\text{C}$ ), da lugar a la propagación del fuego por todo el recinto mediante la ignición del combustible;
- condición 3 (C3):  $H_i < 0,1 H$   
la altura del interface desciende y da lugar a un espesor muy reducido de la capa inferior, que no resulta representativo de un fenómeno de dos zonas;
- condición 4 (C4):  $A_{fi} > 0,5 A_f$   
el área de fuego es demasiado grande, comparada con el área del suelo del recinto, para considerar un fuego localizado.

De hecho, las condiciones 1 o 2 dan lugar además a una modificación de la velocidad de generación de calor inicial (simulación con un modelo de dos zonas), para una simulación con un modelo de una zona. Esta modificación se lleva a cabo como se indica en la figura 6.13.

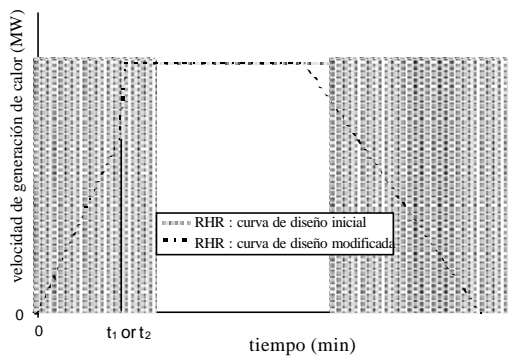


Figura 6.13. Curvas de diseño de la velocidad de generación de calor del fuego

El método anterior aparece representado en el esquema de la figura 6.14. En dicho esquema se muestran las condiciones en las que deben determinarse las curvas de temperatura de diseño (modelos de una o de dos zonas).

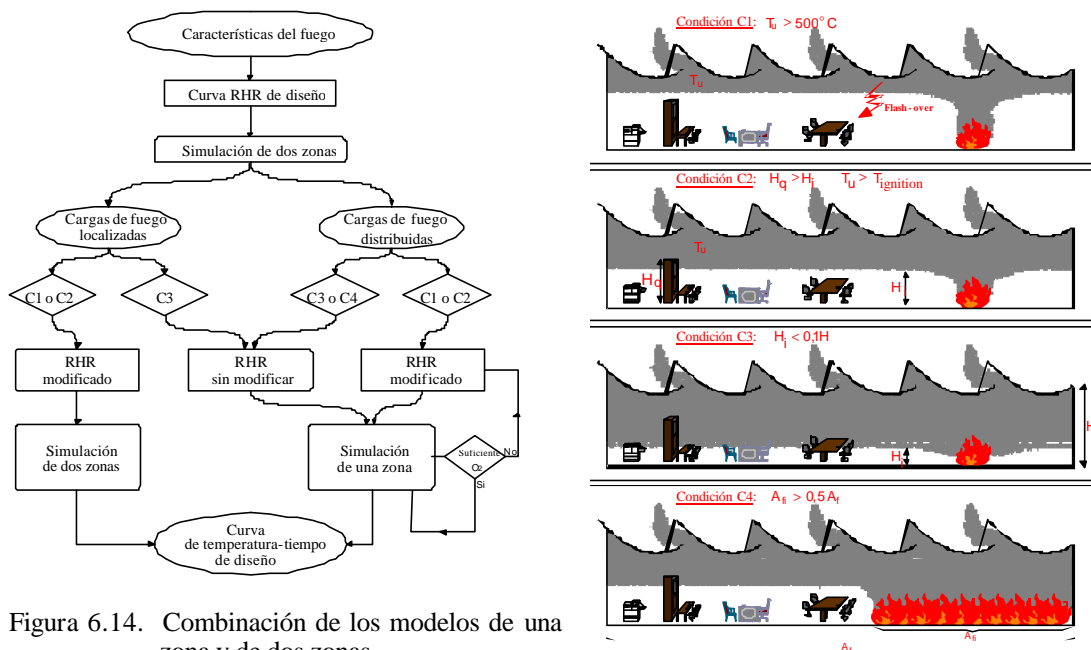


Figura 6.14. Combinación de los modelos de una zona y de dos zonas

## 7 ACCIONES MECÁNICAS SEGÚN LOS EUROCÓDIGOS

En situación de fuego, las cargas aplicadas a las estructuras pueden obtenerse de acuerdo con la siguiente fórmula (véase la relación 6.11b de la EN1990):

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + (\Psi_{1,1} \text{ or } \Psi_{2,1}) Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} \Psi_{2,i} Q_{k,i}$$

donde:

$G_{k,j}$ : valores característicos de las acciones permanentes

$Q_{k,1}$ : acción variable principal característica

$Q_{k,i}$ : valores característicos de las acciones variables secundarias

$\Psi_{1,1}$ : factor del valor frecuente de una acción variable

$\Psi_{2,i}$ : factor de los valores casi-permanentes de las acciones variables

Los valores recomendados de  $\Psi_1$  y  $\Psi_2$  se suministran en la tabla A1.1 de la EN1990 pero podrían ser modificados en el Anexo Nacional.

**Tabla 7.1 – Valores recomendados de los factores  $\Psi$  para edificios**

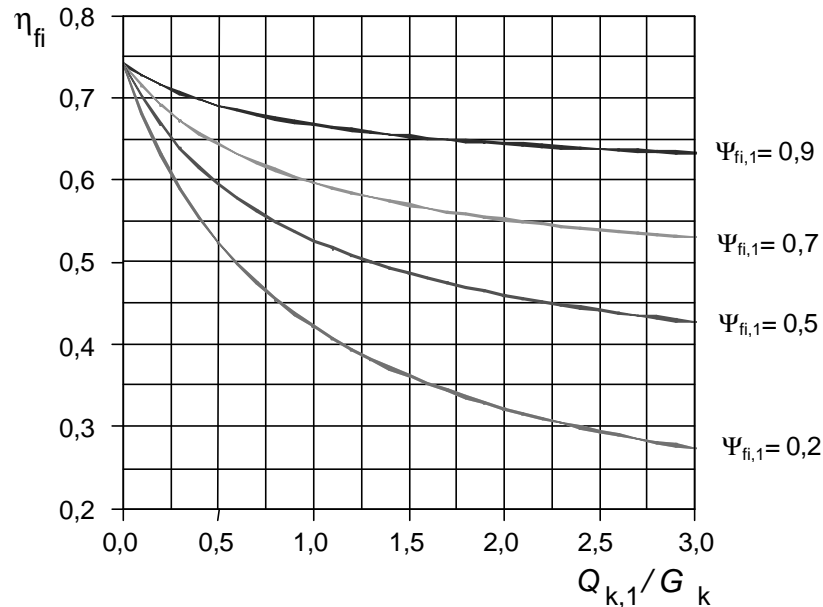
Acción	$\Psi_0$	$\Psi_1$	$\Psi_2$
Cargas impuestas en edificios, categoría (véase la EN 1991-1.1)			
Categoría A : zonas residenciales, viviendas	0,7	0,5	0,3
Categoría B : zonas de oficinas	0,7	0,5	0,3
Categoría C : zonas de reunión	0,7	0,7	0,6
Categoría D : zonas comerciales	0,7	0,7	0,6
Categoría E : zonas de almacenaje	1,0	0,9	0,8
Categoría F : zonas de tráfico, peso de vehículos = 30 kN	0,7	0,7	0,6
Categoría G : zonas de tráfico, 30 kN < peso de vehículos = 160 kN	0,7	0,5	0,3
Categoría H : cubiertas	0	0	0
Cargas de nieve en edificios (véase la EN1991-1.3)			
Finlandia, Islandia, Noruega, Suecia	0,70	0,50	0,20
Resto de Estados Miembro del CEN, para lugares situados a una altitud $H > 1000$ m a.s.l.	0,70	0,50	0,20
Resto de Estados Miembro del CEN, para lugares situados a una altitud $H = 1000$ m a.s.l.	0,50	0,20	0
Cargas de viento sobre edificios (véase la EN1991-1.4)	0,6	0,2	0
Temperatura (sin fuego) en edificios (véase la EN 1991-1.5)	0,6	0,5	0

Otra notación importante muy empleada en los métodos de diseño de fuego de los Eurocódigos es el nivel de carga para la situación de fuego  $\eta_{fi,t}$  que se define como  $\eta_{fi,t} = \frac{E_{d,fi}}{E_d}$  con  $E_d$  y  $E_{d,fi}$  como el efecto de cálculo de las acciones en el diseño a temperatura ambiente y el efecto de cálculo de las acciones para la situación de fuego, respectivamente. Puede determinarse alternativamente con:

$$\eta_{fi,t} = \frac{G_k + \Psi_{fi,1} Q_{k,1}}{\gamma_G G_k + \gamma_{Q,1} Q_{k,1}}$$

donde  $\gamma_{Q,1}$  es el factor parcial de la acción variable principal 1.

De hecho, el nivel de carga  $\eta_{fi}$  depende en gran medida del factor  $\psi_{fi,1}$ , que varía en función de la categoría del edificio. En el prEN1993-1-2 (apartado de fuego en estructuras de acero) y el prEN1994-1-2 (apartado de fuego en estructuras mixtas), se incluye la siguiente figura (figura 4) para mostrar con claridad la influencia, tanto de la relación de carga  $Q_{k,1}/G_k$  como del factor  $\psi_{fi,1}$  del nivel de carga.



**Figura 7.1 – Variación del factor de reducción  $h_{fi}$  con la relación de carga  $Q_{k,1}/G_k$**

## 8 CONCLUSIÓN

En este paquete de trabajo hemos visto los distintos modelos disponibles para el cálculo de la temperatura en el interior de un recinto en función del tiempo, así como los datos que se necesitan. Para saber la temperatura de los elementos estructurales en función del tiempo se necesita calcular el flujo de calor hacia dichos elementos.

La transferencia de los calores de convección y de radiación tiene lugar entre los gases calientes, la llama, los cerramientos y el elemento estructural. Los coeficientes de emisividad y convección gobiernan la transferencia de calor.

El calentamiento de un elemento estructural depende del tipo de elemento (por ejemplo, de acero o mixto de acero y hormigón) y de la naturaleza y grado de protección contra el fuego. Este es el tema del segundo paquete de trabajo.

Conociendo el campo de temperatura en la estructura y la combinación accidental de cargas, puede determinarse su comportamiento termo-mecánico. Este es el tema del paquete de trabajo tercero.

## 9 REFERENCIAS

- [1] CEN; EN 1991-1-2, Eurocódigo 1 – Acciones sobre estructuras, Parte 1.2 – Acciones sobre estructuras expuestas al fuego. CEN Central Secretariat, Bruselas, Noviembre 2002.
- [2] BSI 96/540493 'Uso de la Ingeniería de Seguridad contra Incendio en Edificios' (Draft 27 marzo 1996)
- [3] Fuegos Iniciales: Universidad de Lund, Suecia. Instituto de Ingeniería de Seguridad contra Incendio. ISSN 1102-8246. ISRN LUTVDG/TVBB--3070--SE. Abril 1993.
- [4] ARGOS Theory Manuel (borrador 5)-Instituto Danés de Tecnología del Fuego - 22/07/92
- [5] Peacock, Jones, Bukowski y Forney. Manual NIST 146, Volumen II – Guía Técnica de Referencia para el Método de Análisis de Riesgos – Riesgo de Incendio I - Versión 1 - Junio 1991

- [6] Babrauskas Vytenis: "Burning Rates" Sección 3/Capítulo 1: El Manual SFPE de Ingeniería de Protección contra el Fuego – 2ª edición – 13 de abril de 1995
- [7] Informes de Obras y Comité NKB 1994:07E: "Rendimiento y Requisitos para la Seguridad contra el Fuego y Guía Técnica para la Verificación a través del Cálculo"; Comité Nórdico de Normativas sobre Edificios.
- [8] "Desarrollo de normas de diseño para estructuras de acero sometidas a fuegos naturales en Recintos de Grandes Dimensiones"; Informe final del acuerdo CEC 7210/ SA210, 317,517,618,832 – Febrero 1997.
- [9] Schleich J-B., Cajot L-G., y otros: "Desarrollo de normas de diseño para estructuras de acero sometidas a fuegos naturales en Aparcamientos Cerrados" Estudio CECA 7210-SA/211/318/518/620/933; 1993-1996; Informe final 1999 – EUR 18867 EN
- [10] CEN; prEN1990, Eurocódigo – Bases de Diseño Estructural, 2001.
- [11] Schleich J-B., Cajot L-G., y otros: "Edificios de acero competitivos a través del concepto de seguridad ante fuego natural". Estudio CECA 7210-SA/125,126,213,214,323,423,522,623,839,937, 1994-98; Informe final 2002 – EUR 20360 EN.
- [12] Schleich J-B., Cajot L-G., y otros: "Concepto de seguridad ante fuego natural – Full scale tests, cumplimiento en los Eurocódigos y desarrollo de una herramienta de diseño de fácil manejo". Estudio CECA 7210-060, 1997-2000; Informe Final 2003 - EUR 20580 EN..
- [13] Schleich J-B., Cajot L-G., y otros: "Proyecto de Valorización – Concepto de Seguridad ante Fuego Natural". Estudio CECA 7215-PA/PB/PC –042-057, D-E-F-I-NL-UK & ECCS, 1999-2001.
- [14] DD 0000 Uso de la Ingeniería de Seguridad contra Incendio en Edificios. Borrador para la aprobación de su Publicación; 27. Marzo 96, Comité Técnico de FSH / 24. 96/540493.
- [15] Fontana M.: "Resistencia al Fuego Requerida por los Elementos de Construcción" – Parte A: Carga de Fuego en Edificios, Función Probabilista de Densidad - , NFSC WG4, Zürich, marzo 1996.
- [16] Documentos fundamentales del Eurocódigo 1 (ENV 1991) Parte 1: Bases de Diseño, Documento de Trabajo N° 94 de la ECCS, marzo 1996.
- [17] Hasemi Y. y Tokunaga Tazo: "Efectos de la Geometría de la Llama sobre las Plumas Boyantes de las Llamas de Difusión Turbulenta". Ciencia y Tecnología del Fuego, Vol.4, N°1, 1984.  
Ptchelintsev A., Hasemi Y., Nikolaenko M., "Análisis Numérico de Estructuras Expuestas a un Fuego Localizado", ASIAFLAM's 95, Hong Kong, 1995.  
Wakamatsu T., Hasemi Y., Yokobayashi Y., Ptchelintsev A.: "Estudio Experimental del Mecanismo de Calentamiento de una Viga de Acero bajo Techo expuesta a un Fuego Localizado".  
Hasemi Y., Yokobayashi Y., Wakamatsu T., Ptchelintsev A.: "Seguridad contra el Fuego de Elementos de Construcción Expuestos a un Fuego Localizado" – Dominio y Experimentos con Sistemas Techo/Viga Expuestos a un Fuego Localizado, ASIAFLAM's 95, Hong Kong, 1995.
- [18] Hietaniemi J: "Requerimientos de Resistencia al Fuego en Base al Riesgo", Estudio CECA 7210-PR-251, 2000-2003
- [19] Kumar S., Welch S., "Concepto de Seguridad contra Fuegos Naturales – Desarrollo de una metodología de Ingeniería basada en el CFD para la evaluación de las acciones térmicas sobre el acero y las estructuras mixtas" 7210-PR184, 1999-2002
- [20] iABSE Colloquium: Bases de Diseño y Acciones sobre Estructuras; Fundamentos y aplicaciones del EC 1; Delft 1996
- [21] Evaluación del Riesgo de Incendio", Método de Cálculo, Agrupación Suiza de Ingenieros y Arquitectos, documento n° 81, 1984.
- [22] Thomas P.H.: "Design Guide Structural Fire Safety", Workshop CIB W14, February 1995.
- [23] CEN; ENV1991-2-2, Eurocódigo 1 – Bases de diseño y acciones sobre estructuras – Parte 2-2: Acciones sobre estructuras – Acciones sobre estructuras expuestas al fuego, 1995.
- [24] Cajot L-G, Haller M., y otros: "Cuantificación Probabilística de una Estructura de Acero destacando el potencial del acero frente a otros materiales" Estudio CECA 7210-PA/PB/PC/PD-249, 2000-2003