

# Comportamiento al fuego de los materiales y elementos constructivos



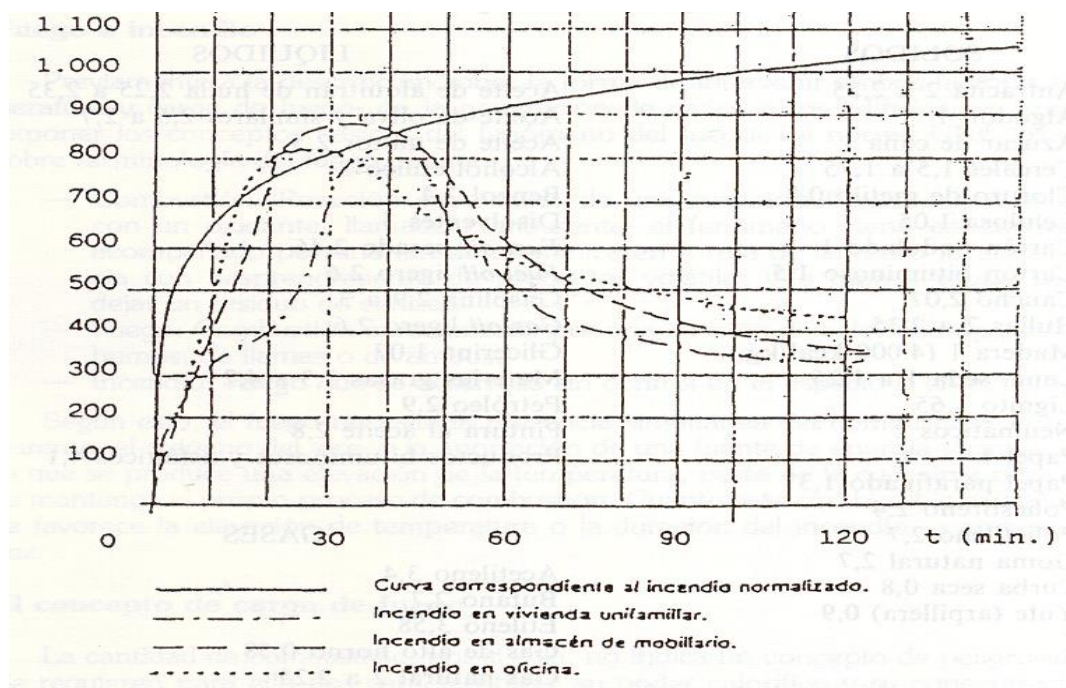


## Comportamiento de las estructuras ante el fuego

1. Conceptos previos.....	2
2. Estructuras de madera .....	3
3. Estructuras de muros .....	4
4. Estructuras metálicas .....	5
5. Estructuras de hormigón .....	7
5.1 Hormigón armado.....	8
5.2 Hormigón pretensado y postensado .....	9
5.3 Prefabricados de hormigón .....	10
5.3.1 Estructuras portantes .....	11
5.3.2 Forjados de losa alveolar .....	12
5.3.3 Paneles de fachada .....	13
Referencias .....	14

## 1. Conceptos previos

Para el estudio del comportamiento ante el fuego de materiales y elementos constructivos, se ensayan en laboratorio sus características (reacción, estabilidad, resistencia al fuego...) utilizando siempre unas condiciones normalizadas idénticas (difieren de las producidas en un incendio real). Son las condiciones que siguen la “*curva de incendio normalizado*”, que representa el incremento de temperatura en **función del tiempo**.



Los elementos expuestos al fuego pueden: arder, alterarse químicamente, o debilitarse. Como norma general, serán cinco las características que determinarán como se va a comportar un elemento estructural ante un incendio:

<b>Combustibilidad</b>	Si la estructura es capaz de arder, aumentará la carga de fuego total del siniestro
<b>Coefficiente de dilatación</b>	Un material que dilate mucho producirá esfuerzos en otras partes de la estructura, aunque no estén afectadas por el fuego
<b>Conductividad térmica</b>	Si el material conduce bien el calor, el calor se redistribuye, afectando a mayor cantidad de estructura; además, puede producir focos alejados del origen (propagación por conducción)
<b>Masa</b>	Cuanto más pesado sea un elemento, mayor cantidad de calor será necesario para aumentar su temperatura, y por tanto influir en su comportamiento
<b>Superficie expuesta</b>	Cuanto más superficie tenga expuesta al fuego, y más pequeño su espesor, mayor exposición real a los efectos del calor

## 2. Estructuras de madera



<b>Combustibilidad</b>	La madera es un material combustible. Por tanto, al arder, aporta mayor carga térmica al incendio
<b>Coefficiente de dilatación</b>	Dilata muy poco, por lo que el calor del incendio no aumentará la longitud de los elementos de madera, por lo que no se producirán esfuerzos en lugares alejados del foco de calor
<b>Conductividad térmica</b>	Conduce muy mal el calor, por lo que un elemento de madera expuesto al incendio sufrirá un incremento de la temperatura tan sólo en la parte afectada
<b>Masa</b>	Los elementos de madera son ligeros; no requieren gran cantidad de calor para aumentar su temperatura (aunque la necesidad de evaporar la humedad natural absorbe mucho calor antes de aumentar la temperatura)
<b>Superficie expuesta</b>	Suelen tener secciones simplemente rectangulares, por lo que la cantidad de superficie expuesta es relativamente pequeña

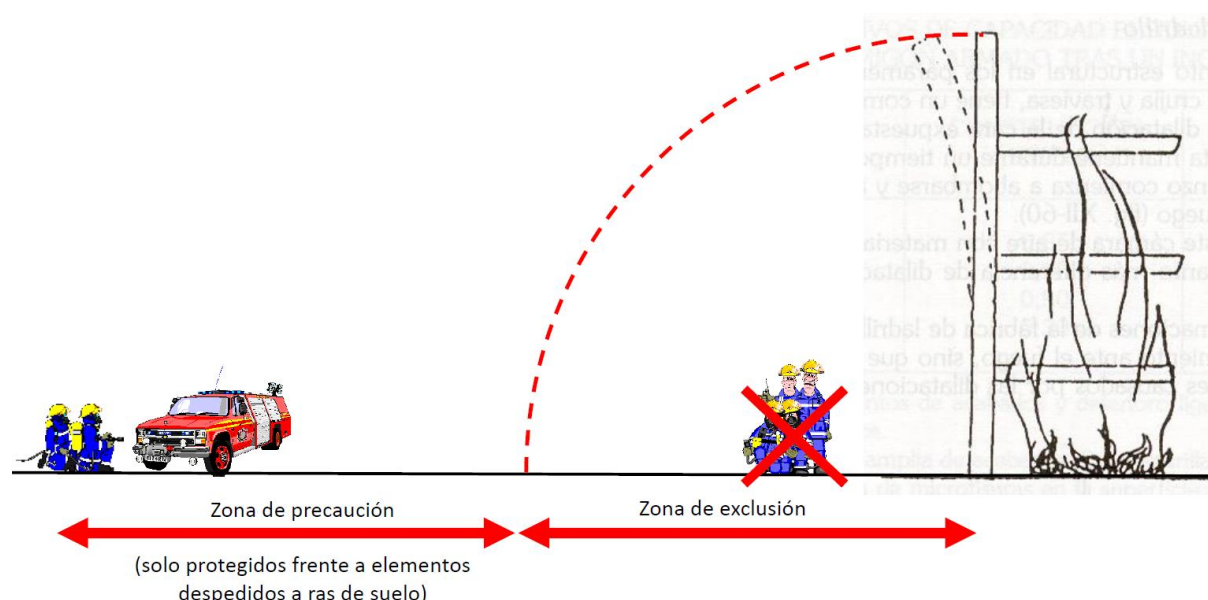
El fuego ataca el elemento de madera, haciéndolo arder en capas concéntricas, de fuera hacia adentro. La parte carbonizada no tiene resistencia alguna, aunque constituye un elemento protector (actúa como aislante frente a la temperatura exterior). La madera sana (la no quemada) no sufre alteraciones sustanciales (incluso se endurece con el aumento de temperatura). Sin embargo, a medida que se carboniza la pieza, la sección útil de la misma va siendo menor, por lo que llega un momento en que la cantidad de material es insuficiente para soportar los esfuerzos. Las estructuras de madera, por tanto, colapsan por pérdida de la sección resistente.

La protección contra el fuego de los elementos de madera se realiza a base de recubrimientos, en forma de barnices intumescentes, que realmente actúan como retardadores; las secciones se calculan por el método de madera perdida, en función del tiempo de resistencia deseado.

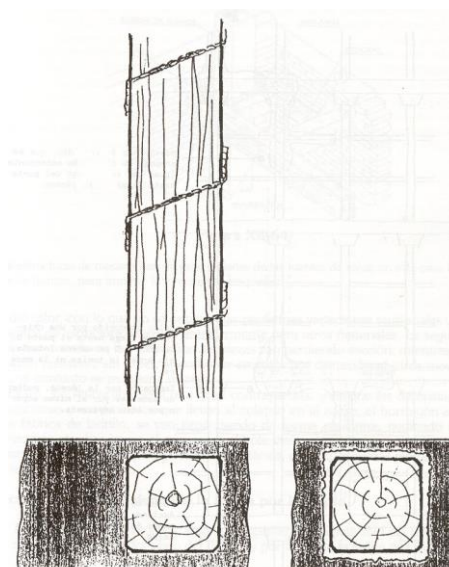
### 3. Estructuras de muros

Son elementos de gran masa (tienen, por lo tanto, gran inercia térmica, y necesitan mucho calor para aumentar su temperatura). Están realizados, además, de materiales incombustibles, por lo que su comportamiento general ante el fuego es bastante bueno.

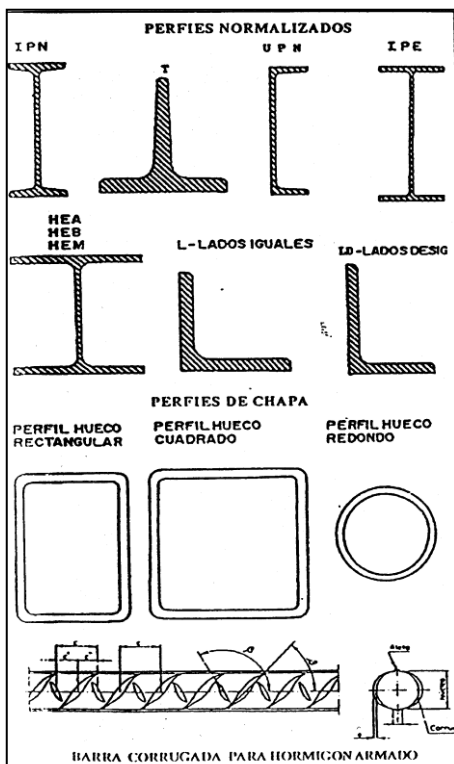
Cuando se ven expuestos a cargas de fuego elevadas, pueden sufrir caídas por desplome al lado exterior del incendio (debido a la diferente dilatación de cada una de sus dos caras), hecho que habrá que tener muy en cuenta cuando nos posicionemos en la cara fría para enfriar o realizar cualquier otra labor. Se impone siempre el balizado del entorno, **manteniendo una zona de exclusión** (peligro elevado) igual a la altura del muro, y una **zona de precaución** de igual anchura, en la que podremos permanecer siempre que nos encontremos protegidos de cascotes y material que pueda salir despedido a ras de suelo, tras el desplome el muro.



Los muros de entramado suponen un caso especial, pues al tener en su interior un armazón de madera, pueden suponer un motivo de propagación del incendio (los elementos de madera pueden contraerse por pérdida de humedad, y dejar entre ellos y los materiales de relleno un espacio por el que circula el aire y el calor).



## 4. Estructuras metálicas

<b>Combustibilidad</b>	El acero es un material no combustible. Por tanto, al no arder, no aporta mayor carga térmica al incendio
<b>Coefficiente de dilatación</b>	Dilata mucho por lo que el calor del incendio hará aumentar la longitud de los elementos de acero; éste aumento de tamaño producirá esfuerzos en toda la estructura
<b>Conductividad térmica</b>	Conduce muy bien el calor, por lo que un elemento de acero expuesto al incendio va a sufrir un incremento de la temperatura en todo él (no solamente en la parte expuesta), pudiendo propagar el incendio a lugares alejados del foco inicial (si tenemos materiales inflamables en contacto con alguna parte metálica de la estructura)
<b>Masa</b>	Los elementos de acero son, bastante ligeros (hablamos de ligero en comparación con otros elementos como el hormigón armado -unas 10 veces más peso para unas resistencias similares-)
<b>Superficie expuesta</b>	<p>Suelen tener una gran cantidad de superficie expuesta (los elementos de acero no son de sección simplemente rectangular, sino que tienen secciones que se adaptan a las necesidades resistentes); además suelen tener espesores pequeños. Por tanto, toda la masa de acero aumenta de temperatura con una gran facilidad.</p> 





El acero pierde resistencia con el aumento de temperatura (a partir de unos 350°C). Aunque toda estructura se calcula con unos márgenes de seguridad, las de acero los han superado a 500°C (a esa temperatura la resistencia del acero es el 50% de la inicial, y ha entrado en estado plástico). El acero puede alcanzar esa temperatura a los 20 minutos del comienzo del siniestro.

El acero sometido a esos esfuerzos y temperatura se pliega (no se rompe).



La **protección de los elementos de acero ante el fuego** es su “forrado” con elementos que lo aíslen del foco de calor; trasdosados de yeso o escayola, cajeados de ladrillo, morteros aislantes proyectados...

Los **daños más habituales** por incendio en estructuras de acero son:

- propagación del incendio por conducción y contacto
- empuje (por dilatación de los elementos horizontales)
  - en la cabeza de pilares; esto produce un arqueo y precipita el fenómeno de pandeo, provocando el colapso del elemento
  - en la cabeza de muros (puede volcarlos por desplome)
- pérdida de apoyo de cerchas, y consecuente caída

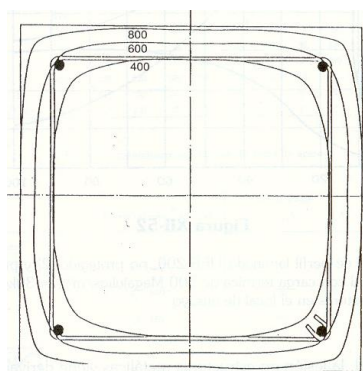
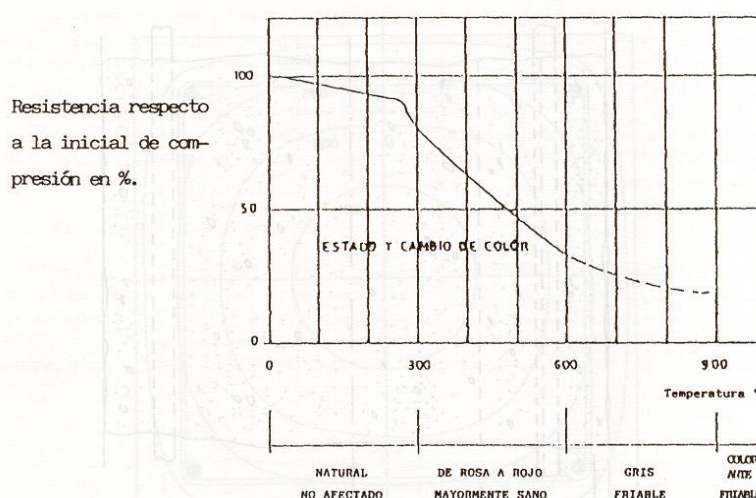
¡¡¡Atención al enfriamiento de las estructuras de acero!!! Si bien el mayor peligro de colapso se produce durante el siniestro por el aumento de temperatura, **su posterior enfriamiento puede producir daños que también produzcan el colapso, por lo que los equipos deberán prever esta circunstancia, y posicionarse fuera del alcance de caída de elementos.**

## 5. Estructuras de hormigón

<b>Combustibilidad</b>	El hormigón es un material no combustible. Por tanto, al no arder, no aporta mayor carga térmica al incendio
<b>Coefficiente de dilatación</b>	Dilata muy poco (es un material pétreo) por lo que el calor del incendio no aumentará la longitud de los elementos de hormigón, por lo que no se producirán esfuerzos en lugares alejados del foco de calor
<b>Conductividad térmica</b>	Conduce muy mal el calor, por lo que un elemento de hormigón expuesto al incendio sufrirá un incremento de la temperatura tan sólo en la parte afectada
<b>Masa</b>	Los elementos de hormigón son pesados, por lo que requieren gran cantidad de calor para aumentar su temperatura
<b>Superficie expuesta</b>	Suelen tener secciones simplemente rectangulares, por lo que la cantidad de superficie expuesta es relativamente pequeña

El hormigón pierde resistencia con el aumento de temperatura, de forma parecida al acero (es significativo a partir de 300°C, y a 500°C su resistencia es el 50% de la inicial, habiendo superado los márgenes de seguridad de cálculo).

Como curiosidad, la pérdida de resistencia se acompaña de un cambio de color en la masa del hormigón (cuadro adjunto).



La diferencia con el acero es el tiempo necesario para que la masa de hormigón alcance esas temperaturas. En un elemento de hormigón, debido a su gran masa, poca superficie, y escasa conductividad, los tiempos se multiplican.

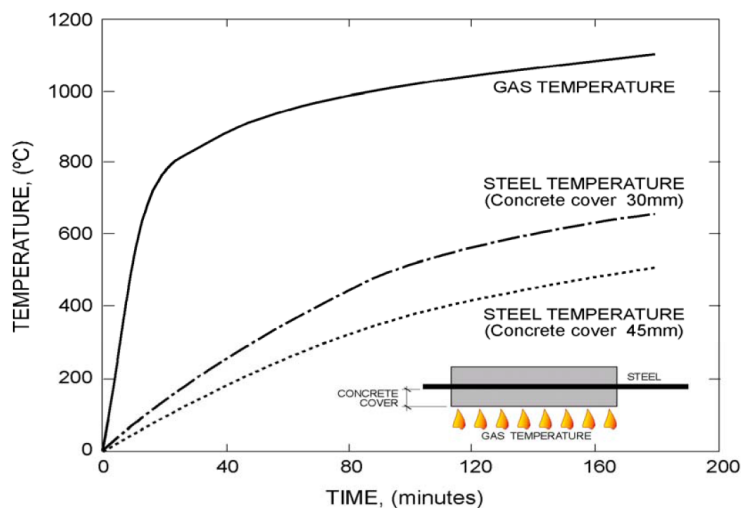
En cualquier caso, las estructuras de construcción no son de hormigón en masa, sino de hormigón armado, por lo que no es posible estudiar el comportamiento ante el fuego de una estructura de hormigón armado, teniendo sólo en cuenta el hormigón.



## 5.1 Hormigón armado

Es un material compuesto (hormigón + acero). Cuando es sometido a fuego, el recubrimiento (espesor de hormigón que se encuentra entre la superficie y la armadura) protege la ferralla, retrasando la llegada de calor a la misma, y actuando por tanto como un aislante.

En el diagrama adjunto se aprecia la temperatura de las barras de acero recubiertas de hormigón (3cm y 4,5cm), expuesto a la curva de fuego normalizado.

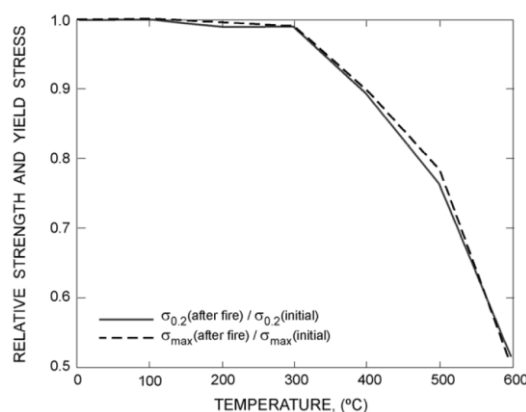


Las estructuras de hormigón armado colapsan ante fuego cuando lo hace su parte metálica, por lo que podemos considerar el hormigón como un elemento protector. Durante el proceso de incendio, la capa de recubrimiento sufre tensiones por calor, que acaban resquebrajándola (*“spalling”*) y haciéndola caer. Cuando ese recubrimiento se pierde, las armaduras de acero (muy delgadas) quedan sin defensa ante las llamas; es en ese momento cuando el fuego actúa directamente contra ellas, comportándose como cualquier estructura metálica. El colapso se produce de forma brusca, sin avisar (las grietas que aparecen en la superficie del hormigón antes del colapso no pueden detectarse durante el siniestro por estar ocultas por el humo)



La protección de los elementos de hormigón armado ante el fuego es su *“forrado”* con elementos que lo aislen del foco de calor; trasdosados de yeso o escayola, cajeados de ladrillo, morteros aislantes proyectados..., aunque lo más eficaz es tener en cuenta esta necesidad durante el momento de la construcción, y aumentar el espesor del recubrimiento de hormigón.

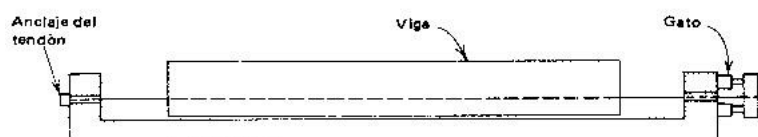
Como curiosidad, sobre el comportamiento de la armadura de hormigón tras el incendio, hay que hacer notar que, en función de la temperatura alcanzada, sus características residuales varían, perdiendo un % importante de su capacidad de carga y límite elástico después del incendio, según se muestra en el diagrama.



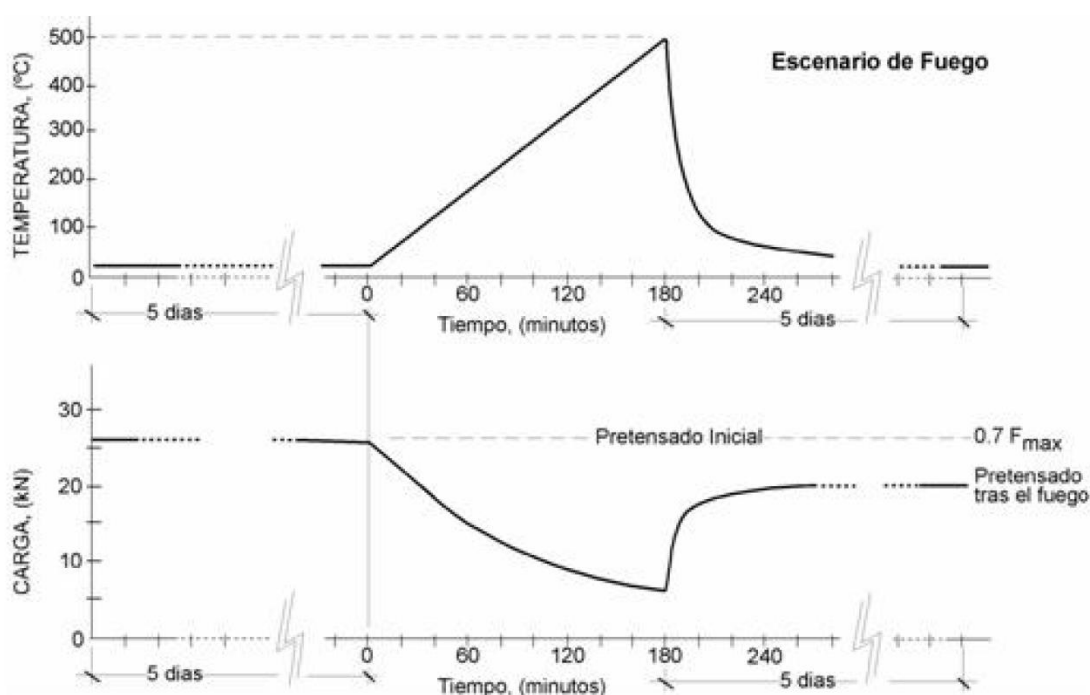
## 5.2 Hormigón pretensado y postensado

Se utilizan para mejorar las prestaciones del hormigón armado:

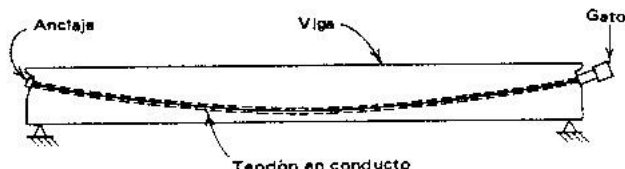
- **Hormigón pretensado.** Los elementos son prefabricados en taller:
  - Primero se tensa el acero
  - Después se vierte el hormigón, y se espera a su fraguado
  - Finalmente se libera la tensión del acero, para que este se comprima y provoque en el hormigón unos esfuerzos contrarios a los que tendrá el elemento estructural cuando entre en carga en su posición definitiva. La transferencia de esfuerzos se produce por adherencia; el problema ante los incendios radica en que precisamente esa adherencia es la que se pierde por la acción de la temperatura, con lo que a partir de ese momento pierde la “mejora” que suponía el pretensado.



En relación a los elementos pretensados, es bueno conocer que su comportamiento durante el incendio difiere del hormigón armado ordinario, pues la tensión que produce al elemento en condiciones normales, se pierde durante el incendio por dilatación de la armadura (se “relaja”, y por tanto no comprime). Además, después del incendio, y una vez frío el elemento, habrá perdido hasta un 20% de la carga de pretensado inicial



- **Hormigón postensado.** Se utiliza en obra civil, normalmente para elementos de grandes luces. Se dejan unas vainas huecas antes de verter el hormigón, de tal manera que tras el fraguado de este quedan unos “conductos” por los que poder introducir cables (normalmente de gran diámetro) que posteriormente son tensados y fijados al elemento. No son elementos que deban producir problemas ante incendio, pues su uso suele quedar reducido a piezas de gran tamaño y sección, habitualmente en exteriores (puentes, pasarelas...)



### 5.3 Prefabricados de hormigón

Aunque los prefabricados de hormigón tienen usos diversos, nos vamos a centrar en su uso para la construcción de naves industriales. Sobre los años 90 se impuso -por costes y rapidez de ejecución- la construcción de naves industriales a base de pórticos (pilares y cerchas) de hormigón prefabricado, que sustentan paneles tipo “sándwich”, y fachada y cerramiento compuesto también por paneles prefabricados. En caso de precisar forjados intermedios en el interior, estos también se realizan muchas veces con losa alveolar prefabricada.

Uno de los problemas de los elementos estructurales de hormigón prefabricado (ya sean estos pretensados o no), es que suelen utilizarse hormigones de altas prestaciones, para poder así disminuir la sección necesaria, y precisamente esos hormigones son los que cuando son sometidos a alta temperatura tienen peor comportamiento:

Reducción de la resistencia a alta temperatura

Temperatura del hormigón $\theta$ °C	$f_{c,\theta}/f_{ck}$		
	Clase 1	Clase 2	Clase 3
20	1,00	1,0	1,0
50	1,00	1,0	1,0
100	0,90	0,75	0,75
200			0,70
250	0,90		
300	0,85		0,65
400	0,75	0,75	0,45
500			0,30
600			0,25
700			
800	0,15	0,15	0,15
900	0,08		0,08
1 000	0,04		0,04
1 100	0,01		0,01
1 200	0,00	0,00	0,00

Clase 1 55-70 Mpa  
Clase 2 70-80 Mpa  
Clase 3 80-90 Mpa

### 5.3.1 Estructuras portantes

Por su precio, rapidez de ejecución y comportamiento se usan en estructuras de grandes luces en las que antes prácticamente solo se utilizaba estructura metálica.



Algunas particularidades de este tipo de estructura son:

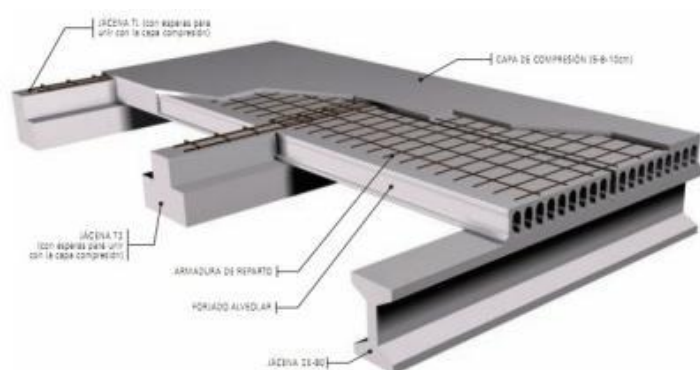
- Utilizan acero pretensado y hormigones de altas prestaciones, con los problemas que ambos suponen en caso de incendio
- Las uniones entre elementos no son nudos rígidos (masa de hormigón con armaduras internas), que redistribuyen los esfuerzos por toda la estructura durante el incendio, sino que son puntos de apoyo o unión muy específicos (sujeciones con anclajes metálicos, apoyos con planchas de neopreno, etc....) con peor comportamiento ante el fuego



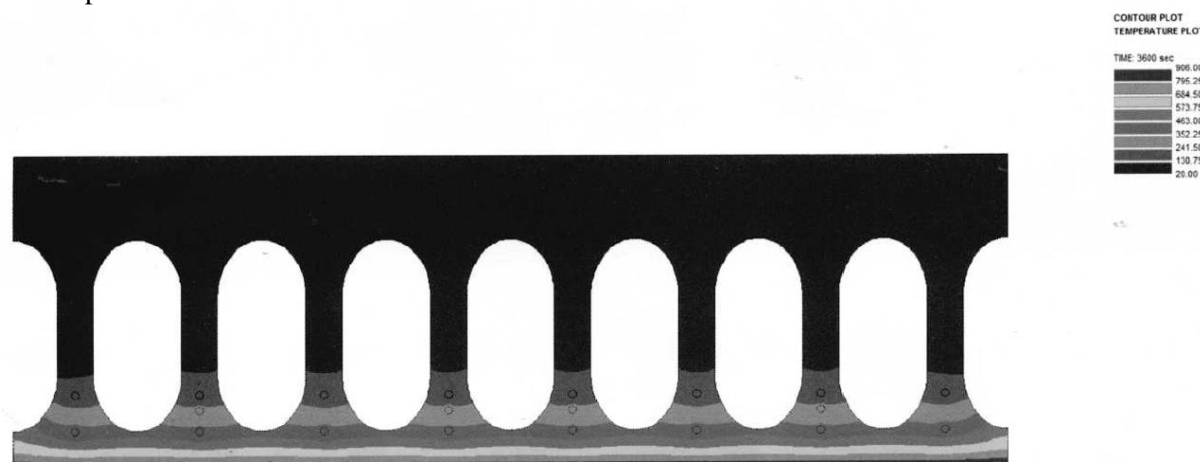
Aunque RSCIEI (*Reglamento de seguridad contra incendios en establecimientos industriales*) recoge requisitos de estabilidad a fuego mínima para los elementos estructurales portantes, también incluye una reducción a dicha exigencia para casos concretos. En este caso, la normativa obliga a señalar este hecho en el acceso principal del edificio para que el personal interviniente, pero esta señalización nunca se cumple.

### 5.3.2 Forjados de losa alveolar

Sustituyen al forjado tradicional formado por viguetas + bovedillas. Se trata de elementos continuos, con un armado inferior a flexión (como las viguetas), una cara superior de compresión, y unos huecos (“*alveolos*”) que aligeran la pieza. Tienen la ventaja de su rápida colocación en obra (permite trabajar sobre ellos inmediatamente), y habitualmente se coloca por encima una capa de compresión para homogeneizar todas las piezas



En la siguiente figura se aprecia la temperatura alcanzada en el interior de una losa, tras ser sometida su cara inferior durante una hora a la curva de fuego normalizada (ignorando el efecto de “spalling” o pérdida de recubrimiento). Se crea un gradiente térmico y por tanto un retraso en el calentamiento de los cables pretensados, con una temperatura en los mismos aproximadamente 500°C menor que en la cara expuesta.



La experiencia ha demostrado que estas losas se comportan peor de lo esperado cuando se ven sometidas a incendio. El esfuerzo cortante que se produce en el alma de la losa (grietas debidas a que la parte superior no dilata -suele haber una capa de compresión que homogeneiza todo el forjado- en tanto que la inferior expuesta a incendio sufre dilatación), supone que el ala inferior de las mismas pueda desprenderse de manera inesperada en los primeros 30 minutos de incendio.

Los daños suelen limitarse al desprendimiento de la mitad inferior de la losa (lo que ya es peligroso para el personal interviniente), pero además, si esta forma parte integral de la estructura horizontal, las tensiones a las que se ve sometida son mayores y por tanto los daños también pueden aumentar.



### 5.3.3 Paneles de fachada

Son sistemas de cerramiento exterior sin función estructural propia<sup>1</sup>, a base de paneles (pueden ser losas alveolares, o compuestos por paramentos externos de hormigón, y aislamiento interior) que cumplen al tiempo las funciones de pared de elevada resistencia, aislante termo-acústico y resistencia al fuego. Permiten lograr mejores prestaciones que los sistemas tradicionales, en un tiempo significativamente menor, y con un acabado de calidad. Normalmente los extremos están machihembrados para facilitar la unión entre paneles y su sellado.

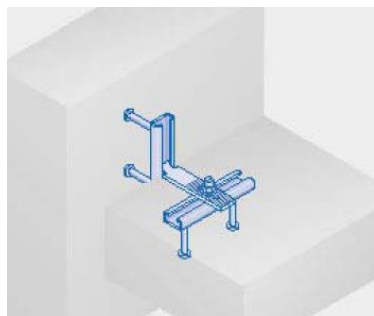
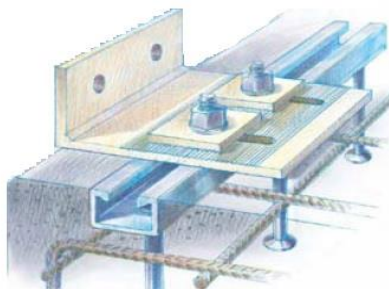
El **anclaje** de los paneles variará en función del elemento estructural al que se sujete.

Si la construcción se ha ejecutado con estructura metálica, el **panel suele ir encajado en las alas del pilar** (si el grueso del panel es superior al del pilar –lo que no es habitual- puede requerirse la soldadura de perfiles auxiliares para permitir su encastre).



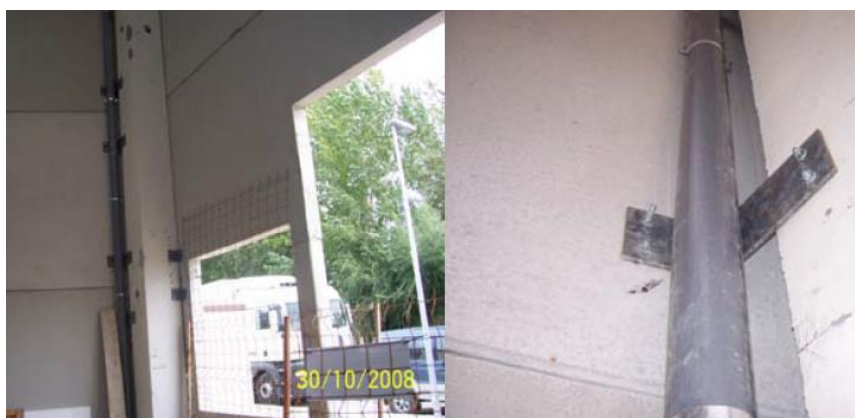
En estos casos (con los paneles encastrados en los pilares), en caso de incendio, la cubierta colapsa hacia el interior, y las fachadas se inclinan hacia el interior al no tener la retención que supone la estructura de cubierta, pero su caída no es habitual. Los pilares sufrirán el lógico pandeo, y puede que las placas prefabricadas se desencastren en parte, pero sin llegar a caer.

En otras ocasiones, los paneles pueden no estar encastrados en las alas de los pilares, sino sujetos con algún tipo de grapas o anclaje. Existe en el mercado una gran variedad de anclajes, que según los fabricantes, se pueden emplear en elementos que requieran protección pasiva contra el fuego. Existen sistemas mediante guías embutida en el elemento de hormigón que permite el anclaje al elemento metálico en una de sus alas, o a otro elemento de anclaje también embutido en pieza de hormigón.



<sup>1</sup> Aunque pueda pensarse que estos elementos prefabricados de hormigón no forman parte de la estructura del edificio, su función estructural es patente, pues se encarga tanto de la recepción y transmisión de esfuerzos como consecuencia de la carga de viento, como de la función de arriostramiento e la estructura portante.

Pero lo habitual sin embargo es llevar a cabo estos anclajes de una manera no tan estudiada, de manera que no se garantiza el cumplimiento de las exigencias normativas al respecto.



La experiencia demuestra que estos tipos de anclaje –tanto al interior como al exterior- **no soportan una carga de fuego elevada por lo que el desplome, en caso de incendio, es casi inmediato**. Suele ser habitual el desplome de los paramentos por lo que **el riesgo es alto para los bomberos** que acuden al siniestro.



Si bien se impone siempre el balizado del entorno (zona de exclusión y zona de precaución, según se vio en el apartado 3 “*Estructuras de muros*”), hay que ser especialmente precavidos en el caso de naves en las que las placas están sujetas interiormente por grapas (en general, siempre que no se aprecie desde el exterior que están encastradas en pilares metálicos)

## Referencias

- Damián Soriano (SEIS Navarra), José Francisco de Castro (SEIS Tomelloso), “*Naves prefabricadas*”; [http://www.bomberosdenavarra.com/documentos/ficheros\\_documentos/RESUMEN\\_ARTICULO\\_NAVES\\_PREFABRICADOS\[1\].pdf](http://www.bomberosdenavarra.com/documentos/ficheros_documentos/RESUMEN_ARTICULO_NAVES_PREFABRICADOS[1].pdf)
- Javier Unanua (ARUP Fire), “*Resistencia al fuego de losas alveolares*”; <http://www.caatvalencia.es/articulos/2013/VIR02400.pdf>
- “*Riesgos en incendios en naves industriales*” <http://evitaelfuego.es/incendios-en-naves-industriales-y-sus-riesgos/>
- José Manuel Atienza Riera, Manuel Elices Calafat, UPM, “*Comportamiento de las armaduras activas después de un fuego*”; [http://oa.upm.es/3849/1/INVE\\_MEM\\_2008\\_57503.pdf](http://oa.upm.es/3849/1/INVE_MEM_2008_57503.pdf)
- Carlos Rodríguez López, “*Resistencia al fuego de los hormigones de altas prestaciones*”; [http://www.ucam.edu/sites/default/files/news/resistencia\\_al\\_fuego\\_de\\_los\\_hormigones\\_de\\_altas\\_prestaciones.pdf](http://www.ucam.edu/sites/default/files/news/resistencia_al_fuego_de_los_hormigones_de_altas_prestaciones.pdf)

#### a) Marco normativo

La normativa de referencia básica sobre protección contra incendios en nuestro país y por tanto, para el estudio de ambos conceptos, es el **CTE DB SI** (Código Técnico de la Edificación Documento Básico de Seguridad en caso de Incendio). Dicho documento supone el marco de aplicación de las condiciones de comportamiento ante el fuego de los productos de construcción y de los elementos constructivos, recogiendo lo dictado por el **Real Decreto 842/2013, de 31 de octubre** (deroga el RD 312/2005 de 18 de marzo): Es la norma de referencia en nuestro país en cuanto a la “Clasificación de los productos de construcción y de los elementos constructivos en función de sus propiedades de reacción y de resistencia frente al fuego”. En relación al código técnico, dicha norma copia lo establecido por el RD.

Dicho real decreto, a su vez, refleja lo dictado por distintas Normas técnicas UNE-EN, siendo de especial interés lo indicado en las siguientes:

- **Norma UNE-EN 13501-1:** clasificación en función del comportamiento frente al fuego de los productos de construcción y elementos para la edificación. Parte 1: Clasificación a partir de datos obtenidos en ensayos de reacción al fuego.
- **Norma UNE-EN 13501-2:** 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 23093 y 23727:** dichas normas están derogadas por la UNE EN 13501-1 y 2. Sin embargo, en ausencia de regulación de las mismas, se aplicarán con carácter supletorio. Tal es el caso de las cubiertas textiles, las cuales, según el CTE DB SI en su sección SI1.-Propagación interior, pto 4.3: “Reacción al fuego de los elementos constructivos, decorativos y de mobiliario”, establece:
  - Los cerramientos formados por elementos textiles, tales como carpas, serán clase M2 conforme a UNE 23727:1990 “Ensayos de reacción al fuego de los materiales de construcción. Clasificación de los materiales utilizados en la construcción”.

#### b) Parámetros básicos de estudio

Con relación al citado marco normativo, los parámetros a estudiar para deducir el comportamiento de los materiales sometidos a la acción del fuego, son dos:

- La resistencia al fuego.
- La reacción al fuego (según el material).

#### I. Resistencia al fuego

**Definición:** se entiende por tal concepto, a la mayor o menor facilidad dispuesta por un material para el avance y propagación del fuego y de sus productos: estanqueidad al fuego, estabilidad o aislamiento térmico.



Imagen 444. Resistencia al fuego

**Normativa:** La valoración de la resistencia al fuego de un material, se determinaba tradicionalmente mediante **UNE 23.093**, de acuerdo a la cual, los materiales eran clasificados en las categorías:

- EF: Estable al fuego
- PF: Parallamas al fuego
- RF: Resistente al fuego

Sin embargo, mediante la aprobación de la decisión eur 89/106/CEE, materializada en nuestro ordenamiento jurídico en RD 842/2013 31 de octubre y UNE-EN-13501, los materiales se clasificarán mediante el nuevo marco normativo que se plasmará con una nueva nomenclatura, jerarquizando los factores a estudiar en unas clases principales y unas clases secundarias:

**REI/W (t)- MCS...**

#### Clases principales

- R. Resistance = Resistencia**  
Capacidad portante de un elemento constructivo, para soportar durante un período de tiempo y sin pérdida de la estabilidad estructural, la exposición al fuego en una o más caras, bajo acciones mecánicas definidas.
- E. Integrity = Estabilidad (estanco)**  
Capacidad de un elemento constructivo con función separadora, para no dejar paso a llamas o gases calientes que puedan producir la ignición de la cara no expuesta al fuego del mismo o de cualquier material adyacente a esa superficie.
- I. Isolation = Aislamiento térmico**  
Capacidad de aislamiento de un elemento constructivo con función separadora, para soportar la exposición al fuego en un solo lado, de forma que no se supere una temperatura determinada en la cara no expuesta al fuego.

#### Clases secundarias

- W. Radiación (Capacidad de control/amortiguación)**  
Un elemento que satisface el criterio I, aislamiento térmico, también se considera que satisface el requisito W para el mismo período. Sin embargo, ciertos elementos sin capacidad I relevante debido a sus características constructivas (Ej: muros cortina), sustituirá dicha nomenclatura sobre el aislamiento térmico, por la exigencia W, en la definición de sus propiedades resistentes al fuego.

- M. Acción mecánica.  
C. Cierre automático.  
S. Estanqueidad al paso de humos.  
P o HP. Continuidad en alimentación eléctrica o de transmisión de señal.  
G. Resistencia a la combustión de hollines.  
K. Capacidad de protección contra incendios.  
D. Duración de la estabilidad a temperatura constante.  
DH. Duración de la estabilidad considerando la curva normalizada tiempo-temperatura.  
F. Funcionalidad de los extractores mecánicos de humo y calor.  
B. Funcionalidad de los extractores pasivos de humo y calor.



ESTABILIDAD + ESTANQUEIDAD A LAS LLAMAS + AISLAMIENTO TÉRMICO

**R E I**

Imagen 445. Resistencia al fuego

Según lectura de los anteriores epígrafes, podría entenderse que el cambio normativo descrito y que tuvo lugar en 2005, supuso una alteración traumática de la calificación de los materiales y productos de la construcción. Sin embargo, a efectos del presente manual, la transición normativa se puede circunscribir en realidad a un cambio en su nomenclatura, ya que el espíritu de lo reglamentado muestra una clara continuidad y una lógica equivalencia, entre las propiedades físicas estudiadas en el comportamiento de materiales y elementos frente al fuego:

**Tabla 24.** Propiedades físicas objeto de estudio

UNE 23.093			RD 312/2005		
EF	PF	RF	R	E	I
X	X	X	X		
	X	X		X	
	X	X		X	
		X			X

**La valoración** de los parámetros anteriores, se expresara de las siglas correspondientes (R, E, I, EI ó REI), seguidas de un número (15, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 180, 240 y 360) que expresa el tiempo durante el cual dicho elemento mantiene las propiedades mecánicas para las cuales fue diseñado.





Imagen 446. Reacción al fuego

## II. Reacción al fuego

**Definición:** se entiende por tal concepto, al parámetro que nos determina la mayor o menor combustibilidad de un material. Es decir su actividad o pasividad en el proceso de iniciación y propagación de un incendio.

**Normativa:** si bien dicha clasificación se realizaba tradicionalmente a través de diferentes procedimientos y ensayos basados en la norma UNE 23.727, en las que los materiales se clasificaban como:

- M0 Incombustible.
- M1 Combustible No Inflamable.
- M2 Baja Inflamabilidad.
- M3 Inflamabilidad media.
- M4 Altamente inflamable.

Actualmente, la norma UNE EN 13501-1 especifica criterios de clasificación de la reacción al fuego, mediante la integración de tres parámetros (energía, humos y gotas), cuya combinación da lugar a 51 clases distintas:

### Potencial energético

Existen siete clases genéricas de reacción al fuego para los productos de construcción (a excepción de los contenidos en suelos, productos lineales para aislamiento térmico de tuberías, cables eléctricos y acabados de cubiertas:

- A1 No combustible en grado máximo.
- A2 No combustible en grado menor:
- B Sin apenas contribución al incendio (muy limitada).
- C Con escasa contribución al incendio (limitada).
- D Contribución moderada al incendio (media).
- E Con contribución significativa al incendio (alta).
- F Sin determinación de propiedades (sin clasificación. Sin comportamiento determinado).

Desde el punto de vista de intervención de los servicios de bomberos, se clasificaran los materiales de construcción en dos grandes grupos:

- Las clases A1, A2 y B:
  - Corresponden a los productos incombustibles y poco combustibles.
  - Son los productos más seguros en materia de seguridad y reacción contra el fuego.
    - No producen el *flashover*.

- Las clases C, D y E:
  - Corresponden a los productos combustibles.
  - Son los productos más peligrosos en materia de seguridad y reacción contra el fuego,
  - Provocan el *flashover*, en un periodo corto de tiempo:
    - Clase C >10min
    - Clase D 2-10min
    - Clase E < 2min

Estas clases de potencial energético, van en muchos casos acompañadas de dos **subparámetros adicionales** que proporcionan información sobre la producción de humo y la caída de gotas o partículas inflamadas cuando arde el material durante el ensayo:

- **Producción de humo:** los criterios para la clasificación del subparámetro de producción de humo son la velocidad de propagación del humo y la producción total del humo. No se evalúa la toxicidad. Se definen por la letra S (*Smoke*), seguido de una numeración que marca su grado o intensidad:
  - s1 Velocidad y cantidad de emisión baja.
  - s2 Velocidad y cantidad de emisión media.
  - s3 Velocidad y cantidad de emisión elevada (todo lo no clasificado como ni s1 ni s2).
- **Caída de gotas o partículas inflamadas:** se definen por la letra D (*Drop*), seguido de una numeración que marca su grado o intensidad: Los criterios de clasificación son:
  - d0 Sin caída de gotas y partículas inflamadas en 600 segundos de ensayo;
  - d1 Sin caída de gotas y partículas inflamadas durante más de 10 segundos en 600 segundos de ensayo;
  - d2 Resto de casos (ni d0 ni d1).

Así pues, la clasificación de los materiales será la resultante de la combinación de las prestaciones en cada uno los as-

Tabla 25. Reacciones

Reacciones genéricas de los productos de la construcción (excluidos revestimientos de suelos):			Reacciones posibles de los revestimientos de suelos:	
A1			A1 <sub>fi</sub>	
A2-s1, d0	A2-s1, d1	A2-s1, d2	A2 <sub>fi</sub> -s1	A2 <sub>fi</sub> -s2
A2-s2, d0	A2-s2, d1	A2-s2, d2	B <sub>fi</sub> -s1	B <sub>fi</sub> -s2
A2-s3, d0	A2-s3, d1	A2-s3, d2	C <sub>fi</sub> -s1	C <sub>fi</sub> -s2
B-s1, d0	B-s1, d1	B-s1, d2	D <sub>fi</sub> -s1	D <sub>fi</sub> -s2
B-s2, d0	B-s2, d1	B-s2, d2	E <sub>fi</sub>	
B-s3, d0	B-s3, d1	B-s3, d2	F <sub>fi</sub>	
C-s1, d0	C-s1, d1	C-s1, d2		
C-s2, d0	C-s2, d1	C-s2, d2		
C-s3, d0	C-s3, d1	C-s3, d2		
D-s1, d0	D-s1, d1	D-s1, d2		
D-s2, d0	D-s2, d1	D-s2, d2		
D-s3, d0	D-s3, d1	D-s3, d2		
E				
E-d2				
F				



pectos recién descritos, así como la ubicación en la que será establecido: no tendrá el mismo riesgo un material ubicado en paredes o techos (importante riesgo de caída de gotas o pavesas inflamadas), que uno dispuesto en el suelo (sin riesgo caída de gotas pero con cuya emisión de gases puede condicionar una evacuación sobre él).

Dichos factores se reflejarán en la casuística de las posibles clasificaciones de las propiedades de reacción frente al fuego, de productos y de los elementos de la construcción.

#### Exigencias específicas:

Debido al especial riesgo de propagación de ciertas instalaciones a los materiales en ellas ubicados, se les exigirán ciertas prescripciones específicas, las cuales se definirán de acuerdo a la siguiente nomenclatura o sufijos correspondientes.

FL (Floor): Suelos.

L (Line): Tuberías.

Roof: Cubiertas.

Ca: Cables.

#### c) Comportamiento al fuego de los elementos estructurales

1. Según modelo estático/esquemas estructurales
2. Según materiales
3. Según tipología constructiva

#### I. Según modelo estático / esquema estructural

- Estructuras Isostáticas / predeterminadas: tal como hemos visto anteriormente, el incremento de tensión sufrido por supresión o fallo de cualquiera de sus elementos (barra, nudo, placa, etc.) no es capaz de ser absorbido por el resto de elementos, produciéndose el colapso de la misma. Por ello, Las tensiones aparecidas como consecuencia de un incendio o como consecuencia del fallo de uno de sus elementos, generará un hundimiento del conjunto de la estructura.
  - Aspectos positivos: son estructuras sencillas, con deformaciones fácilmente predecibles.
  - Aspectos negativos: dilataciones (los empujes no previstos, pueden afectar a la estabilidad de estructuras anexas).
- Estructuras Hiperestáticas / indeterminadas: la composición de dichos modelo de estructuras, por mayor cantidad de elementos estructurales de los necesarios generarán una seguridad añadida a las estructuras hiperestáticas, respecto las isostáticas. De manera que La aparición de solicitaciones no previstas, así como la supresión o fallo de alguno de sus elementos no conduce al colapso inmediato, generando un reparto de los esfuerzos entre los elementos estructurales no dañados, para lograr el equilibrio.
  - Aspectos positivos: reequilibrio estructural ante acciones accidentales por incendio.
  - Aspectos negativos: estructuras en ocasiones tan complejas, que impiden predecir su comportamiento y deformación.

## II. Según el material

### II.1. Acero

**Definición:** el acero estructural es un material que no se encuentra en la naturaleza, sino que es manufacturado por el hombre en empresas siderúrgicas, ampliamente utilizado en la construcción debido a sus características resistentes. Como son su alta resistencia, homogeneidad, características de sus uniones (soldabilidad), etc., dando lugar a estructuras rápidas de montar.



Imagen 447. Comportamiento del acero al fuego

#### Propiedades y características:

- **Masa:** baja, si bien la densidad del acero es muy superior a la de otros materiales. Los perfiles y elementos de acero son bastante ligeros en comparación con otros elementos, como el hormigón armado, ya que para soportar resistencias similares, requiere perfiles de mucho menor peso.
- **Conductividad térmica:** alta, conduce muy bien el calor. Un elemento de acero expuesto al incendio sufrirá un incremento de temperatura en toda su masa, pudiendo llegar a propagar el incendio a lugares alejados del foco inicial.
- **Coefficiente de dilatación:** alto, dilata mucho por lo que el calor del incendio hará aumentar la longitud de los elementos de acero, pudiendo producir esfuerzos importantes en toda la estructura, *pudiendo llegar incluso a ser la causa del colapso de la misma.*

*El coeficiente de dilatación térmica del acero es de  $0,000012\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ , es decir, una viga de acero de 10 m. de longitud, que durante el proceso de un incendio pase de  $20^{\circ}\text{C}$  a  $300^{\circ}\text{C}$ , sufrirá una dilatación lineal de:  $d = 0,000012\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1} * 10\text{ m} * 280^{\circ}\text{C} = 0,0336\text{ m.} = 3,36\text{ cm.}$*

- **Reacción al fuego:** A1, al no arder no aporta mayor carga térmica al incendio, por lo que no contribuye al inicio ni a la propagación del incendio.
- **Resistencia al fuego:** el acero como todo metal, tendrá una alta conductividad eléctrica y térmica, la cual, dará lugar a un doble efecto:
  - Disipación del calor: su alta conductividad, dará lugar a la disipación de calor, retrasando el aumento de temperatura en el punto sometido al foco de calor.
  - Pérdida de resistencia: no obstante, si el fuego sigue aumentando su calor, en un punto dado, dicha disipación térmica del acero será insuficiente para liberar el calor que le es aportado, por lo que resultará que el acero perderá de forma acusada su capacidad resistente sin pérdida alguna de sección.

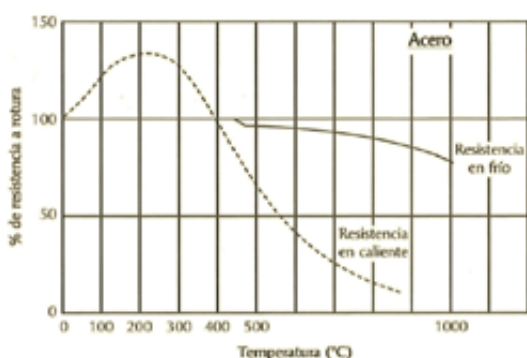


Imagen 448. Gráfica de resistencia al fuego

- 300°C:  $T^a$  a partir de la cual se inicia el proceso de la pérdida de resistencia
- Entre 500 y 600° C: Disminución de su resistencia hasta 2/3 del total.
- Entre los 600 y 700° C: Disminución de su resistencia hasta 1/3 del total.
- A partir de los 538° C, denominado “punto crítico”, la caída de la resistencia ya es muy acusada (por encima del 50%), La estructura no puede soportar la carga de diseño y puede presentarse el colapso en cualquier instante.

Decimos, por tanto, que el acero es un material que proporciona una falsa seguridad estructural frente al fuego, dado que, si bien funde a temperaturas de unos 1300-1400° C, a temperaturas mucho menores pierde su resistencia, e incluso colapsa.

- **Tiempos de colapso:** si bien no hay dos estructuras exactamente iguales (lucos, esbeltez, nudos, etc.), consideraremos con carácter general, que las condiciones teóricas de colapso se alcanzarán a partir de los 500°C, las cuales se lograrán en un tiempo teórico de unos 5 minutos en ensayos de laboratorio y en un periodo de entre 10 y 20 minutos en un incendio real. Debiendo particularizar para los diferentes modelos estáticos de estructuras: isostáticas o hiperestáticas, así como para la geometría expuesta al fuego.
- **Geometría expuesta al fuego:** alta. suelen tener una gran cantidad de superficie expuesta a la carga térmica,

debido a que los perfiles de acero suelen caracterizarse por secciones de pequeño espesor que se adaptan a las distintas necesidades resistentes, por lo que toda la masa de acero aumenta de temperatura con gran facilidad.

Para tratar de comprender el comportamiento de cada elemento, resultará muy eficaz el conocimiento de su factor de forma o masividad, relación entre el perímetro del elemento expuesto al fuego, respecto el área total del perfil ( $m^{-1}$ ). En relación a dicho parámetro:

- Las piezas de gran sección se muestran más estables, que piezas de poca sección, como suelen ser cerchas, vigas en celosía, etc.
- A igualdad de área de sección, la absorción de calor es más lenta en perfiles/secciones cerrados (tubulares o en cajón) que en perfiles/secciones abiertas.
- Las piezas más sensibles ante un incendio serán las más esbeltas (alargadas y de poca sección), generándose el colapso por pandeo.



Tiempos de colapso de un HEB-300, según la geometría expuesta al fuego:

- 4 caras → 11 minutos
- 3 caras → 12 minutos
- 2 caras → 20 minutos
- 1 cara → 31 minutos

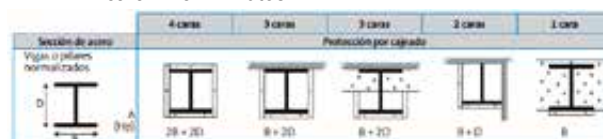


Imagen 449. Exposición de perfil al fuego de perfil HEB

Los factores positivos y negativos de las estructuras metálicas en general son los siguientes:

Positivos:

- **Reacción al fuego:** no son combustibles, no generan flash-over y no participan en la propagación del incendio, Aunque pueden transmitir por conducción el calor a otro punto.
- **Deformaciones:** su importante coeficiente de dilatación térmica, es un indicador de su evolución, donde Las grandes deformaciones avisan de la evolución de su comportamiento previamente a su hundimiento.

Negativos:

- **Resistencia:** pérdida acusada de su resistencia a gran velocidad, por lo que han de estar recubiertas por elementos de protección específicos para prevenir una situación de colapso.
- **Dilataciones y contracciones:** los fuertes empujes y arrastres y giros no previstos en el cálculo de la estructura, pueden llegar a generar el derrumbe o desplome de otros elementos constructivos en contacto con ella (cerramientos, instalaciones, etc.) o estructuras colindantes.



Imagen 450. Arrastre de muro de bloque de hormigón por estructura de acero afectada por incendio

Conclusiones ante potenciales intervenciones de bomberos:

- **Peligrosidad:** aunque el acero es incombustible, es el material estructural más peligroso para los bomberos, ya que Pierde la resistencia a gran velocidad en un incendio ordinario de interior.
- **Colapso por dilataciones:** dilata fácilmente con el calor, de forma que puede provocar un desplome repentino debido a la ruptura o desplazamiento de los apoyos de las vigas.
- **Refrigeración:** en cualquier incendio, siempre se deben refrigerar las estructuras de acero para evitar que se alcancen temperaturas elevadas y se produzcan los efectos ya comentados. No obstante, si ya se encuentran a altas temperaturas, se deberán los enfriamientos bruscos de las mismas; ya que aunque el mayor peligro de colapso se produce por aumento de la temperatura, su posterior enfriamiento puede producir daños que generen igualmente el colapso de esta.

## II.2. Hormigón

- **Masa:** alta. la elevada masividad y densidad de los elementos de hormigón, requiriendo gran cantidad de calor para aumentar su temperatura.
- **Conductividad térmica:** baja, reduciéndose la zona de influencia del calor al área directamente afectado por el foco.
- **Coefficiente de dilatación:** baja, al ser un material pétreo. el calor del incendio no se propagará a lugares alejados del foco de calor, ni producirá dilataciones tan importantes como en los elementos de acero.



Imagen 451. Comportamiento al fuego del hormigón

- **Reacción al fuego:** M0 o A1, al no arder no aporta mayor carga térmica al incendio, por lo que No contribuye al inicio ni a la propagación del incendio.
- **Resistencia mecánica al calor:** baja. el hormigón armado pierde resistencia con el aumento de temperatura de forma similar al acero:
  - 300° C: comienza la pérdida de resistencia.
  - 500° C: pérdida del 50% de la resistencia inicial.
  - 600° C: se produce una fuerte expansión de los áridos, momento a partir del cual el hormigón se comporta como un material frágil.
  - 1000° C: la grava se disgrega y el cemento se deshidrata, a velocidades de 4 cm/hora, mientras que las armaduras, en el caso de los hormigones armados al colapsar a temperaturas mucho menores, habrán ya dejado de cumplir su función en dicho punto.

Normalmente la pérdida de resistencia se acompaña de un cambio de color en la masa del hormigón:

- Hasta los 200-300° C, hormigón mantiene su color gris original y el total de su resistencia.
- Entre los 300 y los 600 °C, el hormigón adquiere tonos rojizos, variando del rosa al rojo a medida que aumenta la temperatura. El hormigón comienza a verse afectado pero permanece sano en un alto porcentaje.
- Entre 600 y 900° C cambia a un segundo gris con partículas rojas. La pérdida de resistencia hormigón afectado es ya muy importante.
- A partir de 900° C adquiere un color ante o amarillo pálido. Su resistencia es prácticamente nula.

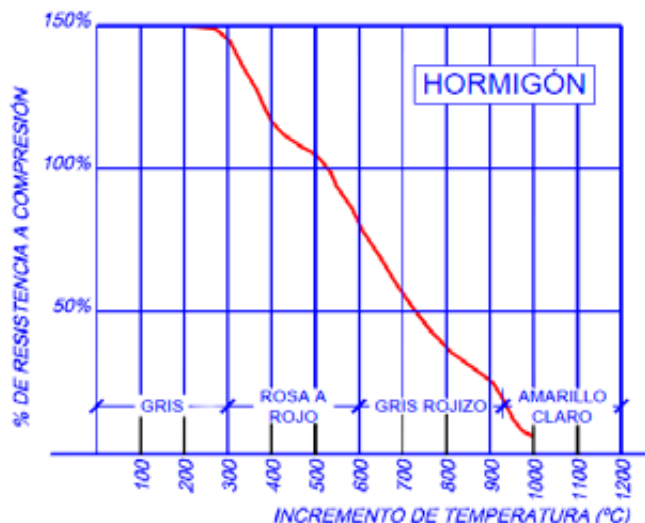


Imagen 452. Resistencia mecánica al calor

- **Geometría / Superficie expuesta:** con carácter general, los elementos de hormigón suelen tener secciones rectangulares. Dicha geometría propicia una menor exposición del material ante el potencial incendio que en el caso del acero estructural, por lo que en las presentes secciones, El factor de forma o masividad es un parámetro menos determinante en el diseño, que en el caso de los productos siderúrgicos.



- **Esfuerzos:** las resistencias más afectadas ante el fuego, son la tracción y la flexión, debido al colapso de las armaduras. En cambio, esta afección es menos acusada, considerándose que por encima de los 800° C, deja de tener una cuantía viable por afección del carbono estructural del hormigón, debiendo procederse a su sustitución.
- **Tipologías de hormigón:** el hormigón presenta la mejor resistencia al fuego de todos los materiales estructurales encontrados en edificaciones ordinarias, siendo de tal versatilidad que incluso se utiliza como elemento de protección de otros materiales frente al fuego.

Para un análisis más exhaustivo, evaluaremos su comportamiento en función de las modalidades constructivas existentes:

### II.2.1. Hormigón armado

Los factores positivos y negativos de las estructuras de HA son los siguientes:

Positivos:

- No son combustibles y, por tanto, no contribuyen al aumento de la carga térmica del local.
- No propagan el calor con facilidad, debido a su baja conductividad térmica.
- Aunque el calor provoca dilataciones finales del hormigón iguales a las del acero, aquellas son mucho más lentas, facilitando con ello una redistribución gradual de esfuerzos en la estructura.

Negativos:

- Disminución de la resistencia del hormigón cuando su temperatura supera los 380° C durante períodos prolongados.
- Aunque en un incendio no es frecuente el colapso y derrumbamiento de las estructuras de hormigón armado, este puede llegar a producirse debido fundamentalmente a procesos termomecánicos (asociado a dilataciones térmicas diferentes) y termohidráulicos (asociado a un aumento de la presión interna del vapor de agua retenido en los poros). Dado que los dos fenómenos tienen lugar de forma simultánea, afirmaremos que el proceso de colapso de los elementos de hormigón armado se debe a procesos termohidromecánicos.

### II.2.2. Hormigón pretensado

El hormigón pretensado supone uno de los productos más apreciados en la construcción debido a sus especiales cualidades resistentes, por ello, podemos localizarlo en productos como viguetas de forjados, vigas y cerchas prefabricadas, etc.



**Imagen 453.** Comportamiento al fuego del hormigón pretensado

Su comportamiento ante el fuego difiere del hormigón armado, siendo netamente peor:

- La ejecución de elementos prefabricados suele realizarse con alambres de acero en vez de armaduras, por lo que, en caso de afección, su menor diámetro propicia un colapso mucho más rápido.
- El proceso comienza de manera análoga al hormigón armado a partir de los 300° C, momento a partir del cual:
  - La pérdida de resistencia es mucho más acusada que en el caso del hormigón armado, dependiendo la dosificación del hormigón, cuantía de acero, tensiones de pretensado y esfuerzos soportados por el elemento constructivo (son más sensibles los elementos a tracción y flexión que los sometidos a compresión simple).
  - Cuando las armaduras pretensadas se ven afectadas por altas temperaturas, se deforman rápidamente, liberan la tensión de pretensado adquirida durante la fabricación del elemento constructivo y reducen notablemente la capacidad estructural del elemento en cuestión. Dichas tensiones de pretensado no se recuperarán una vez enfriado el acero.
- De manera orientativa, cuando el hormigón sufre pérdidas del 35%, el acero de pretensado pierde el 60-70% de su capacidad portante.

### II.2.3. Hormigón postensado

De manera análoga al hormigón pretensado, el comportamiento del hormigón postensado es netamente peor que el armado. Pero incluso en el caso del postensado es aún peor que el pretensado, dado que el acero se coloca embebido en vainas de dos maneras distintas:

- Armados adherentes: tendones de acero rodeados de lechada dentro de las vainas.
- Armados no adherentes: armadura sin lechada, y sin ninguna protección al fuego específica dentro de la vaina, por lo que la protección al fuego de los armados es mínima; y por tanto potenciales puntos de colapso del elemento constructivo.



**Imagen 454.** Comportamiento al fuego del hormigón postensado

### II.3. Fábrica

- **Masa:** alta, suelen ser elementos muy másicos, por lo que tienen gran inercia térmica, por lo que necesitan una gran carga de fuego para proceder a un incremento severo de su temperatura.
- **Conductividad térmica:** baja, conducen mal el calor, por lo que un elemento de fábrica expuesto al incendio, sufrirá un incremento considerable de la temperatura tan sólo en la parte afectada.
- **Coefficiente de dilatación:** bajo, dilata muy poco al estar hechas de materiales pétreos o cerámicos, por lo que no se producirán esfuerzos debidos a dilataciones en lugares alejados del foco de calor.
- **Reacción al fuego/ Combustibilidad:** no combustible. Suelen estar realizados de materiales incombustibles tales como ladrillo cerámico, hormigón, piedra natural, etc., no contribuyendo a la iniciación o propagación del incendio.
- **Resistencia al fuego:**
  - Alta: si el muro está compuesto por materiales pétreos, piedra, sillería, ladrillos con bajo índice de huecos, etc.
  - Media/baja: si el muro está realizado en hormigón, ladrillos con alto índice de huecos, etc.
- **Geometría / superficie expuesta:** alta, suele construirse en grandes paños superficiales y elementos longitudinales, por lo que suelen tener una gran exposición al incendio.

Los aspectos positivos y negativos de las estructuras de fábrica ante el fuego son:

Aspectos positivos: los elementos estructurales contruidos de fabrica, mantienen durante mucho tiempo su capacidad portante al verse afectados por la acción del fuego, debido a que El espesor de sus muros y su propia inercia térmica les confiere un buen grado de seguridad frente al incendio. Como regla general, en estructuras entramadas de madera, colapsara previamente un forjado que una fachada de fábrica.



Imagen 455. Muros de fábrica en pie tras colapso de forjado superior

Aspectos negativos:

- En caso de hundimiento de varios forjados, puede existir peligro de desplome de muros de fábrica por falta de arriostramiento y trabazón entre ellos.
- Si el incendio tiene una magnitud considerable, al tener una mala conductividad térmica, provocará una dilata-

ción diferencial entre sus caras expuestas y no expuestas a la acción del incendio, provocando una caída por desplome hacia su cara fría.

- Ciertos elementos pétreos naturales, expuestos a grandes cargas térmicas durante tiempos muy prolongados generarán roturas de las aristas debido a las tensiones internas y, en algunos casos, deformaciones por el aumento de volumen.

### II.4. Madera

**Masa:** baja, densidad baja, no requiriendo gran carga térmica para lograr el aumento de la temperatura. La humedad de la pieza retrasará el incremento de temperatura.

- **Conductividad térmica:** baja, la madera expuesta al fuego sufrirá un incremento de la temperatura tan solo en la parte afectada, no contribuyendo a la transmisión del calor a través de su masa.
- **Coefficiente de dilatación:** bajo, dilata muy poco, por lo que la carga de fuego no aumentará la longitud de elementos de madera, no produciéndose tensiones adicionales por alargamientos excesivos.
- **Reacción al fuego:** alta, al arder contribuirá a la carga térmica del incendio.
- **Resistencia al fuego:** alta, A diferencia de los materiales cuyo comportamiento frente al fuego se estudia en el presente epígrafe, la madera no pierde resistencia frente al fuego, sino que la gana: Los dos factores fundamentales para comprender el comportamiento resistente de la madera son la dirección de las fibras y el contenido de humedad (a menor humedad, mayor resistencia). Si atendemos a las resistencias de la madera, sus datos se obtienen para valores medios del 12% de humedad, por lo que la evidente disminución de humedad en un incendio generaran un aumento de su resistencia nominal. Frente al comportamiento teórico anterior, la madera sí que sufre una reducción de la resistencia total del elemento por destrucción de la sección resistente (carbonización en capas concéntricas del exterior hacia el interior), la cual se ha estimado en 1cm / 15 minutos.
- **Forma / superficie expuesta:** baja. al no tener secciones abiertas, la cantidad de superficie expuesta es relativamente pequeña: piezas de madera alargadas y con secciones rectangulares.



Imagen 456. Comportamiento al fuego de la madera



Los aspectos positivos y negativos de las estructuras de fábrica frente al fuego son:

Aspectos positivos:

- La madera no pierde propiedades resistentes al ser atacada por el fuego.
- No provocan esfuerzos adicionales por dilatación de sus elementos.
- Las estructuras fallan por carbonización de la sección resistente, cuantificable por medios organolépticos.
- Las estructuras son habitualmente (salvo cerchas y cu-chillos) isostáticas y de poca altura y complejidad, lo que facilita su control y evolución.

Aspectos negativos:

- Son combustibles y medianamente inflamables
- Contribuyen a aumentar la carga térmica.
- Participan en la propagación del fuego.
- Pueden tener vicios ocultos importantes como carcoma, pudriciones, etc. y uniones metálicas.



Imagen 457. Estructura de fábrica tras incendio

#### d) Elementos de protección contra el fuego

Dado que el efecto inmediato de los incendios es la potencial afección a la estabilidad estructural, se debe tratar de proteger con un doble objetivo:

- Evitar el desplome o derrumbamiento de la estructura resistente.
- Evitar la propagación del fuego a otras zonas no afectadas por él, mediante la ubicación de paramentos resistentes al fuego (forjados y tabiques).

Si bien existen multitud de productos de protección de elementos constructivos e instalaciones, los sistemas más frecuentes son las siguientes tipologías:

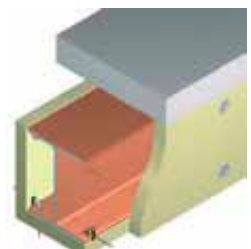
#### I. Sistemas de protección estructural:

##### I.1. Sistemas básicos

- **Recubrimiento con paneles ignífugos:** paneles de cartón yeso configurados en forma de cajón entorno a los elementos de acero. El espesor del recubrimiento de planchas dependerá de las características de la plancha a utilizar y de la resistencia al fuego requerida para el elemento estructural.
- **Pinturas intumescentes:** pinturas inertes a bajas temperaturas pero que reaccionan a temperaturas superiores a los 200°C, generando una película protectora en forma de esponja que aumenta hasta 50 veces su espesor inicial otorgando una importante aislación térmica que mejora la resistencia al fuego del elemento protegido. Dicha solución es eficaz para protecciones hasta 60 minutos, siendo más económico el mortero a partir de dicha temperatura. El tiempo máximo de protección, en el mejor de los casos, es de 120 minutos.
- **Protección sólida:** macizo de hormigón en masa, que envuelve a los elementos estructurales con la única función de incrementar la resistencia y la reacción al fuego. El espesor de recubrimiento dependerá de la resistencia exigida al elemento estructural.
- **Morteros:** morteros tradicionales o con aditivos (como perlita o vermiculita) aplicados en el contorno de los perfiles a proteger y que mejoran sensiblemente su resistencia al fuego. Se puede aplicar bien con mallas o elementos de anclaje mecánico, así como en modo proyectado. Su aplicación sigue la geometría del elemento permitiendo un control preciso de los espesores, agregando escaso volumen y masa a la estructura. La aplicación se puede hacer parcialmente en taller.



Paneles ignífugos



Paneles de lana de roca



Pinturas intumescentes



Morteros



Protecciones sólidas

Imagen 458. Sistemas básicos de protección estructural

- **Filmes o mantas:** mantas de fibra cerámica y de lana de roca (lana mineral) aplicados para la protección de es perfiles metálicos. En perfiles de alma superior a 150 mm deberán tener una malla auxiliar que evite las deformaciones y apertura de los o empalmes.

## 1.2. Sistemas complementarios

- **Estructuras externas:** en general, los riesgos de incendio provienen del interior de las edificaciones, por lo que se deben cuidar especialmente las estructuras que están confinadas al espacio interior. Una solución interesante es diseñar la edificación con su estructura soportante (o parte de ella) al exterior del edificio, limitando o reduciendo los requerimientos de protección pasiva.
- **Recubrimientos con albañilerías:** solución frecuentemente aplicada en a principios del siglo XX, como protección de entramados de madera a base de fábricas de ladrillo o bloque de hormigón, tanto en edificios singulares como en estructuras de acero.
- **Pantallas:** las tabiquerías interiores y/o perimetrales de un edificio así como los cielos falsos ofrecen la oportunidad de aportar protección frente al fuego en la medida que puedan asegurar la integridad, el aislamiento y la estabilidad del conjunto.
- **Relleno de perfiles tubulares huecos:** con frecuencia se puede aprovechar el espacio interior de los perfiles tubulares para rellenarlos con elementos que actúen como masa térmica absorbiendo parte de la energía del calor proveniente del incendio. Hay experiencias con hormigones, hormigón celular e incluso agua (en este último caso asociado a sistemas de recirculación y enfriamiento del agua).



Estructuras exteriores



Recubrimiento albañilería



Pantallas

Imagen 459. Relleno de perfiles tubulares huecos

## II. Sistemas de Protección contra la propagación de incendios en instalaciones

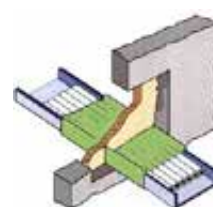
- Cortafuegos lineales en bandejas de cables: la aplicación de revestimiento resistente al fuego cada cierto

número de metros, permite realizar cortafuegos en las grandes longitudes de las galerías de cables, evitando la propagación del incendio.

- Almohadillas intumescentes para sellado de paso de bandejas de cables: cuando se prevén cambios frecuentes en los cables o huecos de paso de las instalaciones eléctricas, la aplicación de las almohadillas intumescentes ahorra tiempo y costes de reposición.
- Sistema de placas para creación de conductos resistentes al fuego: eventualmente es posible realizar conductos cerrados mediante paneles resistentes al fuego, por dentro de los cuales discurren las bandejas de cables, formando así un sector de incendios independiente.
- Collarines intumescentes para tuberías inflamables para sellado de tuberías: las tuberías de plástico y derivados son combustibles y, en caso de incendio, se convierten en unos peligrosos puntos de transmisión de humos, calor, etc. Los collarines intumescentes se instalan abrazando a la tubería combustible en su punto de unión con el paso entre dos sectores. Cuando el fuego actúa, y empieza a fundir la tubería, el material del collarín se dilata y estrangula el paso de la tubería, sellando de ese modo el hueco e impidiendo el paso de calor, humos y gases.
- Conductos de ventilación: fabricación de conductos incombustibles y sistemas de obturación a base de:
  - Sistema de placas de fibrosilicatos.
  - Paneles de lana de roca rígida.
  - Rejillas intumescentes.
  - Compuertas cortafuegos.



Cortafuegos lineales



Almohadillas intumescentes



Collarines intumescentes



Conductos de ventilación



Compuertas cortafuegos

Imagen 460. Sistemas de Protección contra la propagación de incendios en instalaciones

# Los Eurocódigos

## Los Eurocódigos estructurales

Los Eurocódigos estructurales son un conjunto de normas europeas de carácter voluntario, encargadas por la Comisión Europea al Comité Europeo de Normalización, CEN, que proporcionan una serie de métodos comunes para calcular la resistencia mecánica de los elementos que desempeñan una función estructural en una obra de construcción.

Los Organismos Nacionales de Normalización, UNE en España, tienen la obligación de publicar la norma nacional (UNE-EN) dentro de los plazos establecidos. La norma nacional consta del texto formado por la parte del Eurocódigo seguido de su Anejo Nacional, siempre que éste último exista. El Anejo Nacional es el documento donde se publican los Parámetros de Determinación Nacional, PDN. Los PDN son los valores, clases o métodos alternativos que permiten escoger el nivel de seguridad requerido por cada Estado.

El propósito de los Eurocódigos es el de ser usados como documentos de referencia para:

- Ofrecer presunción de conformidad de los edificios y obras de ingeniería civil o de alguna de sus partes, con el requisito básico 1 “resistencia mecánica y estabilidad” (incluidos aspectos del requisito básico 4 “seguridad de uso”) y con parte del requisito básico 2 “seguridad en caso de incendio”, incluyendo la durabilidad, tal como se define en el Anexo 1 del Reglamento (UE) nº 305/2011 de Productos de Construcción;
- Servir de base para la especificación de los contratos de obras y servicios de ingeniería
- Servir de base para la elaboración de las especificaciones técnicas armonizadas para los productos de construcción (normas armonizadas y documentos de evaluación técnica europeos, DEE).

En la actualidad los Eurocódigos cubren los siguientes ámbitos:

- Bases de cálculo de estructuras (EN 1990);
- Acciones en estructuras (EN 1991);
- Proyecto de estructuras de hormigón (EN 1992), acero (EN 1993), mixtas de acero y hormigón (EN 1994), madera (EN 1995), fábrica (albañilería) (EN 1996) y aluminio (EN 1999), junto con el proyecto geotécnico (EN 1997); y el proyecto para la resistencia al sismo de estructuras (EN 1998).

## Los Anejos Nacionales

El Anejo Nacional es el documento donde se publican los Parámetros de Determinación Nacional, PDN. Los PDN son los valores, clases o métodos alternativos que permiten escoger el nivel de seguridad requerido por cada Estado. El establecimiento de los PDN se hace atendiendo a las posibles diferencias en las condiciones geográficas o climáticas, o en los hábitos de vida, así como a los diversos niveles de protección que existen a nivel nacional, regional o local (Guía L relativa a la DPC 89/106/CEE Aplicación y uso de los Eurocódigos).

El Eurocódigo de aplicación en España constará del texto del propio Eurocódigo seguido de su Anejo Nacional, siempre que éste último exista. Sin embargo, el Anejo Nacional puede no ser necesario, bien porque dicha parte no sea relevante para España o bien porque se haya decidido adoptar los valores recomendados establecidos en la parte del Eurocódigo como PDN para hacerlos aplicables en nuestro territorio. Por lo tanto, aunque los Anejos Nacionales sean el instrumento para recoger los PDN que España considere que son esenciales para el cálculo, UNE puede publicar las partes de los Eurocódigos sin estos Anejos puesto que no se trata de un requisito del CEN.

El nivel de seguridad en los edificios y en las obras de ingeniería civil, o en parte de las mismas, incluyendo los aspectos de durabilidad y economía es competencia del Estado español. En España existen variados ejemplos de reglamentación nacional que regulan aspectos contemplados por los Eurocódigos, como por ejemplo la Instrucción de Acciones en Puentes de Ferrocarril o Carreteras, el Código Técnico de la Edificación, el Código Estructural o la Norma de Construcción Sismorresistente. Por otra parte, la Comisión Europea estableció que con el objeto de equiparar el nivel de seguridad de los Eurocódigos con la reglamentación nacional, los Parámetros de Determinación Nacional deben publicarse previo acuerdo con las autoridades nacionales. Es por esto por lo que la publicación de los Anejos Nacionales de los Eurocódigos en España siempre deberá realizarse previa consulta y autorización de la Administración competente.

En algunas ocasiones, la necesaria autorización de la Administración para la publicación de los Anejos Nacionales ha sido encomendada explícitamente a un Órgano del Gobierno. Este es el caso de los Anejos del Eurocódigo 2, 3 y 4: proyectos de estructuras de hormigón, de acero y mixtas, cuya aprobación se contempla entre las funciones de la Comisión Permanente del Hormigón y de la Comisión Interministerial de Estructuras de Acero, mediante el apartado c del artículo 3 del Real Decreto 1177/1992, de 2 de octubre y de la Orden de 26 de abril de 2001, respectivamente.



## Información complementaria no contradictoria

Los Anejos Nacionales pueden incluir información sobre los PDN que pueda ayudar a los usuarios que apliquen los Eurocódigos. Sin embargo, dicha información queda estrechamente limitada a aquella que se considere imprescindible para la comprensión de la norma, como en el caso de comparar los métodos de los Eurocódigos con los establecidos por los Códigos o Instrucciones Españoles. Por lo tanto, cualquier otro tipo de información que se considere necesario para ampliar, simplificar o aclarar el contenido del Eurocódigo deberá publicarse de modo independiente o a través de la reglamentación nacional.

## Publicación de Anejos Nacionales

El Código Estructural, en su artículo 3. Consideraciones Generales, establece como una de las opciones (opción b) para el dimensionamiento y comprobación de la estructura en el proyecto, el empleo de los procedimientos establecidos en los eurocódigos estructurales que entran dentro de su ámbito de aplicación (en la versión que se indica en dicho artículo 3), junto con los correspondientes Anejos Nacionales que se publiquen en la página web del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (MITMA). Esta vía puede considerarse un medio para demostrar el cumplimiento de las exigencias establecidas en el Código Estructural, respetando, en cualquier caso, su ámbito de aplicación y el resto de la reglamentación específica vigente.

Actualmente se está trabajando en la elaboración de dichos Anejos Nacionales. En cuanto estos Anejos sean aprobados por las Comisiones Permanentes del Hormigón y del Acero, y se publiquen en la web de Ministerio del MITMA, la opción b del artículo 3 del Código Estructural, definida en el párrafo anterior, podrá ser de aplicación.

Los anteriores anejos nacionales publicados en la página web del Ministerio, que hacían compatibles los eurocódigos correspondientes con la Instrucción EHE-08 y la Instrucción EAE, ya no son válidos, en tanto que dichas reglamentaciones han sido derogadas por el Real Decreto 470/2021, de 29 de junio, por el que se aprueba el Código Estructural.

## Antecedentes del programa de los Eurocódigos

En 1975, la Comisión de la Comunidad Europea pone en práctica un programa de actuación en el campo de la construcción, basándose en el artículo 95 del Tratado. El objetivo del programa era la eliminación de obstáculos técnicos en el comercio y la armonización de las especificaciones técnicas. Comienzan los Eurocódigos.



Durante 15 años, la Comisión, con la ayuda de un Comité de Dirección en el que estaban presentes representantes de los Estados miembros, dirigió el desarrollo del programa de Eurocódigos, lo que llevó a la publicación de una primera generación de códigos europeos en la década de 1980.

En 1989 se publica la Directiva de Productos de Construcción (DPC) 89/106/CEE. La DPC define los requisitos esenciales que deben satisfacer los productos de construcción. Una parte importante del mercado de los productos de construcción, con un papel central en materia de seguridad, está constituido por los 'productos de construcción estructurales'. Los Eurocódigos se han desarrollado para permitir el diseño de las obras de construcción estructurales (construcción y obras de ingeniería civil) con el fin de cumplir con los requisitos esenciales de la DPC, en particular con los requisitos básicos 1 y 2, como se ha mencionado anteriormente, y para determinar el rendimiento de los productos de construcción estructurales.

La Directiva fue sustituida y derogada por el Reglamento (UE) nº 305/2011 (RPC), de 19 de marzo, y que supone una gran continuidad en cuanto a la mayoría de los procedimientos y tareas ya implantados por ella. Bajo el mismo, los productos de construcción pueden ser comercializados en España o en cualquier país de la Unión Europea, si tienen el marcado CE, que es el único marcado que certifica la conformidad con las características esenciales. El marcado CE implica el cumplimiento del RPC y demás especificaciones técnicas armonizadas de la UE.

En 1990 la Comisión y los Estados miembros decidieron, basándose en un acuerdo suscrito con el Comité Europeo para la Normalización, CEN, respaldado con el visto bueno del Comité Permanente de la Construcción, transferir la preparación y la publicación de los Eurocódigos al CEN a través de un Mandato, para que se encargara de la elaboración de los Eurocódigos como normas europeas. Las primeras normas europeas de los Eurocódigos del CEN fueron normas experimentales ENV debido a la gran dificultad que existía para armonizar todos los aspectos de cálculo para poder consensuar unos documentos a gusto de todos. Las normas experimentales contenían ciertos elementos que cada Estado miembro quería mantener para adaptarse a sus códigos en vigor conocidos como “boxed values”. Cada norma requirió un Documento Nacional de Aplicación, DNA, para poderse aplicar en cada Estado miembro. Entre 1992 y 1998 se aprobaron un total de 62 ENV.

En 1998 La Comisión emite un nuevo Mandato con el encargo al CEN para que llevara a cabo la conversión de las normas experimentales ENV a normas europeas EN, estableciendo unas nuevas condiciones básicas:

- Reducción de los “boxed values” a los estrictamente necesarios por temas de seguridad.

- Desaparición de los Documentos Nacionales de Aplicación; en su lugar se permitirán Anejos Nacionales para definir nacionalmente los “boxed values” que se mantengan.
- Creación del Grupo de Corresponsales Nacionales para los Eurocódigos a quien se le encarga la elaboración de un conjunto de Guías para la aplicación de la DPC, que orientasen en la ejecución, aplicación y puesta en práctica de la misma, pero que no constituyen un desarrollo legislativo de aquélla ni son vinculantes jurídicamente. Entre estas destaca la Guía L Aplicación y uso de los Eurocódigos.

En 2004 se publican las Directivas sobre contratación pública 2004/17/CE y 2004/18/CE, según las cuales los Órganos de Contratación de los Estados miembros no deben obstaculizar el uso de los Eurocódigos para el cálculo estructural en las ofertas relacionadas con el ámbito de aplicación de estas Directivas.

Para 2006 estaba previsto que concluyera la publicación de la normas de los Eurocódigos EN, en lo sucesivo Eurocódigos, y el inicio del período de coexistencia de las partes de los Eurocódigos, durante el cual se utilizaban en paralelo con las normas nacionales que tuviesen el mismo alcance. En el caso particular de España, el organismo de normalización AENOR es el encargado de traducir y publicar los Eurocódigos. Dicha publicación tiene como consecuencia la anulación o adaptación de todas aquellas normas de ámbito nacional (normas UNE) que estuvieran en contradicción con los Eurocódigos. Como no existe ninguna norma UNE que normalice aspectos que entren en conflicto con los Eurocódigos no fue necesario ni anulación ni adaptación alguna.

Para 2010 estaba prevista la implementación de los Eurocódigos como normas europeas con la retirada de todas las normas nacionales conflictivas.

## Las partes y conjuntos de los Eurocódigos

Existen en la actualidad 10 Eurocódigos y 58 partes o normas Europeas para desarrollarlos.

Los Eurocódigos EC0 de Bases de cálculo, EC1 Acciones en estructuras, EC7 Proyecto geotécnico y EC8 Proyecto para la resistencia al sismo de las estructuras no tienen aplicación si no es por referencia en los Eurocódigos EC2 Proyecto de estructuras de hormigón, EC3 de acero, EC4 mixtas, EC5 de madera, EC6 de fábrica y EC9 de aleación de aluminio.

Esto hace que para la aplicación de los Eurocódigos se hayan creado lo que se denominan conjuntos o paquetes de normas. Conjunto o paquete es el grupo de normas que se necesita para poder efectuar un determinado cálculo (para el cálculo de un edificio, puente, silo, tanque o conducción, por ejemplo). Estos son los siguientes:

- Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón
- Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero
- Eurocódigo 4: Proyecto de estructuras mixtas de hormigón y acero
- Eurocódigo 5: Proyecto de estructuras de madera
- Eurocódigo 6: Proyecto de estructuras de fábrica (albañilería)
- Eurocódigo 9: Proyecto de estructuras de aleación de aluminio

## Implementación de los Eurocódigos

La implementación de cada una de las partes de los Eurocódigos tiene 3 fases: período de traducción, período de calibración y período de coexistencia. Estos períodos están relacionados con la fecha en la que el CEN entrega la parte de los Eurocódigos a AENOR.

### Período de traducción

A partir de su recepción, el tiempo máximo del que dispone AENOR para la publicación de cada parte de los Eurocódigos es de 12 meses.

### Período de calibración nacional

El Estado, si así lo considerara, establecerá los Parámetros de Determinación Nacional en los dos años siguientes a la recepción. En el Anejo Nacional se incluirán los PDN y la “información complementaria no contradictoria” que se considere necesaria para ayudar a la aplicación del Eurocódigo. No debe olvidarse que los Eurocódigos son normas que provienen del CEN y por lo tanto tienen muy limitada la capacidad de ser modificadas, por lo que la información complementaria deberá ceñirse a explicaciones de carácter muy sucinto. Al final de este período, AENOR publicará la versión nacional de la parte del Eurocódigo y, en el caso de que existiera, su Anejo Nacional.

### Período de coexistencia

Comienza tras finalizar el período de calibración nacional. Durante este tiempo deberían haber podido convivir las normas nacionales con los Eurocódigos. En España este período no es relevante puesto que el diseño de las estructuras ha sido regulado no mediante normas, sino mediante disposiciones reglamentarias. No existen normas españolas que hayan podido entrar en conflicto con los Eurocódigos.

# Daños por fuego y temperatura. Efectos de incendios en estructuras de hormigón

Un incendio constituye una amenaza para la vida por la asfixia, el envenenamiento y las temperaturas elevadas, pero de producirse en un edificio el peligro aumenta por la propia estructura del edificio. En un recinto exterior, con aire fresco, es casi imposible superar los 700°C. En un recinto cerrado la temperatura sube un 30% más debido a la reflexión y radiación de las paredes.

El punto crítico de ignición (flashover point) se sitúa en los 273°C, hasta este momento sólo la estructura de aluminio se vería afectada. A partir de aquí se desarrolla el llamado fuego equivalente o normalizado que es al que se refieren todas las reglamentaciones y las resistencias al fuego de materiales, medido en minutos. Por encima de 40 minutos de fuego equivalente ya estamos hablando de un incendio muy importante con riesgo cierto para la vida humana.

Para tener una referencia de cómo afectan las altas temperaturas a los materiales, diremos que a los 400 °C el acero se vuelve dúctil y a los 600 °C se produce una bajada brusca de su resistencia.

El hormigón comienza a deteriorarse a temperaturas superiores a los 380 °C en periodos prolongados de tiempo. A los 400 °C se produce una pérdida de resistencia entre 15-25 %, según sea de áridos calizos o silíceos. Por encima de los 800°C, deja de poseer una resistencia a la compresión viable, y se debilitará en mayor medida al enfriarse cuando se apague el fuego.

## Efectos sobre el hormigón armado

Los efectos en las estructuras de hormigón armado empiezan en el propio comportamiento de los materiales. Como hemos visto, el hormigón pierde menos capacidad a altas temperaturas que el acero. En el caso de acero pretensado se acusa mucho más: cuando el hormigón sufre pérdidas del 35%, estaríamos hablando de que el acero pretensado pierde 60-70% de su capacidad.

A diferencia del acero, el hormigón está expuesto al fuego, por tanto las evaluaciones son más complejas. Además de las variables propias de cada incendio (carga de combustible, aireación, etc.), la variación en los resultados del hormigón puede deberse a una serie de factores intrínsecos como la densidad, la porosidad, el tipo de árido y el método de vibración durante la ejecución.

Básicamente, los principales efectos del fuego en el hormigón armado, podrían resumirse en:



- Daños a la adherencia por salto térmico entre las armaduras de acero y el hormigón que las recubre.
- Pérdida significativa de espesor del recubrimiento del hormigón, debida al efecto spalling o desprendimiento por explosión del hormigón.
- Una disminución de la resistencia del hormigón cuando su temperatura supera los 380°C durante períodos prolongados.
- Una disminución de la resistencia de las armaduras de acero cuando la temperatura supera los 250°C.
- Daño o destrucción de las juntas y sellados, lo que en determinadas estructuras puede conducir al colapso.

### Daños a la adherencia.



La existencia de coqueas o debilitamientos en la sección del hormigón, permite que las altas temperaturas atraviesen el hormigón y lleguen a las armaduras muy rápidamente. El acero es buen conductor por lo que se calienta toda la barra de

acero pero no el hormigón. El acero tiende a dilatar y el hormigón no. Esto produce compresiones y fisuras. Después se produce el enfriamiento y la rotura.

La adherencia se daña precisamente por ese salto térmico.

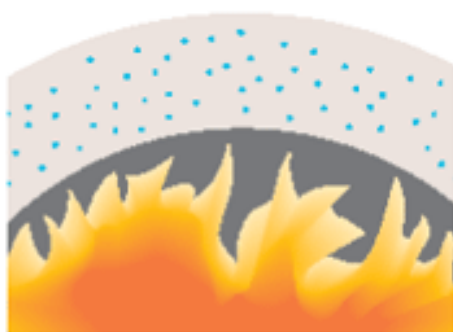
En el caso de hormigón pretensado esto se agudiza ya que trabaja por adherencia.

Este fenómeno se produce o bien por un incremento de temperatura brutal o bien por un enfriamiento brusco (una extinción agresiva).

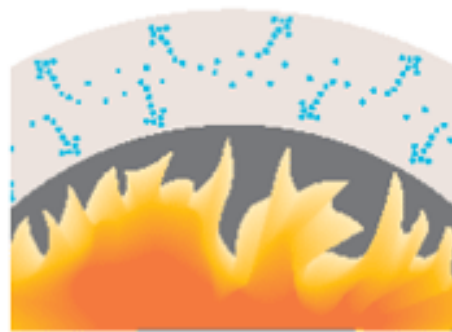
La rotura del hormigón por adherencia se produce con el enfriamiento, es decir, cuando ya no hay humo. Por tanto las grietas aparecidas así son blancas, porque la superficie interior no está ahumada.

### Efecto spalling

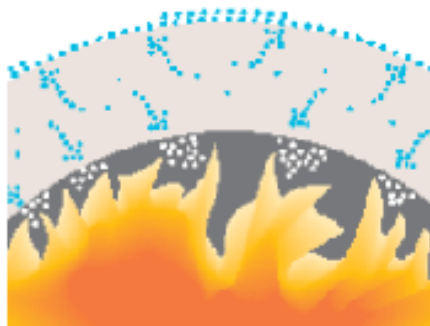
El proceso de desprendimiento, también llamado spalling, tiene lugar rápidamente, a los 100-150 °C, como resultado del impacto térmico y el cambio de estado del agua intersticial.



1. El vapor de agua es un componente estable e integral del hormigón con carácter previo a su calentamiento.



2. Comienza la migración de vapor de agua a través de capilares, a medida que se calienta el hormigón.



3. El vapor de agua emerge como vapor en la parte caliente, y como agua líquida en la parte fría, a medida que aumenta la temperatura del hormigón.



4. Comienza el desgajamiento a medida que el hormigón se deseca localmente.

A medida que el agua se convierte en vapor y debido a la densa estructura del hormigón, el vapor no puede escapar eficientemente a través de su matriz, y la presión aumenta. Cuando la presión en el hormigón es superior a su resistencia, comienza el proceso de desprendimiento o spalling. Estas coqueas así

producidas dejan al descubierto el hormigón “fresco”, que queda expuesto a un calor intenso, lo que reproduce el proceso de desprendimiento a mayor velocidad.



El efecto spalling es inmediato, por lo que el hormigón de recubrimiento salta durante el incendio, es decir que la superficie interior queda expuesta al humo y el hollín: las grietas y coqueras por spalling quedan ennegrecidas.

Un spalling masivo puede llevar a la pérdida total del hormigón de recubrimiento o “fall off”, dejando al descubierto las armaduras.

Hasta ese momento el hormigón había evitado que el acero alcanzara grandes temperaturas, por lo que preservaba también su resistencia. Al mismo tiempo, la magnitud del incendio es tal que el acero alcanza rápidamente la temperatura de 250°C y superiores. Sobreviene la disminución de resistencia de las armaduras.

Si estamos hablando del incendio en el interior de un edificio, la parte de la estructura más expuesta al fuego y también la más sensible es la cara inferior de los forjados. Aquí las tensiones son de tracción y fundamentalmente soportadas por las armaduras de acero. De modo que si éstas se ven afectadas por altas temperaturas, la disminución de su resistencia se traduce en la transmisión de esfuerzos al hormigón, ya sobretensionado interiormente. Resulta en la rotura frágil a cortante del hormigón y el colapso del forjado por la rotura a momentos negativos del armado.

El efecto spalling depende en gran medida de la proporción de agua/cemento en el hormigón. Se admite que con contenidos de humedad inferiores al 3% no hay riesgo. Lo que se cumple con clase de exposición I.

En hormigón de alta resistencia se recomienda disponer 2-3% fibras de polipropileno muy finas ( $f \gg 30\mu\text{m}$ ), de forma que esas fibras se funden al subir la temperatura y permiten así vías de expansión del vapor.

## **Consideraciones finales**

Comprobamos la importancia de garantizar el espesor del hormigón de recubrimiento. Además de esto, podemos limitar la temperatura del hormigón (y

del acero) para retardar o evitar que alcance su temperatura crítica mediante métodos de protección pasiva.

En el caso del spalling, no sólo supone un importante daño a la estructura. Teniendo en cuenta que se da en una fase temprana del incendio, se produce cuando todavía puede haber personas en el edificio o están los equipos de extinción y rescate. El hormigón desprendido explosionado es una lluvia de escombros, pudiendo provocar lesiones y bloqueando las vías de salida. Se dificultan en gran medida la evacuación de personas y el trabajo de los equipos de extinción de incendios.

Por tanto, parece que se trataría de impedir o al menos retardar el spalling o desprendimiento del hormigón.

Aparte de controlar el tipo de hormigón, dosificación, etc... una forma sería la aplicación de una protección pasiva contra incendios al revestimiento del hormigón. La aplicación de una capa de producto inorgánico adecuado de protección contra incendios impide el desprendimiento del hormigón tanto durante el periodo de estabilidad exigido como más allá de dicho periodo, puesto que el material continúa proporcionando un nivel previsible de protección mediante el aislamiento térmico del hormigón. Esta acción impide el desmoronamiento repentino de una estructura, inmediatamente después de un periodo especificado de estabilidad o de un incendio de larga duración.