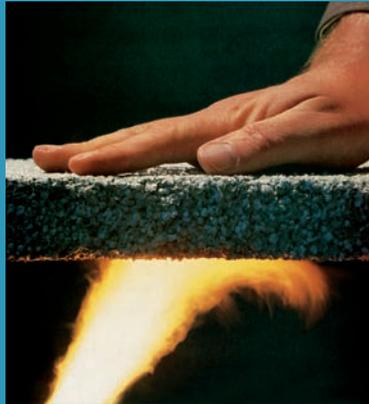


RESISTENCIA AL FUEGO

SEGURIDAD Y PROTECCIÓN COMPLETA FRENTE AL FUEGO CON HORMIGÓN

PLATAFORMA EUROPEA DEL HORMIGÓN



SEGURIDAD FRENTE AL FUEGO UTILIZANDO HORMIGÓN

PLATAFORMA TECNOLÓGICA ESPAÑOLA DEL HORMIGÓN



SEGURIDAD Y PROTECCIÓN COMPLETA FRENTE AL FUEGO CON HORMIGÓN

PLATAFORMA EUROPEA DEL HORMIGÓN

1. El hormigón proporciona una protección completa contra el fuego

Las excelentes y ampliamente demostradas propiedades de resistencia al fuego del hormigón protegen vidas, las propiedades y el medio ambiente en caso de incendio. Cumple de forma eficaz todos los objetivos de la legislación europea en cuanto a protección, lo que beneficia a todos desde usuarios de edificios, propietarios, negocios y residentes hasta aseguradoras, prescriptores y bomberos. Tanto en edificios residenciales como en naves industriales o en túneles, el hormigón puede diseñarse y especificarse para mantenerse estable, incluso en las situaciones de fuego más extremas.

Los ejemplos cotidianos y las estadísticas internacionales proporcionan una amplia evidencia de las propiedades de protección frente al fuego del hormigón, y por ello los constructores de edificios, las aseguradoras y los prescriptores están convirtiendo al hormigón en su material favorito, exigiendo cada vez más su empleo frente al de otros materiales de construcción. Si se especifica que se utilice hormigón, se puede estar seguro de que se ha hecho la elección adecuada porque no aumenta la carga de fuego, proporciona recorridos de evacuación protegidos contra el fuego, detiene la propagación del mismo entre compartimentos y retrasa cualquier fallo estructural, impidiendo en la mayoría de los casos un colapso total. En comparación con los otros materiales de construcción habituales, el hormigón presenta de forma fácil y económica un mejor comportamiento frente al fuego, sea cual sea el criterio de seguridad que se considere.

El empleo del hormigón en edificios y estructuras proporciona unos niveles excepcionales de protección y seguridad en caso de incendio:

- El hormigón no arde y no aumenta la carga de fuego.
- Tiene una elevada resistencia al fuego y detiene la propagación del mismo.
- Protege eficazmente, proporcionando unos recorridos de emergencia seguros a los ocupantes y una protección a los bomberos.
- El hormigón no produce humo ni gases tóxicos, lo que contribuye a disminuir el riesgo de los ocupantes.
- Disminuye la magnitud del incendio, y con ello también el riesgo de contaminación ambiental.
- Proporciona una protección intrínseca contra el fuego—normalmente no se precisan medidas complementarias.
- El hormigón puede resistir condiciones extremas de fuego, lo que lo hace ideal para almacenes con una carga elevada.
- La solidez del hormigón frente al fuego facilita la extinción de los incendios y reduce el riesgo de colapso estructural.
- El hormigón es fácil de reparar después de un incendio, y con ello ayuda a que se reanuden antes las actividades.
- No se ve afectado por el agua utilizada para sofocar un incendio.
- Los pavimentos de hormigón resisten las condiciones extremas que se producen en los incendios de los túneles.

Es una elección sencilla – con efectos de gran alcance.

Un enfoque global

La reducción de muertes en un incendio y del impacto de los daños causados necesitan un enfoque global en cuanto a la seguridad frente al fuego. En 1999 el Centro Mundial de Estadísticas de Incendios presentó al Grupo de Trabajo de Vivienda de la ONU un informe en el que se recopilaban datos a nivel internacional sobre incendios en edificios (Neck, 2002). El estudio, llevado a cabo en 16 países industrializados, mostraba que, durante un año típico, el número de personas muertas en un incendio variaba entre 1 y 2 por cada 100.000 habitantes, y que el coste total de los daños debidos a los incendios se movía entre el 0,2 y el 0,3 % del producto interior bruto (PIB), según puede verse en la Tabla 4.

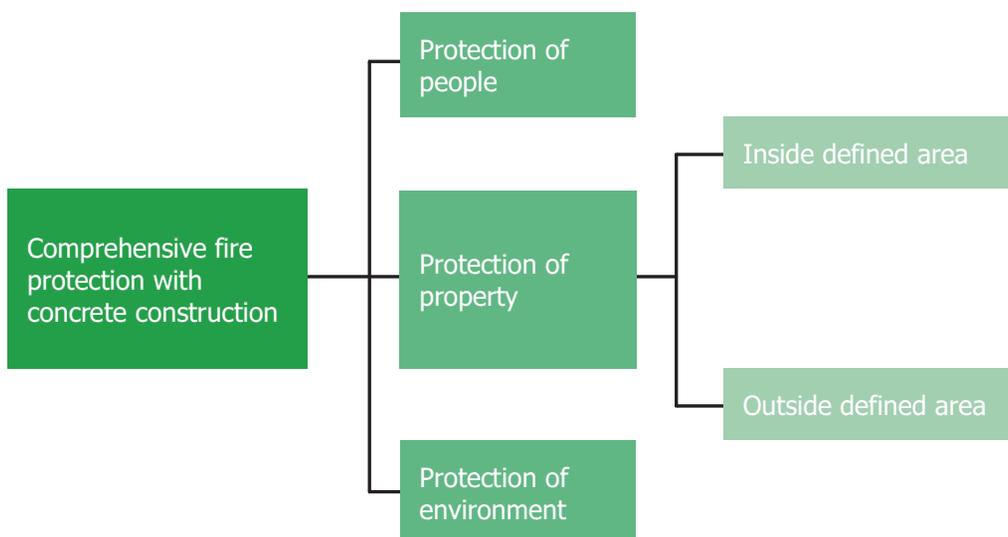
En la mayoría de los edificios hay que estar preparados para el posible inicio de un incendio y para evitar sus efectos, tanto sobre las vidas como sobre los medios de vida. El objetivo es asegurar que los edificios y las estructuras son capaces de proteger tanto a las personas como a los bienes de los peligros. Aunque los reglamentos de seguridad frente a incendios están redactados teniendo en cuenta ambos propósitos, es comprensible que con frecuencia se dé una mayor importancia a la seguridad de las personas. Pero los propietarios, las aseguradoras y las autoridades pueden también estar interesados en la seguridad frente al fuego por otras razones, tales como la supervivencia de la actividad económica, el

almacenamiento de datos, la protección del medio ambiente y el mantenimiento de las infraestructuras críticas. Todos estos factores se tienen en cuenta tanto en la legislación europea como en las reglamentaciones nacionales de seguridad frente al fuego (Figura 1a).

Las medidas de protección contra incendios deben responder a tres objetivos:

- Protección de las personas para conservar la vida y la salud.
- Protección de la propiedad para conservar las mercancías y otras pertenencias, tanto en viviendas como en comercios en las que se haya iniciado un incendio, así como en las propiedades próximas. A ello debe añadirse que las estructuras de edificación sufran el menor daño posible.
- Defensa del medio ambiente para reducir al mínimo los efectos adversos sobre el mismo provocados por el humo y los gases tóxicos, así como por el agua contaminada empleada para apagar los incendios.
- Protección de la propiedad para conservar las mercancías y otras pertenencias, tanto en viviendas como en comercios en las que se haya iniciado un incendio, así como en las propiedades próximas. A ello debe añadirse que las estructuras de edificación sufran el menor daño posible.

Figura 1a.- El enfoque global de la seguridad frente al fuego (Neck 2002).



- Resguardo del medio ambiente para reducir al mínimo los efectos adversos sobre él provocados por el humo y los gases tóxicos, así como por el agua contaminada empleada para apagar los incendios.

Estos tres objetivos pueden conseguirse construyendo con hormigón. Su incombustibilidad y su elevada resistencia al fuego se traducen en que el hormigón proporciona una seguridad global a las personas, las propiedades y el medio ambiente.

Las propiedades intrínsecas de resistencia al fuego del hormigón frente a las de otros materiales de construcción se comparan en la Tabla 1, en la que puede verse la superioridad del hormigón en una serie de aspectos clave.

Figura 1b.- En este incendio de un almacén en Francia, los bomberos pudieron protegerse detrás del muro de hormigón y así acercarse suficientemente al fuego para apagar las llamas (Cortesía de DMB/Fire Press – Revista “Soldats du Feu magazine”, Francia).



Figura 1c.- Las Torres North Galaxy en Bruselas. Este edificio de hormigón armado de 30 plantas cumple los rigurosos requisitos actuales (REI 120); los pilares son de hormigón de alta resistencia C80/95. (Cortesía de ERGON, Bélgica).



Figura 1d.- Los revestimientos y pavimentos de hormigón son capaces de resistir las condiciones extremas de incendio que se producen en los túneles.



Tabla 1.

Material de construcción	Resistencia al fuego sin protección	Combustibilidad	Contribución a la carga de fuego	Conductividad térmica	Protección intrínseca frente al fuego	Posibilidad de reparación tras un incendio	Protección a las personas, al evacuar y a los bomberos
Madera	Muy baja	Elevada	Elevada	Baja	Muy baja	Nula	Baja
Acero	Baja	Nula	Nula	Muy elevada	Baja	Baja	Baja
Hormigón	Elevada	Nula	Nula	Muy baja	Elevada	Elevada	Elevada

2. Comportamiento del hormigón frente al fuego

Hay dos componentes clave para explicar el comportamiento satisfactorio del hormigón frente al fuego: en primer lugar, sus propiedades básicas como material de construcción y, en segundo, su funcionalidad en una estructura. El hormigón es incombustible (no arde) y tiene una baja velocidad de transmisión del calor (protege frente al fuego), lo que significa que en la mayoría de las estructuras el hormigón puede utilizarse sin ninguna protección adicional frente a incendios. Muchas de las propiedades de resistencia al fuego del hormigón no se alteran, independientemente de que se trate de uno normal para estructuras o ligero, o bien fabricado como bloques o como hormigón aireado en autoclave. En esencia, ningún otro material es un ejemplo tan completo de seguridad en su comportamiento en caso de incendio (Tabla 1).

El hormigón no arde

Al contrario que otros materiales de construcción, sencillamente no es posible prender fuego al hormigón. Es resistente a los materiales ardiendo, que pueden alcanzar temperaturas muy elevadas, iniciando o incluso reiniciando un incendio, y las llamas producidas por las sustancias en combustión no pueden inflamarlo. En consecuencia, y dado que no arde, el hormigón no desprende ningún tipo de humo, gases o vapores tóxicos al verse afectado por el fuego. Tampoco gotea partículas fundidas, que pueden provocar igniciones, como ocurre con algunos plásticos y metales. No hay posibilidad de que el hormigón contribuya a iniciar o propagar un incendio o de que aumente la carga de fuego.

En las normas europeas puede encontrarse una evidencia de peso de las propiedades del hormigón frente al fuego. Todos los materiales de construcción han sido clasificados de acuerdo con su reacción al fuego y su resistencia al mismo, lo que determina si un material puede o no ser utilizado y si necesita que se le aplique una protección adicional. Basándose en la Directiva Europea de Materiales de Construcción, la norma EN 13501-1: 2002: Clasificación en función del comportamiento frente al fuego de los productos de construcción y elementos para la edificación, clasifica los materiales en siete clases, con las designaciones A1, A2, B, C, D E y F, de acuerdo con su reacción al fuego.

La clase más elevada es la denominada A1 (materiales no combustibles) y la Comisión Europea ha publicado una lista vinculante de materiales aprobados con esta clasificación, que incluye los diferentes tipos de hormigón y también los componentes minerales del mismo. El hormigón cumple los requisitos de la clase A1 porque, de hecho, sus componentes minerales son incombustibles (es decir, no se inflaman a las temperaturas que normalmente se alcanzan en un incendio).

El hormigón es un material protector

El hormigón presenta un elevado grado de resistencia al fuego y, en la mayoría de las aplicaciones, puede ser descrito como a prueba de incendios si se diseña adecuadamente. El hormigón es una protección muy eficaz frente al fuego. Ello se debe a que sus componentes minerales tiene una gran capacidad calorífica y su estructura porosa se traduce en una baja conductividad térmica. Es esta baja velocidad de transmisión del calor la que permite al hormigón actuar como una protección eficaz no sólo entre espacios adyacentes, sino también para protegerse a sí mismo de los daños provocados por el fuego.

La velocidad de aumento de la temperatura a través de la sección transversal de un elemento de hormigón es relativamente lenta, y por ello las zonas interiores no alcanzan las mismas temperaturas elevadas que se producen en una superficie expuesta a las llamas. En un ensayo de fuego realizado según la norma ISO 834/BS 476 sobre tres vigas de hormigón de 160 mm de ancho y 300 mm de canto se expusieron tres de sus caras al fuego durante una hora. Mientras que a 16 mm de la superficie se alcanzó una temperatura de 600 °C, ésta se redujo a la mitad, es decir a solamente 300 °C, a 42 mm de la superficie - ¡Un gradiente de temperatura de 300° C en nada más que 26 mm!. Ello muestra cómo la relativamente lenta velocidad de elevación de la temperatura del hormigón asegura que las zonas interiores permanecen bien protegidas.

Incluso después de un periodo prolongado, la temperatura interna del hormigón se mantiene baja, lo que le permite conservar su capacidad estructural y sus propiedades de protección frente al fuego como un elemento de separación.

Cuando el hormigón se somete a las elevadas temperaturas de un incendio puede producirse un cierto número de cambios físicos y químicos. Estos cambios se muestran en la

Figura 2a.- Hormigón sometido al fuego: procesos físicos (Khoury, 2000).

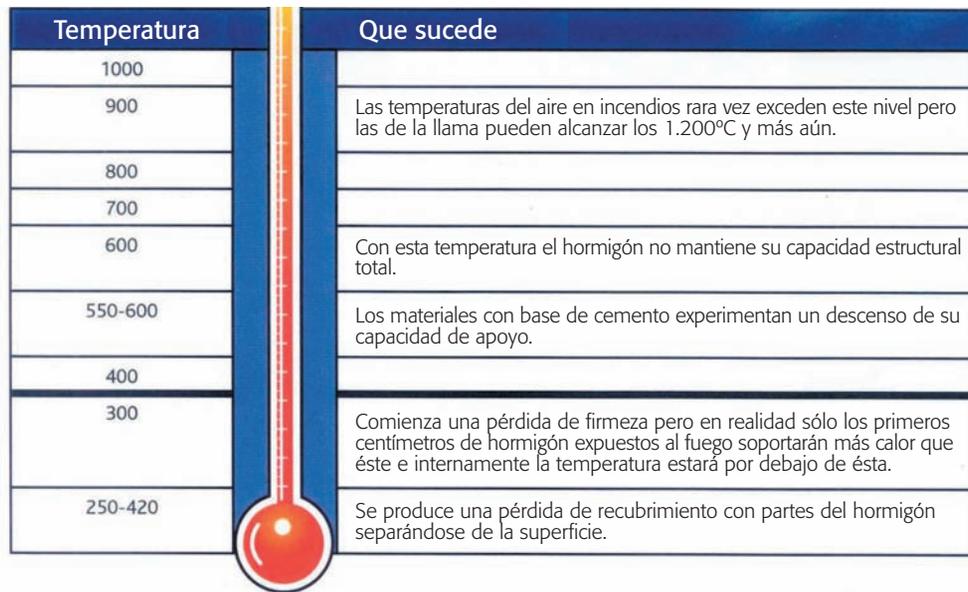


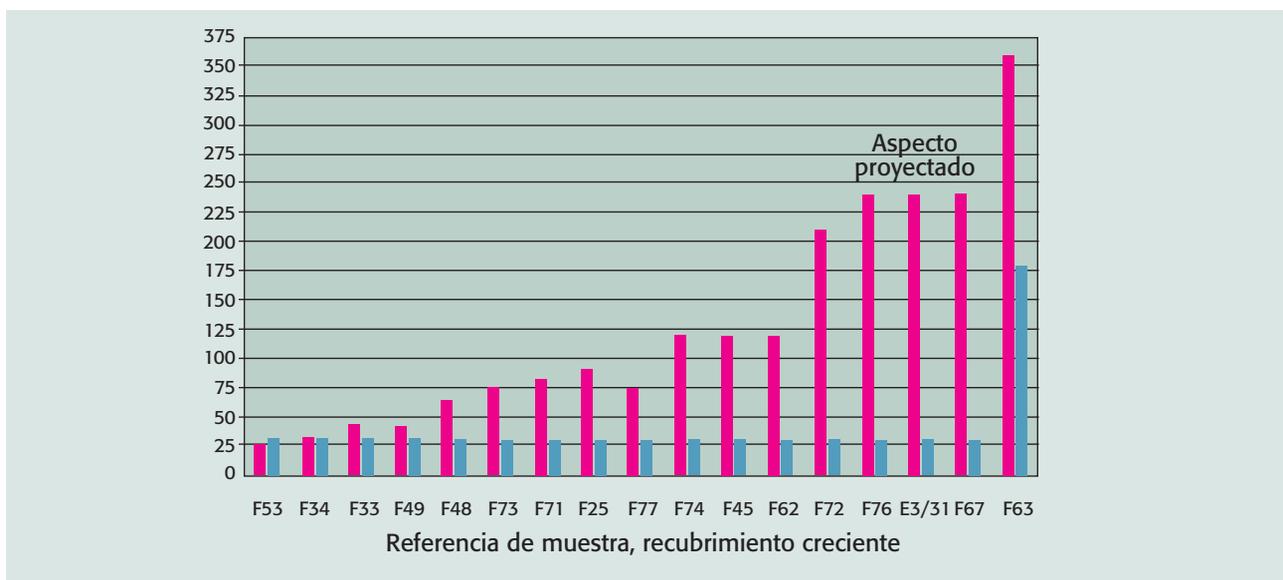
Figura 2a, en la que se relacionan los niveles de temperatura dentro del hormigón (no las temperaturas de las llamas) con los cambios en sus propiedades.

Desconchado

El desconchado es parte de la respuesta normal del hormigón frente a las altas temperaturas que se producen en un

incendio. Por ello, en edificios normales e incendios normales (p.ej. oficinas, escuelas, hospitales, viviendas), los códigos de diseño como el Eurocódigo 2 permiten ya que se produzcan desconchados en estas aplicaciones. El hecho de que el hormigón se desconche en un incendio es algo implícito en los códigos de diseño, con la excepción de los túneles o de los fuegos de hidrocarburos (que se discuten en la Sección 4 – Protegiendo a las personas). Por ejemplo, los estudios sobre

Figura 2b.- Comparación entre la resistencia medida (rosa) y supuesta (azul), según el espesor del recubrimiento (Lennon, 2004).



los resultados experimentales que han servido como base para desarrollar el código de diseño del hormigón estructural del Reino Unido (BS 8110) confirmaron los plazos supuestos de resistencia al fuego, y que en muchos casos éstos eran muy conservadores (Lennon, 2004).

En la Figura 2b puede verse una comparación entre el comportamiento de las losas de forjados en ensayos de fuego y el comportamiento supuesto en el citado código BS 8110.

Muchos de los elementos sufrieron desconchados durante los ensayos de fuego, por lo que el hecho de que en la mayoría de las muestras se superaron los niveles de comportamiento supuestos es una prueba clara tanto de que el desconchado se ha tenido en cuenta en los códigos de proyecto como de que no afecta de forma importante a la resistencia del hormigón en los incendios corrientes.

El hormigón proporciona una compartimentación eficaz

El hormigón protege contra los efectos perjudiciales de un incendio y ha demostrado ser tan fiable que se utiliza habitualmente para proporcionar una compartimentación estable, tanto en edificios industriales de gran tamaño como de varias plantas. Al dividir estos grandes edificios en compartimentos, el riesgo de pérdida total de los mismos, a causa de un incendio, prácticamente se elimina: los forjados de hormigón y los muros disminuyen la superficie afectada por el incendio,

Figura 2c.- Los muros prefabricados proporcionan una compartimentación resistente al fuego en esta instalación de almacenamiento. (Cortesía de DBV, Alemania).



tanto horizontalmente (mediante los muros) como verticalmente (mediante los forjados). Con ello, el hormigón permite ejecutar estructuras de separación seguras de forma fácil y económica (Figura 2c); sus propiedades de protección frente al fuego son inherentes al mismo y hacen innecesario tanto disponer materiales adicionales de protección contra incendios como operaciones de mantenimiento de los mismos.

El hormigón es más fácil de reparar después de un incendio

Una de las mayores ventajas de una estructura de hormigón es que normalmente puede ser reparada después de un incendio, minimizando con ello cualquier inconveniente, así como los costes. Las reducidas cargas de los forjados y las temperaturas relativamente bajas que se producen en la mayoría de los incendios en los edificios se traducen en que la capacidad portante del hormigón se conserva en una proporción muy importante, tanto durante como después de un incendio. Por estas razones, a menudo lo único que se requiere es una simple limpieza. La rapidez de reparación y de rehabilitación es un factor importante para minimizar cualquier pérdida de actividad económica después de un incendio importante; obviamente ello es preferible a una demolición y posterior reconstrucción.

Ejemplo 1 Incendio en un edificio de gran altura en Francfort, Alemania (1973)

Durante la noche del 22 de agosto de 1973 se inició un gran incendio en la planta 40 del primer edificio de gran altura construido en Francfort (Figura 2d). Éste se propagó rápidamente a las plantas 38 y 41, la más elevada de este edificio de oficinas de 140 m de altura formado por dos bloques gemelos. Tanto la estructura portante vertical como la horizontal de este edificio eran de hormigón armado, con forjados de vigas en doble T.

Como las tuberías del sistema contra incendios no habían sido conectadas correctamente, las labores de extinción solamente pudieron comenzarse dos horas después de haberse iniciado el fuego. Tres horas más tarde éste había sido controlado. En total transcurrieron alrededor de ocho horas desde el

comienzo del incendio hasta que se pudo extinguir (Beese, Kürschbasche, 1975).

Todos los elementos estructurales resistieron el incendio a pesar de haber estado completamente expuestos a las llamas durante unas cuatro horas. En muchos puntos el hormigón se desconchó y en algunos casos las armaduras no solamente eran visibles, sino que estaban totalmente al descubierto

Figura 2d.- Incendio de un edificio en Francfort (Cortesía de DBV, Alemania).



Figura 2e.- Ejemplo de elementos de hormigón mostrando desconchados (Cortesía de DBV, Alemania).



Figura 2f.- Reparación de elementos con gunita (hormigón proyectado). (Por cortesía de DBV, Alemania).



(Figura 2e). Afortunadamente no se produjeron fallos de tipo estructural y por ello no fue necesario demoler posteriormente plantas completas – un trabajo peligroso a una altura de más de 100 m por encima del terreno. Fue posible reparar in situ la mayoría de los elementos reutilizando y reforzando las armaduras y protegiéndolas con hormigón proyectado (Figura 2f).

La facilidad de recuperación de este edificio, después del incendio, es un ejemplo típico de la elevada resistencia al fuego de las estructuras de hormigón y de cómo es posible reparar la estructura de forma segura.

3. Proyecto de seguridad frente al fuego con hormigón

Un proyecto y una elección de materiales adecuados son esenciales para proporcionar seguridad frente al fuego. En esta sección se explican las principales consideraciones de diseño con respecto al mismo.

Proyectando edificios seguros frente a incendios

Hace algún tiempo, los requisitos de seguridad frente a los incendios eran establecidos por los gobiernos nacionales, pero actualmente están basados en directivas, normas y reco-

Figura 3a.- La estructura debe: A – Conservar su capacidad portante; B – Proteger a las personas del humo y gases nocivos; C – Aislar a las personas del calor; D – Facilitar la intervención de los bomberos. (Cortesía de The Concrete Centre, Reino Unido).



recomendaciones europeas. Hay cuatro objetivos principales que deben cumplirse al proyectar un edificio para que sea seguro frente al fuego. El hormigón puede satisfacer todos los objetivos de seguridad frente al fuego de forma fácil, económica y con un alto grado de fiabilidad. Los principales requisitos se indican en la Figura 3a, mientras que en la Tabla 2 se han incluido algunos ejemplos de cómo pueden cumplirse construyendo con hormigón y se demuestran las funciones de protección total de las estructuras de hormigón.

Los cinco requisitos de la Tabla 2 deben tenerse en cuenta al proyectar una estructura, y constituyen la base de los métodos de proyecto de estructuras, frente al fuego, incluidos en los Eurocódigos (p.ej. el EN 1992-1-2 (Eurocódigo 2) Proyecto de estructuras de hormigón - Proyecto de estructuras frente al fuego).

En cualquier construcción proyectada de acuerdo con el Eurocódigo 2 deben cumplirse los siguientes criterios de protección frente al fuego: Resistencia (R), Separación (E) y Aislamiento (I). Estos tres criterios se explican en la Tabla 3. Las letras que los designan se utilizan conjuntamente con números que indican la resistencia en minutos frente a un fuego normalizado ISO. Así, por ejemplo, un muro portante

Figura 3b.- Protección proporcionada por la construcción con hormigón – ver D en Figura 3a. (Cortesía de DMB/Fire Press – Revista “Soldats du feu magazine”, Francia).



que resista al fuego durante 90 minutos sería clasificado como R 90; un muro portante de separación sería RE 90; y un muro portante, de separación y aislante sería REI 90.

Ejemplo 2 Ensayos de fuego a escala real de una estructura de edificación en hormigón

Las propiedades del hormigón con respecto a los criterios R, E e I se comprobaron en un ensayo de fuego a escala real (ver Figura 3c) que se llevó a cabo en 2001 en el edificio de ensayo de hormigón del Building Research Establishment (BRE), una institución independiente situada en Cardington, Inglaterra (Chana y Price, 2003). Los resultados del ensayo fueron resumidos por el BRE de la forma que se indica a continuación:

“Los resultados mostraron el excelente comportamiento de un edificio proyectado hasta los límites del Eurocódigo 2. El edificio satisfizo los criterios de comportamiento en cuanto a capacidad de soporte, aislamiento e integridad al ser sometido a un incendio natural y a las cargas impuestas. El forjado ha continuado soportando las cargas sin que haya sido preciso adoptar ninguna medida de rehabilitación después del incendio.”

Tabla 2.- Requisitos de seguridad frente al fuego y su relación con el hormigón.

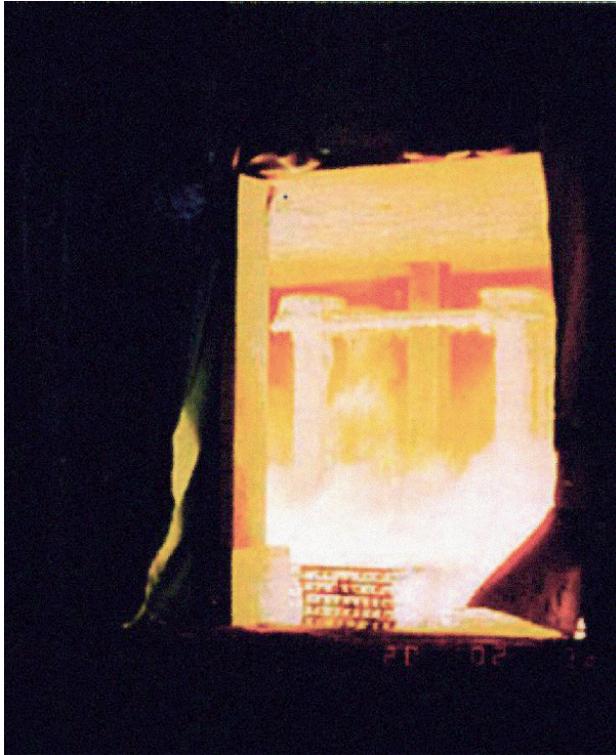
	Objetivo	Requisito	Empleo del hormigón
1.	Reducir el desarrollo de un incendio	Los muros, suelos y techos deben ser de material incombustible	Como material, el hormigón es inerte e incombustible (clase A1)
2.	Asegurar la estabilidad de los elementos portantes durante un periodo específico de tiempo	Los elementos deben de ser de material incombustibles y tener una elevada resistencia al fuego.	El hormigón es un material incombustible y debido a su baja conductividad térmica conserva la mayor parte de su resistencia en un incendio típico
3.	Limitar la generación y propagación del fuego	Los muros y forjados de separación deben ser incombustibles y tener una elevada resistencia al fuego	Además de lo mencionado arriba, las uniones de hormigón proyectadas correctamente reducen la vulnerabilidad frente al fuego y hacen un uso completo su continuidad estructural
4.	Ayudar a la evacuación de los ocupantes y garantizar la seguridad de los equipos de rescate	Los recorridos de evacuación deben ser de material incombustible y tener una resistencia elevada al fuego, de forma que puedan ser utilizados sin peligro durante un periodo de tiempo prolongado	Los núcleos de hormigón son extremadamente sólidos y pueden proporcionar unos niveles de resistencia muy elevados. Los encofrados deslizantes o trepantes son métodos de construcción muy eficaces
5.	Facilitar la intervención de los equipos de rescate (bomberos)	Los elementos portantes deben tener una resistencia elevada al fuego que permita una extinción eficaz; no debe haber gotas ardiendo	Los elementos portantes mantienen su integridad durante un plazo prolongado y el hormigón no produce ningún material fundido

Tabla 3.- Los tres criterios principales de protección contra incendios (Eurocódigo 2, Parte 1-2).

Designación	Estado límite de fuego	Criterio
Resistencia (R) Denominada también: Resistencia al fuego Capacidad de soporte	Límite de carga La estructura debe conservar su capacidad de soporte durante un periodo de tiempo especificado	La capacidad de soporte de la construcción debe garantizarse "El tiempo durante el cual se mantiene la capacidad de soporte de un elemento resistente al fuego, la cual se determina mediante la resistencia mecánica bajo carga"
Estanqueidad (E) Denominada también: Detención de llama Separación Impermeabilidad	Límite de integridad La estructura debe proteger a las personas y bienes de las llamas, humo nocivo y gases calientes	No se producen fallos de integridad, lo que impide el paso de llamas y gases calientes al lado no expuesto "El tiempo durante el cual un elemento, además de la resistencia al fuego, mantiene la capacidad de separación del fuego, la cual se determina mediante la impermeabilidad de sus uniones frente a las llamas y gases"
Aislamiento (I) Denominada también: Protección contra el fuego Apantallamiento frente al calor	Límite de aislamiento La estructura debe proteger a las personas y bienes del calor	No se producen fallos de aislamiento, lo que limita la elevación de temperatura en el lado no expuesto "El tiempo durante el cual, además de la resistencia al fuego y la separación, un elemento mantiene la capacidad de protección contra el fuego, la cual se define mediante una elevación admisible de temperatura en el lado no expuesto"
Cada uno de los estados límite anteriores se expresa en minutos, con los siguientes intervalos: 15, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 180, 240 y 360.		

Nota: las letras R, E, I, proceden de las denominaciones francesas; se han mantenido en el Eurocódigo como reconocimiento a que fueron utilizadas por primera vez en Francia.

Figura 3c.- Ensayo de fuego de una estructura de hormigón en el BRE. (Cortesía del Building Research Establishment, Reino Unido).



Utilización del Eurocódigo 2

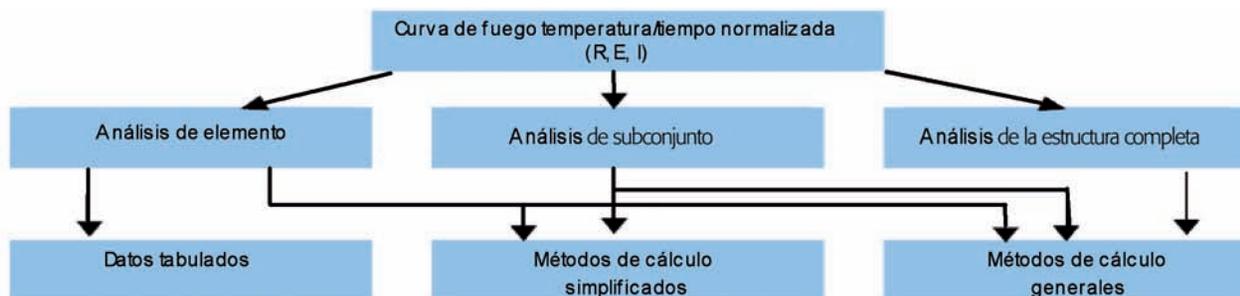
El Eurocódigo 2 (EC2) Parte 1-2, Proyecto de estructuras frente al fuego, cubre el de las estructuras de hormigón, incluyendo la exposición a incendios accidentales, aspectos de la protección pasiva frente al fuego y la seguridad general frente al fuego, dividida en las categorías R, E, I mencionadas anteriormente.

Como se muestra en la Figura 3d, el EC2 permite a los ingenieros dimensionar una estructura y comprobar su resistencia frente al fuego empleando uno de los tres métodos siguientes:

1. Determinación de las dimensiones mínimas de la sección transversal en ambas direcciones y de los recubrimientos de hormigón mediante tablas.
2. Dimensionamiento de la sección transversal de un elemento mediante un método simplificado, para establecer la sección transversal que permanece sin daños al ser sometida a un fuego con una curva ISO de temperatura.
3. Dimensionamiento mediante métodos generales de cálculo en función de la tensiones provocadas por la temperatura y del comportamiento del elemento al ser calentado.

Además de las cláusulas genéricas sobre proyecto frente al fuego, que son de aplicación en Europa, los estados miembros de la UE pueden fijar los valores de algunos parámetros o procedimientos importantes en sus Documentos Nacionales de Aplicación (DNAS). Es importante que los proyectistas consulten los DNAS para asegurarse de que están siguiendo los enfoques correctos en el país en el que están trabajando o redactando un proyecto. Algunos documentos de consulta como el de Naryanan y Goodchild (2006), que se centra en el proyecto en el Reino Unido, pueden constituir referencias útiles para los proyectistas que deseen poner al día o mejorar sus conocimientos del Eurocódigo 2. También es útil la completa guía de Denoel/Febelcem (2006) sobre el proyecto de seguridad frente al fuego con hormigón, que trata extensamente los distintos métodos de proyecto de los Eurocódigos.

Figura 3d.- Procedimiento de proyecto de la resistencia al fuego de las estructuras.



4. Protegiendo a las personas

Cada incendio supone una amenaza para las vidas humanas. Este hecho impulsa las mejoras en la seguridad y obliga a proyectar edificios que son capaces de proteger a las personas, y sus propiedades, de los peligros de los incendios. Los edificios y estructuras de hormigón proporcionan una protección personal para conservar tanto la vida como la salud, de acuerdo con la legislación europea sobre seguridad frente al fuego. En la Sección 2 de este documento se explicaba cómo se comporta el hormigón frente al fuego, y cómo sus propiedades materiales funcionan de forma eficaz en términos de resistencia.

La protección de la vida se basa en la solidez inherente del hormigón, su incombustibilidad y sus propiedades aislantes frente al calor que aseguran que los edificios permanezcan estables durante el incendio. Ello permite a las personas sobrevivir y escapar, así como a los bomberos trabajar de forma segura y, lo que es más importante, reduce el impacto ambiental causado por los productos de la combustión – en esta sección se explica cómo.

Las estructuras de hormigón se mantienen estables durante el incendio

En el proyecto de seguridad frente al fuego, las funciones de un elemento estructural pueden ser designadas como capacidad de soporte, separación y/o aislamiento (R, E, I) y se les asigna un valor numérico (en minutos, de 15 a 360), que es la duración para la que se espera que el elemento lleve a cabo estas funciones (ver la Sección 3 para una explicación sobre ello). En caso de incendio, la estructura debe comportarse como mínimo en el nivel exigido por la legislación, pero además, el que la estabilidad de la estructura se mantenga durante tanto tiempo como sea posible es obviamente deseable para sobrevivir, escapar y combatir el incendio. Esto tiene una importancia especial en complejos de gran tamaño y en edificios de muchas plantas. Las estructuras de hormigón se proyectan para satisfacer esta demanda de estabilidad global en caso de incendio y en muchas ocasiones sobrepasan las expectativas. La incombustibilidad y baja conductividad térmica del hormigón se traducen en que éste no arde y en que su resistencia no se ve afectada de forma significativa durante

un incendio normal de un edificio. Por otra parte, actúa como una protección pasiva y de larga duración – el hormigón es el único material de construcción que no depende de medidas activas de protección frente a incendios, como por ejemplo aspersores, en su comportamiento frente al fuego.

La protección proporcionada por el hormigón se puso claramente de manifiesto en el comportamiento del edificio Windsor en Madrid durante su catastrófico incendio en febrero de 2005. Los pilares de hormigón y los núcleos impidieron que el edificio se derrumbara, y las vigas de gran canto situadas encima de la planta 16 confinaron el fuego por encima de la misma durante siete horas, como se describe en el ejemplo 3.

Ejemplo 3

El edificio Windsor, Madrid, España (2005)

El incendio, con un coste de 122 millones de euros, durante el acondicionamiento de un edificio de oficinas de gran altura en la zona financiera de Madrid, es un excelente ejemplo de cómo se comportan las estructuras de hormigón convencional durante un incendio. Construido entre 1974 y 1978, el edificio Windsor constaba de 29 plantas de oficinas, cinco plantas de sótano y dos plantas técnicas encima de las plantas 3 y 16. En la época en la que se proyectaron los códigos de edificación españoles no exigían disponer de aspersores, pero esto se modificó posteriormente y por ello el edificio estaba siendo acondicionado para adecuarlo a la normativa vigente. Los trabajos a realizar incluían un tratamiento ignífugo de todos los pilares de acero perimetrales, la construcción de una nueva fachada, unas nuevas escaleras de escape exteriores, la mejora de los sistemas de alarma y detección y la adición de dos nuevas plantas. Cuando se produjo el incendio, una empresa internacional de auditoría ocupaba 20 plantas del edificio, y otras dos plantas estaban alquiladas a un bufete de abogados español. El edificio tenía una forma esencialmente rectangular, con unas dimensiones de 40 m x 36 m a partir de la tercera planta. En la estructura de hormigón se utilizó un hormigón convencional en el núcleo central, los pilares y los forjados reticulares; una gran parte de la fachada tenía pilares perimetrales de hormigón, si bien la característica más importante del edificio eran las dos “plantas técnicas”. Estas últimas, cada una de ellas con 8 vigas de gran canto (3,75 m,

es decir, la altura de suelo a techo en las restantes plantas) se proyectaron para actuar como vigas de transferencia macizas, impidiendo el derrumbamiento provocado por los elementos estructurales cayendo desde arriba.

El incendio se inició ya avanzada la noche, casi dos años después del comienzo de las obras de acondicionamiento, cuando el edificio estaba desocupado. Empezó en la planta 21 y se propagó rápidamente, hacia arriba tanto a través de las aberturas practicadas durante el acondicionamiento como por la fachada (entre los pilares perimetrales y la fachada de acero y cristal), y hacia abajo por medio de los restos ardiendo de la fachada que penetraban por las ventanas de las plantas situadas por debajo (Figura 4a). La altura, extensión e intensidad del incendio dieron lugar a que los bomberos solamente pudieran tratar de contenerlo y proteger las propiedades adyacentes, de manera que el edificio ardió furiosamente durante 26 horas, afectando a casi todas las plantas (Figura 4b).

Cuando finalmente pudo extinguirse el incendio, el edificio había ardió completamente por encima de la quinta planta, una parte importante de la fachada había sido destruida y existían serios temores de que el edificio se derrumbara. Sin embargo, tanto durante el incendio como hasta su demolición final, la estructura se mantuvo en pie; únicamente se desmoronaron la fachada y las plantas por encima de la planta técnica superior. La resistencia pasiva de los pilares y del núcleo de hormigón contribuyó a impedir el colapso total, si bien fue esencial el papel jugado por las dos plantas técnicas, especialmente el de la situada encima de la planta 16, que confinó el fuego durante más de siete horas (Figura 4c). Fue solamente después, tras un derrumbamiento importante, cuando la caída de los restos ardiendo hizo que el fuego se propagara a las plantas por debajo de ella pero nuevamente los daños se limitaron a las plantas por encima de la técnica inferior en el tercer piso.

Lo mencionado anteriormente es una prueba convincente de que los forjados de hormigón de gran canto a intervalos regulares pueden minimizar el riesgo de derrumbamiento e impedir la propagación del incendio. El único informe sobre el comportamiento frente al fuego del edificio Windsor fue realizado por unos investigadores españoles del Instituto Técnico de Materiales y Construcciones (Intemac), una institución

privada. En dicho informe se abordó la resistencia al fuego y la capacidad portante residual de la estructura después del incendio (Intemac, 2005). Entre las conclusiones de Intemac pueden destacarse las siguientes:

“El edificio de hormigón Windsor se comportó extraordinariamente bien en un incendio muy severo y claramente mucho mejor de lo que hubiera sido esperado por aplicación estricta de la normativa vigente sobre estructuras de hormigón. La necesidad de un tratamiento ignífugo adecuado de los elementos de acero para garantizar su comportamiento en caso de incendio se vio de nuevo confirmada. Habida cuenta del comportamiento de estos elementos en las plantas en las que ya se había aplicado dicho tratamiento, es muy probable, aunque obviamente esto no puede afirmarse con absoluta certeza, que si el incendio se hubiera producido después de que la estructura de las plantas superiores hubiera sido ignifugada, éstas no se habrían derrumbado y que las consecuencias del siniestro habrían sido probablemente mucho menores”.

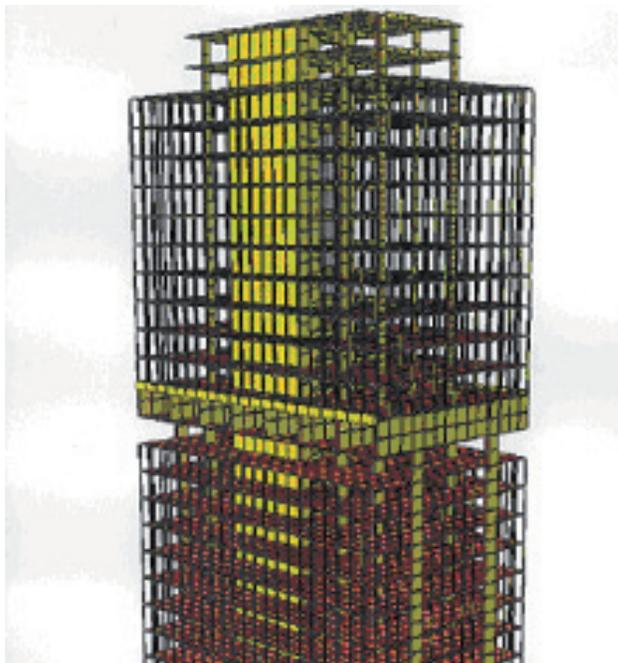
Figura 4a.- El edificio Windsor ardiendo. (Cortesía de IECA, España).



Figura 4b.- La fachada por encima de la planta técnica del piso 16 quedó completamente destruida. (Cortesía de IECA, España).



Figura 4c.- Plano mostrando la ubicación de la planta técnica. (Cortesía de Otep y Construcciones Ortiz, España).



Un centro de investigación español, el Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (IETcc), estudió conjuntamente con el Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA) los elementos estructurales de hormigón armado del edificio Windsor. La investigación incluyó un estudio microestructural de estos elementos mediante análisis térmico y observaciones con microscopio electrónico. Se observó que en el interior del hormigón se alcanzó una temperatura de 500 °C a una distancia de 5 cm de la superficie expuesta al fuego. Este resultado confirma la severidad del incendio del edificio Windsor y el buen comportamiento del recubrimiento de hormigón cumpliendo con las normas de proyecto de seguridad frente al fuego de estructuras de hormigón.

El hormigón proporciona una evacuación y una extinción del incendio seguros

El hecho de que las estructuras de hormigón se mantienen estables durante un incendio es de especial importancia para la evacuación segura de los ocupantes de un edificio, así como para las tareas de extinción de incendios. Las cajas de escalera, techos y muros de hormigón impiden la propagación del fuego y actúan como compartimentos sólidos, proporcionando con ello recorridos de evacuación y de acceso de los equipos de rescate seguros. Los recorridos de emergencia contruidos con hormigón tienen un grado de robustez y de integridad del que carecen otros materiales de construcción, tanto si se emplean en edificios residenciales, como en lugares llenos de gente como centros comerciales, teatros o edificios de oficinas. El empleo del hormigón también lleva consigo que la seguridad de los bomberos no se ve comprometida. Los elementos portantes y las particiones de los edificios contruidos con hormigón proporcionan una protección eficaz a los bomberos incluso cuando se encuentran en el interior de un edificio ardiendo. Únicamente en estas condiciones pueden llevarse a cabo estas actividades con un riesgo reducido. Las recomendaciones elaboradas por el National Institute of Standards and Technology (NSIT) después del derrumbamiento del World Trade Centre de Nueva York son de un gran valor (ejemplo 4).

En el extremo opuesto del espectro con respecto a los edificios de gran altura se encuentran los túneles, y también en ellos el hormigón puede jugar un papel vital para evitar la pérdida de vidas humanas (ejemplo 5).

Ejemplo 4 Edificios del World Trade Centre, Nueva York (2001)

Sin lugar a dudas, la investigación llevada a cabo por el National Institute of Standards and Technology (NIST) después del desastre del World Trade Centre en Nueva York, en septiembre de 2001, ha dado lugar a uno de los informes más importantes y de mayor influencia jamás escritos sobre seguridad en edificios (ver <http://wtc.nist.gov/> para más información). La serie final de informes, con más de 10.000 páginas, se publicó en 2006 después de tres años de estudios sobre incendios y edificios, así como de seguridad frente a incendios. De lo que ha sido descrito como el peor desastre de un edificio de la Historia, en el que perecieron más de 2.800 personas. La mayoría de ellas se encontraban todavía vivas cuando se derrumbaron los dos edificios. El NSIT estudió las causas probables que condujeron al derrumbamiento de los dos edificios con estructura de acero y pudo formular unas 30 recomendaciones sobre códigos, normas y prácticas en las áreas de proyecto estructural y seguridad para las personas. Entre las mismas, el NTIS pide:

- Una mayor integridad estructural, incluyendo la prevención del colapso progresivo y la adopción de métodos de ensayo aceptados a escala nacional.
- Una mejor resistencia al fuego de las estructuras; la necesidad de poder realizar a tiempo el acceso y la evacuación, el que en el incendio pueda extinguirse sin derrumbamientos parciales, sistemas de protección contra incendios redundantes, compartimentación y la posibilidad de resistir el incendio más grave sin que se produzcan derrumbamientos.
- Nuevos métodos de proyecto de resistencia al fuego de las estructuras: incluyendo el requisito de que en los incendios incontrolados los edificios ardan sin que se produzca un colapso parcial o total.
- Mejores sistemas de evacuación de los edificios: para mantener la integridad y la supervivencia.
- Mejores sistemas de protección activa contra incendios: sistemas de alarma, comunicación y supresión.
- Mejores procedimientos y tecnologías de respuesta en caso de emergencia.
- Regulaciones más estrictas sobre aspersores y recorridos de emergencia en edificios existentes.

El Dr. Shyam Sunder, que dirigió la investigación como representante del NSIT, ha admitido las excepcionales circunstancias que condujeron finalmente al derrumbamiento de las torres, pero explica que el equipo del NIST fue capaz de formular una serie de recomendaciones de prioridad absoluta, realistas, apropiadas y factibles, y orientadas a prestaciones, como resultado de los análisis y ensayos que se llevaron a cabo. El hormigón puede cumplir fácilmente estas recomendaciones.

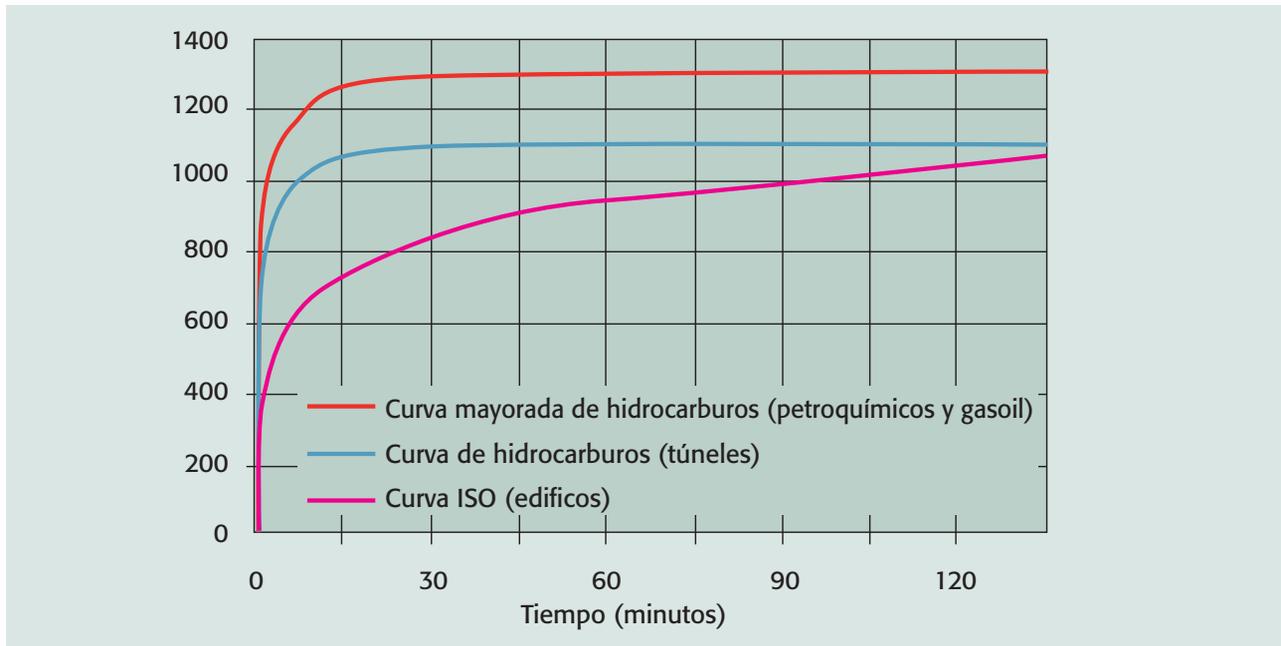
Además de lo anterior, la American Society of Civil Engineers (ASCE) en su informe sobre el comportamiento, tras el impacto de un avión, del edificio del Pentágono, el cual fue atacado al mismo tiempo, concluyó que la estructura de hormigón armado del edificio había tenido una influencia importante para impedir daños posteriores en el mismo (ASCE, 2003). Además, afirma que la "continuidad, redundancia y resiliencia de la estructura contribuyeron al comportamiento del edificio" y recomienda que en el futuro se incorporen características de este tipo a los edificios, en especial en aquellos en los que se considere importante el riesgo de un colapso progresivo.

Ejemplo 5 Mejora de la seguridad frente al fuego en túneles de carretera

En Europa hay más de 15.000 km de túneles de carretera y ferrocarril; son parte de la infraestructura de transporte y son de especial importancia en las regiones montañosas, así como cada vez más en las grandes ciudades, en las que los túneles pueden disminuir las congestiones de tráfico y liberar espacios urbanos. El problema es que los accidentes en los que se ven envueltos vehículos pueden dar lugar a incendios muy severos; éstos tienden a alcanzar temperaturas muy elevadas debido a la combustión de los carburantes y de los vehículos, en algunos casos hasta 1.350 °C, pero más habitualmente entre 1.000 y 1.200 °C. Las temperaturas máximas se alcanzan más rápidamente en los incendios de los túneles que en los de los edificios, principalmente por los hidrocarburos de la gasolina y del gasoil, pero también a causa de los espacios confinados (Figura 4d).

El Munich Reinsurance Group (2003) informa que hay una probabilidad 20 veces mayor de que se produzca un

Figura 4d.- En los incendios de los túneles pueden alcanzarse temperaturas muy elevadas.
(Cortesía de J.-F. Denoël/Febelcem, Bélgica).



incendio en un túnel de carretera que en uno de ferrocarril y que estos incendios extremos a menudo se traducen en pérdidas de vidas; la expectativa de vida humana se ha cifrado en dos minutos, debido a que los gases producidos son altamente tóxicos. Por otra parte, los incendios en túneles de gran longitud situados en zonas remotas pueden durar un tiempo muy largo; el incendio en el túnel del Mont Blanc en 2001 se mantuvo asombrosamente durante 53 horas. Ciertamente, los incidentes de mayor importancia, como los del túnel del Canal de la Mancha (1996), Mont Blanc (1999) y San Gotardo (2001) han dado a conocer las devastadoras consecuencias de los incendios en los túneles y puesto de manifiesto las limitaciones en los mismos de los materiales de construcción y de las soluciones estructurales. Como resultado, las regulaciones se han enfocado en mejorar las condiciones de evacuación y rescate de las personas que se ven envueltas en accidentes en los túneles de carreteras, concentrándose actualmente los prescriptores en la seguridad, solidez y estabilidad.

Sin embargo, tampoco se ha prestado una atención suficiente a los materiales de construcción de carreteras y a su contribución a la carga de fuego; por ello, es necesario abordar con un enfoque más holístico el proyecto y construcción

de los túneles tomando en consideración en los mismos las soluciones con hormigón (CEMBUREAU, 2004). En caso de producirse un incendio en un túnel de carretera, un pavimento incombustible y no tóxico, como es el de hormigón, contribuye a la seguridad tanto de los ocupantes de los vehículos como de los equipos de rescate. El hormigón cumple estos requisitos porque es incombustible (no arde), no aumenta la carga de fuego, no se reblandece (con lo que no entorpece a los bomberos), no se deforma ni gotea y no desprende gases tóxicos en un incendio, cualquiera que sea la severidad del mismo. El hormigón puede ser empleado como revestimiento del túnel por sí solo o combinado con una barrera térmica, pero también puede utilizarse en el pavimento. Esto es muy útil porque puede sustituir a las mezclas bituminosas. En comparación con estas últimas, el empleo del hormigón se traduce en:

- Una mejora de la seguridad: como se ha visto anteriormente, el hormigón no arde y no emite gases nocivos (las mezclas bituminosas se inflaman entre 400 y 500 °C y al cabo de unos pocos minutos producen vapores sofocantes y cancerígenos, humo, hollín y sustancias contaminantes). En el incendio del Mont Blanc se que-

maron 1.200 m del pavimento bituminoso, con un efecto equivalente al de 85 automóviles adicionales ardiendo (CEMBUREAU, 2004).

- Una mayor durabilidad del pavimento, las instalaciones y la estructura: el hormigón no cambia su forma al calentarse, mientras que la mezcla bituminosa se inflama, pierde su forma física y obstaculiza la evacuación y el rescate.
- Unos periodos sin operaciones de conservación más largos en comparación con los de un pavimento de mezcla bituminosa.
- Una mayor luminosidad: el hormigón tiene un color más claro y por ello más brillante, mejorando la visibilidad tanto en condiciones normales de servicio como en situaciones de emergencia.
- La mayor solidez del pavimento de hormigón reduce tanto el tiempo que debe permanecer cerrado al tráfico como las obras a realizar. Los cierres de los túneles originan contaminación y las obras ponen en peligro a los trabajadores que intervienen en las mismas.

En una extensa guía sobre reducción de riesgos en túneles, la compañía de reaseguros internacional Munich Re (2003) indica que en los túneles debe considerarse el disponer una calzada de material incombustible (p.ej. de hormigón en vez de mezcla bituminosa). En algunas reglamentaciones se ha reconocido también el papel que puede jugar el hormigón en la seguridad frente al fuego de los túneles (Figura 4e). En un decreto publicado en Austria en 2001 se exige que

Figura 4e.- Los pavimentos de hormigón pueden resistir las temperaturas muy elevadas que se producen en los incendios de los túneles.



en todos los nuevos túneles de carretera con una longitud superior a 1 km el pavimento sea de hormigón. Eslovaquia también emplea pavimentos de hormigón en todos los túneles nuevos, al igual que se ha prescrito en España (Ministerio de Fomento, 2006).

No debe olvidarse que los incendios de los túneles son probablemente unos de los más severos que pueden producirse. Habida cuenta de las temperaturas muy elevadas, es de esperar que haya algunos desconchados en la superficie del hormigón (ver Sección 2). Se ha llevado a cabo un intenso esfuerzo de investigación para desarrollar materiales de revestimiento que minimicen los efectos del desconchado de las superficies de hormigón al verse sometidas a incendios severos (p.ej. Khoury, 2000). Hay una clara evidencia de que la incorporación en la mezcla de hormigón de fibras de polipropileno monofilamento es una solución eficaz y da lugar a un hormigón que puede “respirar” en caso de incendio, haciéndolo menos propenso a desconcharse.

El hormigón impide la contaminación del medio ambiente

El hormigón por sí mismo no produce humo o gases tóxicos en un incendio y puede ayudar a impedir la propagación de incendios y de sus emisiones de humo perjudiciales desde el punto de vista medioambiental. El empleo de compartimentos de hormigón y de muros de separación lleva consigo el que solamente un volumen limitado de mercancías pueda arder, lo que reduce la cantidad de productos de combustión, tales como humo, vapores, gases tóxicos y residuos dañinos. En el caso de un incendio, los contenedores o cortafuegos de hormigón pueden actuar también como barreras protectoras contra derrames de líquidos perjudiciales medioambientalmente o de agua de los equipos de extinción que se hayan contaminado. Durante un incendio, el hormigón no deposita hollín, que es difícil y peligroso de limpiar.

Seguridad frente al fuego en edificios residenciales

Los requisitos europeos sobre seguridad frente al fuego discutidos en la Sección 1, relativos a la seguridad de las personas mencionan específicamente los edificios residenciales

porque los riesgos son muy importantes – las casas y los edificios de apartamentos pueden estar densamente poblados y pueden tener elevadas cargas de fuego de los muebles e instalaciones, sin olvidar que los riesgos de las personas durmiendo son mayores que los de las que están despiertas. Todos estos factores llevan consigo que la vivienda merezca una consideración particular en el proyecto de la seguridad frente a incendios. No es el colapso estructural como consecuencia de un incendio el que da lugar a la mayoría de las muertes en un incendio residencial, sino la inhalación de humo o de gases de los materiales en combustión y como consecuencia la incapacidad de los ocupantes de escapar (Neck, 2002).

En Europa existen dos importantes informes que demuestran la mejora de la seguridad frente a incendios con una construcción en hormigón.

A. Una comparación de la seguridad frente al fuego en edificios residenciales de madera y de hormigón

En una comparación de la seguridad frente al fuego de las estructuras de hormigón y de madera, el profesor Ulrich Schneider, de la Universidad de Tecnología de Viena, identificó que se derivan siete riesgos específicos del empleo de un material de construcción combustible (como es la madera) en una estructura o un revestimiento de edificación (Schneider y Oswald, 2005); dichos riesgos se enumeran en el Cuadro 1.

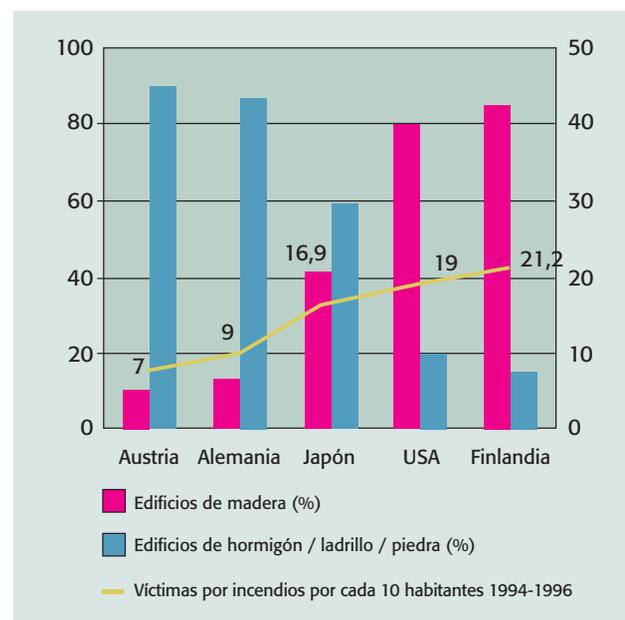
Cuadro 1: Riesgos de utilizar materiales de construcción combustibles

1. Un aumento en la carga de fuego
2. Un aumento del humo y de los productos de pirólisis
3. Mayores cantidades de monóxido de carbono
4. Ignición de elementos estructurales
5. Ignición dentro de los huecos de las construcciones
6. Peligro de combustión sin llama y de rescoldos imperceptibles (bolsas de brasas)
7. Mayor ocurrencia de deflagraciones

Schneider analizó las estadísticas de muertes por incendios en varios países y observó una clara correlación entre el número de víctimas de los incendios y los materiales de

construcción utilizados en los edificios, como puede verse en la Figura 4f. Su estudio pormenorizado de los detalles típicos de construcción con madera mostró que el fallo estructural en un incendio podía ocurrir tanto por la combustión y el colapso de los elementos estructurales, o no, como por los conectores metálicos de la estructura de madera, que se reblandecen al ser expuestos al fuego y pierden su capacidad de soportar cargas. Schneider encontró también que la propagación del fuego entre habitaciones adyacentes y/o pisos se aceleraba de forma significativa en los edificios en donde se habían utilizado materiales o revestimientos de madera como parte del muro exterior. En conclusión, el profesor Schneider destaca que la construcción con estructuras de madera presenta “una gran cantidad de puntos débiles en términos de resistencia al fuego” y recomienda que: “en principio, las estructuras porticadas de madera solamente pueden hacerse seguras utilizando sistemas de extinción automática de incendios o bien empleando materiales de construcción no inflamables para el revestimiento a prueba de incendios en todas las superficies inflamables, tal y como se indica en unas nuevas recomendaciones para la construcción de estructuras de madera” (Schneider y Oswald, 2005).

Figura 4f.- Muertes por incendio en comparación con el tipo de construcción en cinco países (1994–1996). (TUV de Viena, Austria, Schneider y Oswald, 2005).



B. Evaluación independiente del daño de incendios

En Suecia, Olle Lundberg llevó a cabo una investigación independiente del coste de los daños provocados por los incendios en relación con el material de construcción empleado en las casas, basándose en estadísticas de la Asociación de Seguros de Suecia (Forsakringsforbundet). El estudio se limitó a los incendios más importantes en edificios multifamiliares en los que el valor de la estructura asegurada era superior a 150 millones de euros; incluyó 125 incendios que se produjeron entre 1995 y 2004, los cuales suponían el 10% del total de los incendios en edificios multifamiliares y un 56% de los incendios más importantes. Los resultados mostraron que:

- La indemnización de seguro media por incendio y por apartamento en las casas de madera es del orden de 5 veces más que el de los incendios en edificios de hormigón/albañilería (aproximadamente 50.000 euros frente a 10.000 euros).
- Un incendio importante tiene una probabilidad 11 veces mayor de que tenga lugar en una casa de madera que en una construida con hormigón/albañilería.
- Un 50% de las casas de madera incendiadas tuvieron que ser demolidas, en comparación con solamente un 9% de las de hormigón.
- Solamente en 3 de los 55 incendios de las casas de hormigón el fuego se propagó a los apartamentos colindantes.
- De los 55 incendios, 45 se produjeron en los desvanes y en la cubierta; normalmente el fuego se inicia en los apartamentos situados en la planta de más altura, y se propaga al desván y a la cubierta (madera).

Estas investigaciones proporcionan una evidencia importante de los riesgos asociados con la construcción de estructuras de madera, y subrayan la necesidad de considerar todos los beneficios en cuanto a seguridad frente al fuego de la construcción con hormigón y albañilería. Como se ha mostrado en anteriores secciones de este documento, la combinación de la incombustibilidad del hormigón y de sus propiedades muy eficaces de protección frente al fuego es la mejor elección para tener unos edificios residenciales seguros.

Ejemplo 6

Incendio en una estructura de madera en construcción, Colindale, Londres (2006)

Durante la construcción de un importante complejo residencial nuevo en el área norte de Londres, se produjo un incendio y se quemaron varias estructuras de madera con una altura de seis plantas (Figura 4g). El incendio duró 5 horas y fueron necesarios 100 bomberos y 20 bombas para controlarlo. Los testigos indicaron que las estructuras se destruyeron en unos minutos. Poco después del incendio una estación de medición de la calidad del aire próxima registró un aumento importante de partículas tóxicas PM10, lo que podía tener unas repercusiones serias para la salud de las personas con dificultades respiratorias. Alrededor de 2.500 personas fueron evacuadas de los alrededores, una carretera principal se cerró durante 2 horas y la residencia de estudiantes de un colegio local se vio afectada tan severamente que los estudiantes no pudieron regresar. Afortunadamente,

Figura 4g.- El incendio en Colindale de los edificios residenciales con estructura de madera en construcción duró 5 horas y precisó 100 bomberos y 20 bombas para controlarlo. (Cortesía de John-Macdonald-Fulton, Reino Unido).



la urbanización todavía no había sido ocupada por los nuevos residentes, y muchas de las dependencias del colegio se encontraban vacías debido a las vacaciones de verano. Sin embargo, el trastorno fue importante. Los funcionarios locales encargados del control de la edificación señalaron que “si el forjado está proyectado en hormigón y se produce un incendio, éste se compartimentará. Si es de madera, ésta arderá completamente” (Building Design 21/07/06, p.1). En el momento de redactar este documento, al menos uno de los bloques de la urbanización iba a ser reconstruido, esta vez con hormigón.

El hormigón impide que el fuego se propague después de un terremoto

Las consideraciones de proyecto sísmico que son de aplicación en algunos países requieren que los proyectistas presten atención al problema específico de los incendios después de los terremotos. Ello se ha tenido en cuenta, adecuadamente, en países tales como Nueva Zelanda, en donde las estructuras de hormigón han sido identificadas con un bajo nivel de vulnerabilidad a la propagación del fuego después de un terremoto (Wellington Lifelines Group, 2002).

5. Protección de los bienes y del comercio

Las estructuras y edificios de hormigón son capaces de proteger de los peligros de los incendios tanto a las personas como a los bienes, pero comprensiblemente es a la seguridad de las personas a la que a menudo se da una importancia mayor, tanto en la fase de proyecto como en situaciones de emergencia. No obstante, la seguridad frente al fuego por razones de supervivencia económica, protección medioambiental y mantenimiento de la infraestructura crítica es también un tema importante para los propietarios privados, las compañías de seguros y las autoridades. Estos factores se han tenido en cuenta en la legislación europea sobre seguridad frente a incendios (ver Sección 1), en la que uno de los tres objetivos de protección está basado específicamente en la protección de los bienes y de las propiedades vecinas, así como en la preservación del edificio en si mismo.

El hormigón protege antes y después del incendio

El coste total en términos monetarios de los daños provocados por los incendios se ha estimado habitualmente entre

Tabla 4.- Datos estadísticos internacionales sobre incendios en edificios entre 1994 y 1996 (Neck, 2002).

País	Costes directos e indirectos de los daños del incendio (% PNB)	Muertes por cada 100.000 habitantes por año	Costes de las medidas de protección frente a incendios (% PNB)	Costes de los daños de las medidas de protección (% PNB)
Austria	0,20	0,79	Sin datos	Sin datos
Bélgica	0,40 (1988-89)	1,32	Sin datos	0,61
Dinamarca	0,26	1,82	Sin datos	Sin datos
Finlandia	0,16	2,12	Sin datos	Sin datos
Francia	0,25	1,16	2,5	0,40
Alemania	0,20	0,98	Sin datos	Sin datos
Italia	0,29	0,86	4,0	0,63
Noruega	0,24	1,45	3,5	0,66
España	0,12 (1984)	0,77	Sin datos	Sin datos
Suecia	0,24	1,32	2,5	0,35
Suiza	0,33 (1989)	0,55	Sin datos	0,62
Holanda	0,21	0,68	3,0	0,51
Reino Unido	0,16	1,31	2,2	0,32
Estados Unidos	0,14	1,90	Sin datos	0,48
Canadá	0,22	1,42	3,9	0,50
Japón	0,12	1,69	2,5	0,34

el 0'2 y el 0'3% del producto nacional bruto (PNB) anual (Tabla 4). Claramente, en los países europeos esto se traduce en muchos millones de euros, pero no da una indicación clara de la escala potencial del impacto de un incendio –Denoël/ Febelcem (2006). En Usine Enterprise (2004) se indica que más del 50% de los negocios quiebran después de sufrir un incendio importante. En las empresas comerciales como almacenes, hoteles, fábricas, bloques de oficinas y centros de distribución, los incendios perturban la función y productividad de los negocios e interrumpen el servicio al cliente. Esto causa problemas importantes y puede traducirse finalmente en pérdidas de empleos o cierres. Sin embargo, la escala del impacto en edificios que constituyen infraestructuras críticas puede ser incluso mucho mayor; este tipo de edificios incluye hospitales, estaciones de ferrocarril, plantas de distribución de agua y de generación de energía, edificios gubernamentales e instalaciones de almacenamiento de datos o de telecomunicaciones. Los trastornos en estos tipos de edificios son indeseables y potencialmente devastadores.

Con el hormigón, la protección frente al fuego es gratis

Esta afirmación puede resultar sorprendente, porque los datos globales del coste de la protección contra incendios indican que entre el 2 y el 4% de los costes de producción se dedican normalmente a medidas de protección contra el fuego (Tabla 4), pero con hormigón la protección contra el fuego es un beneficio intrínseco y por ello gratuito. De hecho, el hormigón tiene una reserva de seguridad frente al fuego que sigue siendo eficaz incluso después de un cambio de uso, o si el edificio se modifica. Las propiedades de seguridad frente al fuego del hormigón no cambian con el tiempo y se mantienen, sin que ello lleve consigo gastos de conservación.

Las propiedades inherentes de resistencia al fuego del hormigón le permiten satisfacer totalmente los requisitos de protección contra el fuego de forma económica; de alguna forma ello también le da una garantía de futuro frente a pequeños cambios que puedan producirse en la legislación de seguridad frente a incendios. Sin embargo, cuando se produce un incendio, es cuando adquiere más sentido la inversión en un edificio de hormigón. Tanto en casa como

en el trabajo, la continuidad de las actividades sociales y de negocios es una prioridad y es aquí donde el comportamiento del hormigón frente al fuego proporciona unos beneficios económicos inmediatos y significativos:

- Las propiedades de resistencia al fuego del hormigón significan que cualquier incendio queda confinado en una zona pequeña, habitación o compartimento minimizando el alcance y la magnitud de las reparaciones necesarias.
- Los trabajos de reparación de los edificios de hormigón afectados por un incendio son en general reducidos, fáciles de realizar y poco costosos porque a menudo son solamente zonas pequeñas de la superficie del hormigón las que requieren una reparación; la demolición total o parcial no es frecuente (ver Sección 3).
- Los compartimentos de hormigón formados por las paredes y los forjados impiden la propagación del incendio, de forma que las habitaciones adyacentes en una fábrica, almacén, oficina, o los apartamentos adyacentes dentro de un edificio de viviendas, podrían seguir funcionando en la forma habitual una vez finalizada la emergencia, sin importar en que estado se encuentre el área afectada por el incendio.
- En las instalaciones industriales y de negocios, los muros de separación contra incendios, de hormigón, impiden la pérdida de bienes valiosos, maquinaria, equipos o mercancías, limitando con ello el impacto en las actividades económicas y reduciendo el nivel de las compensaciones a pedir a las compañías de seguros.
- La experiencia muestra que en los edificios de hormigón son muy reducidos los daños causados por el agua como consecuencia de un incendio.

Menores primas de seguros con hormigón

Cualquier incendio provoca una pérdida económica y, en la mayoría de los casos, son las aseguradoras las que tienen que cubrir los daños provocados. Por esta razón, las compañías de seguros mantienen bases de datos detalladas y precisas sobre el comportamiento frente al fuego de los distintos materiales de construcción – saben que el hormigón proporciona una excelente protección frente al fuego y ello se refleja en unas

primas de seguros más reducidas. En los países europeos, las primas de seguros de los edificios de hormigón suelen ser menores que las de los edificios hechos con otros materiales (que a menudo se ven severamente afectados o incluso destruidos por el fuego). En la mayoría de los casos, los edificios de hormigón son clasificados en la categoría más favorable en los seguros frente a incendios, debido a su probada protección y resistencia frente al fuego. Por supuesto, cada compañía de seguros tiene sus propias prescripciones individuales y listas de primas. Éstas difieren según los países pero, debido al buen historial del hormigón, la mayor parte de dichas compañías ofrecen beneficios a los propietarios de los edificios de hormigón. Al calcular una prima de seguro, se tiene en cuenta los siguientes factores:

- Material de construcción
- Tipo de material de la cubierta
- Tipo de actividad o de empleo del edificio
- Distancia a los edificios vecinos
- Naturaleza de los elementos constructivos
- Tipo de sistema de calefacción
- Instalación(es) eléctrica(s)
- Protección y anticipación (prevención)

Ejemplo 7

Primas de seguros para almacenes en Francia

Desafortunadamente, muy pocos datos sobre costes de seguros están a disposición del público, pero existen algunos estudios comparativos. En Francia, Cimbéton (2006) publicó un resumen y un modelo de costes de seguros de naves industriales o para almacenamiento de una sola planta basado en los puntos de vista de las aseguradoras. El estudio muestra que dichas primas se establecen en base a varios factores, entre los que pueden mencionarse la actividad desarrollada dentro del edificio y el material de construcción (Tabla 5). El material de construcción es por supuesto importante – la estructura, paredes exteriores, número de pisos, cubierta y muebles son factores que se tienen en cuenta en los cálculos. Los resultados muestran claramente hasta qué punto el hormigón se prefiere a otros materiales, tales como el acero y la madera, en todas las partes del edificio. Por ejemplo, el seleccionar una estructura y unas paredes de hormigón en una nave de almacenamiento de una planta se traduce en una posible reducción de un 20%

en la prima “Standard”/media pagada. El cambiar a una estructura de acero con recubrimiento supondría un aumento de un 10 a un 12% en la prima “Standard”, lo que se traduce en una diferencia total de un 30% como mínimo. Al decidir la prima final, las aseguradoras tienen también en cuenta los equipos de seguridad, la protección contra el fuego y las medidas de supresión, lo que incluye la compartimentación – una opción de prevención de incendios en la que sobresale el hormigón.

Tabla 5.- Primas de seguros para un almacén de 10.000 m² (una planta, sin mobiliario); cantidad total asegurada = 25 millones de euros (Cimbéton, 2006).

Construcción	Prima anual (sin incluir impuestos). Prima media anual = 50.000 €
Hormigón	40.000 € (20 % menos que la media)
Metálica	56.000 € (12 % más que la media)

Ejemplo 8

Destrucción de matadero, Burdeos (1997)

Este espectacular incendio, provocado por un cortocircuito en el techo, se propagó muy rápidamente, afectando a 2000 m² en 10 minutos. Los bomberos tardaron tres horas en controlarlo y,

Figura 5a.- Los paneles sándwich ligeros se derrumbaron en este incendio de un almacén en Burdeos (Francia) en enero de 1997. El fuego se propagó a través del edificio así como a los edificios adyacentes. (Cortesía del SDIS 33, Servicio Departamental de Incendio y de Socorro, Gironde, Francia).



en este tiempo, se quemó la mitad de los 9000 m² del edificio. La causa de esta propagación extremadamente rápida fue la ignición del material aislante combustible de los paneles sándwich de la fachada del edificio – los bomberos no pudieron impedir que el fuego se propagara a lo largo de los 130 m de fachada (Figura 5a). Es evidente que la división del edificio en compartimentos mediante muros de hormigón y el empleo de paneles de hormigón en la fachada hubieran limitado la propagación de este incendio.

Ejemplo 9

Incendio en almacén de ropa, Marsella (1996)

El fuego se propagó rápidamente en este almacén de ropa y de artículos de deporte donde estaban trabajando en aquel momento 40 personas; en cinco minutos se incendió todo el edificio, generando las mercancías en llamas una gran cantidad de humo y de calor. No había aspersores ni tampoco muros de compartimentación, y la estructura del edificio era inestable frente al fuego, lo que dio lugar a la destrucción completa del mismo (Figura 5b). El viento contribuyó a la propagación del fuego, amenazando a los edificios adyacentes, situados a 10 m de distancia, en los que el personal tuvo que ser evacuado. Estos edificios solamente pudieron salvarse mediante una cortina de agua que crearon los bomberos.

Figura 5b.- Vista aérea, después de un incendio, mostrando cómo la propagación del fuego fue contenida por los paneles de hormigón. (Cortesía del SDIS 13, Servicio Departamental de Incendio y de Socorro, Bouches du Rhone, Francia).



El hormigón ayuda a los bomberos a salvar bienes

A pesar de la legislación europea que requiere la protección de las personas, los bienes y el medio ambiente, en la mayoría de los casos, la prioridad de las brigadas de bomberos es la protección de las vidas humanas y por ello los protocolos relativos a su entrada en un edificio incendiado tienden a estar basados en llevar a cabo, en primer lugar, la evacuación de los ocupantes y, en segundo lugar, la protección de las propiedades y del medio ambiente. Por ejemplo, los bomberos pueden mostrarse muy reticentes a entrar en un edificio si todos los ocupantes han sido evacuados. Pero siempre intentan aproximarse a los edificios, tan cerca como sea posible, a fin de combatir el fuego de forma eficaz. Las fachadas de hormigón proporcionan una protección que permite un enfoque de este tipo. Una vez que están convencidos de que todos los ocupantes se encuentran a salvo, los bomberos pueden preocuparse más de impedir la propagación del fuego a las propiedades adyacentes y evaluar cualquier tipo de riesgo para el medio ambiente provocado por los productos de combustión. Este enfoque comprensible refuerza la necesidad que tienen las personas de poder abandonar de forma segura un edificio dentro del periodo especificado de resistencia al fuego.

Estudios llevados a cabo en Francia muestran que de 13.000 incendios anuales, el 5% se produce en edificios industriales y que un incendio de gran tamaño puede traducirse en unos 2.000.000 de euros de pérdidas de actividad económica (Cimbéton, 2006). En estos edificios, las mercancías almacenadas pueden ser muy combustibles y estar presentes en cantidades muy grandes, lo que supone un riesgo muy importante de colapso en caso de incendio, a no ser que se dispongan de forma eficaz compartimentos para dividir las mercancías almacenadas y en consecuencia la carga de fuego. Considérese entonces el ejemplo de un propietario de almacén que desea minimizar los daños a las mercancías, en caso de incendio, pero sabe que la brigada de bomberos puede insistir en combatir el fuego desde fuera del edificio, a una distancia segura. En este caso, el hormigón puede proporcionar algunas ventajas apreciables:

1. Dependiendo del tipo de mercancías y del tamaño del compartimento, la carga de fuego en estos edificios

puede ser muy alta. Los muros interiores de compartimentación en hormigón, dispuestos a distancias regulares, reducen el riesgo de propagación del fuego de un espacio a otro, minimizando con ello el nivel de daño producido.

2. En los edificios de una sola planta, con luces largas y un solo compartimento, existe un riesgo muy elevado de que se produzca un colapso prematuro y repentino de la cubierta. Los muros de hormigón conservan su estabilidad e incluso si una cercha de la cubierta se hunde, los muros no ceden ni se derrumban, poniendo en peligro las áreas adyacentes.
3. Las fachadas resistentes al fuego construidas con hormigón (clasificadas como REI 120) impiden la propagación del fuego y protegen a los bomberos (Figura 1b). Estas fachadas permiten a los bomberos aproximarse un 50% más cerca porque actúan como un escudo de protección frente al calor.
4. Los muros exteriores de hormigón son tan eficaces para impedir la propagación del fuego entre propiedades que las regulaciones en algunos países (por ejemplo, en Francia) permiten reducir las distancias entre edificios adyacentes en relación con las requeridas con otros materiales de construcción de muros.
5. Una cubierta de hormigón es incombustible, es decir, de clase A-1 de protección frente al fuego y no gotea partículas fundidas.

Ejemplo 10

Mercado internacional de flores, Rungis, París (2003)

Los 7.200 m² de hormigón del almacén de flores y parking resistieron, en gran parte, un devastador incendio en junio de 2000 (Figura 5c). Las paredes y el techo soportaron bien el fuego, que generó una gran cantidad de calor y de gases cuando se incendiaron los materiales para formar los ramos y empaquetarlos, a lo que contribuyeron los aceites aromáticos de las plantas. Toda la parte sur de París se vio afectada por el humo que se produjo al quemarse una superficie de 1.600 m² ocupada por mercancías y equipos. Aunque se derrumbaron 100 m² del edificio, el fuego se pudo confinar a la zona en la que se había iniciado, y seis meses más tarde, después de una prolongada evaluación por las compañías de seguros, fue posible reparar el edificio y reanudar las actividades (Figura 5d).

Figura 5c.- Vista exterior del almacén de flores en Rungis, que reanudó sus actividades seis meses después del incendio. (Cortesía de CIMbéton, Francia).



Figura 5d.- El interior destruido del almacén, que fue reparado rápidamente. (Cortesía de CIMbéton, Francia).



6. El hormigón y la ingeniería de protección frente al fuego

Como funciona la ingeniería de fuego

La ingeniería de fuego (IF) es una forma relativamente nueva de calcular las medidas de protección frente al fuego, fundamentada en métodos basados en el comportamiento más que en tablas de datos prescriptivas. Ha sido utilizada hasta ahora principalmente con estructuras grandes y complejas (tales como aeropuertos y hospitales) para minimizar

los requisitos de las medidas de protección frente al fuego. No hay una única definición de la IF, pero ISO la define como la "Aplicación de métodos de ingeniería basados en principios científicos para el desarrollo o evaluación de proyectos de construcción a través del análisis de escenarios específicos de fuego o a través de la cuantificación del riesgo de incendio para un grupo de escenarios de incendio" (ISO/CD).

El procedimiento de diseño utilizado en la ingeniería de fuego tiene en cuenta los siguientes factores para establecer el valor de cálculo de la carga de fuego, a partir del cual pueden evaluarse los elementos estructurales individuales y establecerse la probabilidad conjunta de un incendio provocando daños estructurales:

- La densidad de carga de fuego característica por unidad de superficie de forjado (los valores de las mismas se dan en el EC1, partes 1-2).
- La carga de fuego esperada causada por la combustión del contenido (factor de combustión).
- El riesgo de incendio debido al tamaño del compartimento (a los compartimentos grandes se les asigna un mayor factor de riesgo).
- La probabilidad de inicio de un incendio basada en los ocupantes y el tipo de uso (factor de uso).

Por tanto, en el método de cálculo se tienen en cuenta todas las medidas activas para combatir el fuego dentro del edificio, las cuales se suman para obtener el factor quinto y final en el cálculo de la carga de fuego, lo que incluye:

- La detección automática del incendio (por ejemplo, alarmas de fuego, alarmas de humo, transmisión automática de las alarmas al cuartel de bomberos)
- La extinción automática del incendio (por ejemplo, sistemas de extinción con aspersores o agua, disponibilidad de un suministro de agua independiente)
- La extinción manual del incendio (por ejemplo, brigada de bomberos in situ, intervención rápida de brigada de bomberos externa/local).

La ingeniería de fuego en la práctica

No existen reglas comunes para los métodos de la ingeniería de fuego; los programas de ordenador de utilización

sencilla se encuentran todavía en fase de desarrollo y son significativas las diferencias en cuanto a enfoques, experiencia y niveles de aceptación por parte de las autoridades. La IF debe utilizarse con cuidado, recurriendo a expertos adecuados y a una evaluación correcta de las hipótesis adoptadas. Existen serias dudas sobre la validez y fiabilidad de sus cálculos probabilísticos, destacándose en las críticas que un cálculo defectuoso puede conducir a una catástrofe. También se han expresado temores de que el emplear sin experiencia la IF puede traducirse en errores en los cálculos y en resultados incorrectos. La gran variabilidad de los parámetros adoptados en los supuestos en los que se basan los cálculos puede abarcar, y no se limita a, los siguientes aspectos:

- Porcentajes de éxito de las brigadas de bomberos: de nuevo, se dan valores medios, pero está claro que no pueden ser aplicados a todos los edificios; hay variaciones importantes en cuanto a la eficacia de las mismas.
- Comportamiento humano: se han hecho hipótesis de cómo se comportan las personas en una emergencia, pero hay un alto grado de variabilidad relacionado con el comportamiento de las multitudes y los medios de escape.
- Fiabilidad de los sistemas de aspersores: se dispone de valores medios, pero existe una gran variedad de sistemas para poder adecuarse a los distintos tipos de edificios.
- Incendiarismo o incendios voluntarios/deliberados (es decir, provocados con fines criminales) – estos casos no están suficientemente cubiertos. Algunos tipos de edificios o de ubicaciones de los mismos pueden ser de forma natural más vulnerables a ellos.

Algunas estadísticas sobre el comportamiento en la práctica de los sistemas de aspersores muestran unos bajos niveles de fiabilidad. Tanto Febelcem (2006) como PCI (2005) informan sobre datos obtenidos en USA, en donde la National Fire Protection Association (Asociación Nacional de Protección contra Incendios) observó que los aspersores habían fallado en un 20% de los incendios de hospitales/oficinas, en un 17% en los de hoteles, en un 13% en los de apartamentos y en un 26% en los de edificios públicos, con un valor medio del 16% (cifras de 2001). Los datos de Europa mencionados en dicha publicación indican una situación ligeramente mejor.

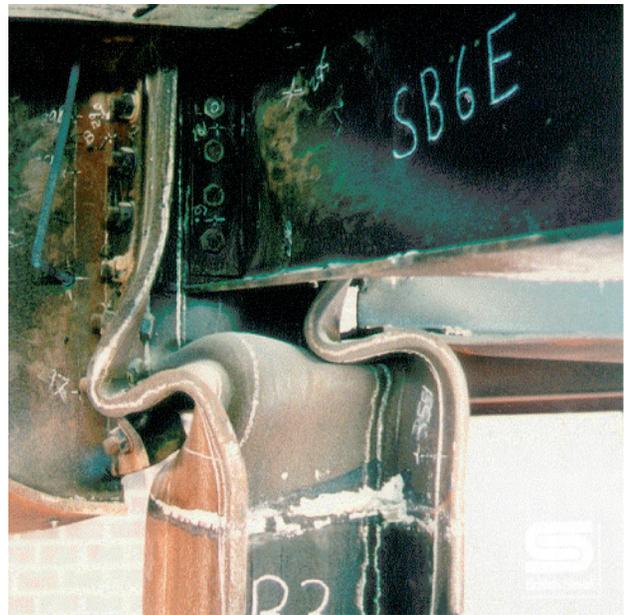
Los análisis de porcentajes de éxito por clases de riesgo han arrojado los siguientes resultados:

- Oficinas (riesgo alto): 97,4% de éxito
- Negocios (riesgo medio): 97,7% de éxito
- Industria de la madera (riesgo alto): 90,8 % de éxito.

Otras fuentes aducen que muchos de estos fallos son debidos a interferencias humanas en las cabezas de los aspersores (p.ej, por estar tapados con pintura, artículos colgando, etc.). No obstante, la eficacia de los sistemas de aspersores puede verse afectada por un problema inherente causado por la interacción entre los sistemas de humos (extracción) y los de aspersores. Varios estudios han mostrado que el agua de los aspersores enfría las columnas de humo, destruyendo su tendencia a ascender; con ello el humo no se eleva, lo que produce una pérdida de visibilidad durante la evacuación (Heselden, 1984; Hinkley e Illingworth, 1990; Hinkley et al., 1992). Por otra parte, el movimiento de ascenso de las columnas de humo generado por los sistemas mecánicos automatizados de extracción de humos impiden a las gotas de agua descender de formar eficaz para sofocar el incendio.

Los métodos de proyecto utilizados en la IF están basados en la premisa de que la inclusión de las diferentes medidas de protección activas contra incendios disminuye la probabilidad de que un incendio provoque daños estructurales (Figura 6a); una combinación de estas medidas tiene un efecto multiplica-

Figura 6a.- Cabeza de pilar seriamente dañada como consecuencia de un incendio (Cortesía de Building Research Establishment, Reino Unido).



tor, reduciendo todavía más la densidad supuesta de carga de fuego en el edificio. Por ello el método de cálculo disminuye aparentemente la protección frente a incendios. El resultado es que algunos materiales de construcción, que de hecho tienen una débil resistencia al fuego y dependen totalmente de las medidas activas de protección, pueden aparecer como opciones estructurales viables (Cuadro 2).

Cuadro 2.- Por qué la IF puede no funcionar.

Los sistemas de extinción de incendios pueden no ser eficaces porque:

- Fallen
- No sean adecuados para el incendio

La protección contra incendios puede no funcionar porque:

- Falle
- Haya envejecido
- Se haya deteriorado
- No sea adecuada para el incendio

En esta situación, la capacidad de resistencia al fuego de la estructura puede reducirse a la inherente de los materiales que la forman, ya sean hormigón, madera, ladrillo o acero.

En estos casos la estrategia de la IF puede fallar de forma instantánea, porque los elementos sin proteger de acero y madera no mantendrán su capacidad portante si no funcionan completamente los sistemas activos de protección contra incendios.

En los casos normales el hormigón es el único material que puede proporcionar una resistencia al fuego sólida sin ayuda de medidas activas; es una medida pasiva que se comporta de modo fiable cuando fallan las medidas activas. La ingeniería de fuego puede subestimar algunas medidas de protección pasivas probadas y que no precisan mantenimiento, como son las estructuras de hormigón; ello puede conducir a una sobreestimación poco afortunada de sistemas activos poco fiables, poniendo potencialmente en riesgo las vidas y los bienes.

Con el hormigón, las medidas de protección contra incendios pueden ser aplicables incluso si se ha producido un cambio de uso, porque se trata de un material con una resistencia al fuego inherente. Si la protección la proporciona la IF, únicamente es de aplicación si no hay un cambio de actividad. Ello es debido a que las medidas de IF se determinan teniendo en cuenta el uso del edificio. Si se produce alguna variación, por ejemplo en la carga de fuego, la protección proporcionada por los aspersores o los recubrimientos ignífugos puede no ser ya suficiente.

7. Los beneficios de valor añadido del hormigón

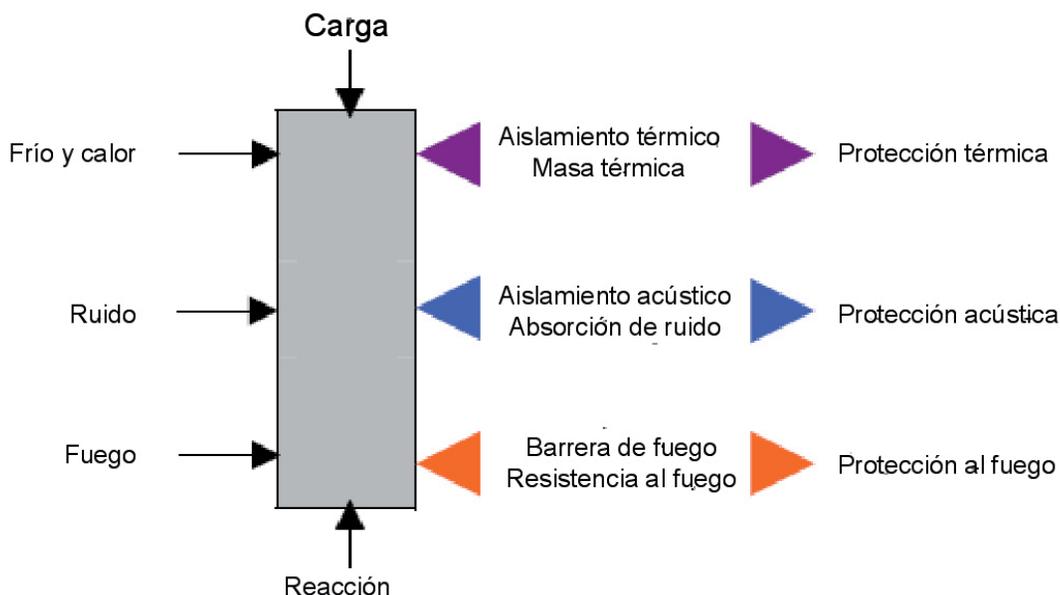
Las excelentes y probadas propiedades de resistencia al fuego del hormigón protegen la vida, los bienes y el medio

ambiente. Responde de forma eficaz a todos los objetivos de protección planteados en la legislación europea, beneficiando a todos, desde usuarios de edificios, propietarios, hombres de negocios y residentes hasta las aseguradoras, prescriptores y bomberos. Ya sea utilizado en edificios residenciales, almacenes industriales o túneles, el hormigón puede ser diseñado para permanecer estable incluso en los incendios más extremos.

El hormigón no solamente tiene una mayor resistencia al fuego, sino que además proporciona masa térmica y aislamiento acústico.

La combinación de estas tres propiedades permite al proyectista maximizar sus posibles beneficios (Figura 7a). Por ejemplo, el disponer unos muros de separación de hormigón entre los compartimentos de incendio adyacentes, proporciona la protección necesaria frente al fuego, añade masa térmica para ayudar a mantener las temperaturas y crea una separación acústica entre espacios. Todo esto es posible con solamente un material, sin tener que confiar en medidas activas, la instalación de un aislamiento adicional o de materiales intumescentes, o en operaciones frecuentes de conservación o de acondicionamiento. Evidentemente, el hormigón tiene una ventaja mayor a largo plazo en términos económicos a este respecto, pero mucho más importante es la ventaja a largo plazo desde el punto de vista de la seguridad frente al fuego.

Figura 7a.- Los beneficios de valor añadido del hormigón. (Cortesía de Neck, 1999).





American Society of Civil Engineers (2003) The Pentagon building performance report, ASCE, Washington, USA.

Beese, G y Kurkchubasche, R. (1975). Hochhaus Platz der Republik in Frankfurt am Main. Teil III Der Brand vom 22 August 1973. Beton- und Stahlbetonbau, 70 (1975) H. 8, S. 184/188. Alemania.

CEMBUREAU (2004). Improving fire safety in tunnels: the concrete pavement solution, CEMBUREAU, Bruselas, Bélgica.

Chana, P and Price, B (2003). The Cardington fire test, Concrete- the magazine of The Concrete Society, January, pág. 28-33. Camberley, Reino Unido.

CEN EN 1991-1-2(2002). Eurocode , Part 1-2: Actions on structures - General actions - Actions of structures exposed to fire. CEN, Bruselas, Bélgica.

CEN (2004). EN 1992-1-2 (2004) Eurocode 2 Part 1-2: Design of concrete structures - General rules -Structural fire design. CEN, Bruselas, Bélgica.

CEN (2002) EN 13501-1. Fire classification of construction products and building elements - Part 1: Classification using test data from reaction to fire tests. CEN, Bruselas, Bélgica.

CIMbéton (2006). Conception des batiments d'activités en béton: Murs séparatifs coupe-feu et façades à fonction d'écran thermique en beton (B67), Cimbéton, París, Francia.

Denoël, J.-F. (2006). Dossier ciment 37: La protection incendie par les constructions en béton, Febelcem, Bruselas, Bélgica.

Denoël, J.-F. (2006). Fire safety and concrete structures (en francés e inglés), Febelcem, Bruselas, Bélgica. (disponible en www.febelcem.be).

Heselden, A.J.M. (1984). The interaction of sprinklers and roof venting in industrial buildings: the current knowledge. BRE, Garston, Reino Unido.

Hinkley, P. L. e Illingworth, P. M. (1990). The Ghent fire tests: observations on the experiments, Colt International, Havant, Hants, Reino Unido.

Hinkley, P. L., Hansell, G. O., Marshall, N. R. y Harrison, R. (1992). Sprinklers and vent interaction, Fire Surveyor,. 18-23. Reino Unido.

Horvath, S. (2002). Fire safety and concrete: fire safety and architectural design, Cimbéton, París, Francia. Presentado en el 1er Seminario Avanzado sobre Hormigón y Arquitectura, Lisboa, Portugal.

INTEMAC (2005). Fire in the Windsor Building, Madrid. Survey of the fire resistance and residual bearing capacity of the structure after fire, Notas de Información Técnica (NIT), NIT-2 (05), (en español e inglés). Intemac (Instituto Técnico de Materiales y Construcciones), Madrid, España.

ISO/CD 23932. Fire safety engineering - General principles, (en preparación).

Khoury, G. (2000). Effect of fire on concrete and concrete structures. Proceedings in Structural Engineering Materials, Vol. 2, pág. 429-447.

Lennon, T. (2004). Fire safety of concrete structures: background to BS 8110 fire design, Building Research Establishment (BRE), Garston, Watford, Reino Unido.

Lundberg, O. (2006) Brandrapport2006, Undersökning av brander i flerbostadshus, disponible en: <http://www.betong.se/brandrapport2006.pdf> Betongforum, Danderyd, Suecia.

Ministerio de Fomento (2006). Real Decreto 635/2006, de 26 de mayo, sobre requisitos mínimos de seguridad en los túneles de carreteras del Estado. Boletín Oficial del Estado, 27 de mayo de 2006, Madrid, España, pág. 19970 a 19985.

MUNICH RE (2003). Risk management for tunnels, Munich Re group, Munich, Alemania.

Naryanan, N. y Goodchild, C. H. (2006) Concise Eurocode 2, The Concrete Centre, Camberley, Reino Unido.

Neck, U (1999). Comprehensive performance of precast concrete components through integrated utilization of the material and component properties. Proceedings of BIBM 16th International Congress of the Precast Concrete Industry in Venice, pp. 1-69-74. Milán, Italia ASSOBETON, Asociación Nacional del Prefabricado de Hormigón.

Neck, U. (2002). Comprehensive fire protection with precast concrete elements - the future situation in Europe, Proceedings del 17º Congreso Internacional BIBM de la Industria del Hormigón Prefabricado, Ankara, Turquía (solamente en CD).

NIST. Federal Building and Fire Safety investigation of the World Trade Centre disaster: Final report of the National Construction Safety Team on the collapse of the World Trade Center Tower. NCSTAR 1.

Schneider, U. y Oswald, M. (2005). Fire safety analysis in concrete and timber frame construction (en alemán e inglés), Institute for Building Construction and Technology, Vienna University of Technology, Viena, Austria.

Stollard, P. y Abrahams, J. (1995). Fire from first principles: a design guide to building fire safety (2ª edición), E&FN Spon, Londres, Reino Unido.

Szoke S S. (2005). Are we protected from fire in buildings? PCI Journal, enero -febrero 2005. PCI, USA.

Usine entreprise (Factory business) nº. 3031, noviembre 2004. Bruselas, Bélgica.

Wellington Lifelines Group (2002). Fire following earthquake: identifying key issues for New Zealand. Wellington Lifelines Group, Wellington, Nueva Zelanda.

SEGURIDAD FRENTE AL FUEGO UTILIZANDO HORMIGÓN

PLATAFORMA TECNOLÓGICA ESPAÑOLA DEL HORMIGÓN

El hormigón ofrece protección y seguridad frente al fuego para las personas, las propiedades y el medio ambiente(*)

- El hormigón no es combustible, por tanto no se suma a la carga de fuego del edificio, **no alimenta el fuego** ni contribuye a que el incendio se extienda.
- El hormigón **ofrece una elevada resistencia** al fuego. Las estructuras de hormigón soportan incendios severos **sin colapsar**.
- El hormigón **protege a los usuarios de los edificios y a los bomberos**. Permite la evacuación del edificio y los trabajos de control y extinción del incendio en condiciones de estabilidad estructural.
- El hormigón empleado en los elementos de compartimentación **limita el área afectada por el incendio**, facilitando la extinción del mismo y limitando los daños.
- El hormigón **no produce humo ni gases tóxicos**, reduciendo el riesgo de las personas y de polución medioambiental y contribuyendo a una construcción más sostenible.
- Las estructuras de hormigón **ofrecen una elevada robustez** en su comportamiento frente al fuego, facilitando la lucha contra el incendio en condiciones de estabilidad estructural, reduciendo el riesgo de colapso aún en condiciones de fuegos muy severos y **evitando los elevados daños, propios y colaterales**, que producen el derrumbamiento de un edificio.
- El hormigón **reduce las consecuencias** del incendio. Evita pérdidas humanas y patrimoniales.
- El hormigón resiste al fuego sin necesidad de protección alguna, por tanto **ofrece seguridad frente al fuego de modo permanente** y continuo sin puntos débiles, incluso durante la construcción.
- El hormigón, al no necesitar de capas de protección, **evita los elevados costes de mantenimiento** de las mismas, incluyendo los costes de accesibilidad a todos los puntos de la estructura a lo largo de toda la vida de servicio del edificio.
- Después del incendio el hormigón **es fácilmente reparable** y facilita la vuelta a la actividad del edificio, reduciendo las consecuencias de éste.
- El hormigón **no se degrada por efecto del agua** utilizada durante la extinción del incendio.

(*) Textos extraídos del documento "Seguridad y protección completa frente al fuego con hormigón" de la Plataforma Europea del Hormigón.

- El hormigón **ofrece resistencia pasiva frente al fuego** y, por tanto, una resistencia última, inherente al material estructural, capaz de ofrecer estabilidad y evitar el colapso del edificio incluso en condiciones de incendios muy severos.
- El hormigón utilizado como pavimento en túneles no desprende gases tóxicos, no alimenta el incendio, ofrece una superficie de rodadura capaz para los servicios de bomberos y de salvamento y resiste la acción del fuego incluso en incendios muy severos.

El fuego daña, en general, a todos los materiales habitualmente empleados en la construcción. Aquellos que son combustibles se suman a la carga de fuego que configura el contenido del edificio y se consumen a lo largo del incendio. Los que no son combustibles se ven sometidos a un proceso de disminución de su capacidad resistente y de su rigidez, así como a deformaciones impuestas por la elevada temperatura que provoca el fuego.

La resistencia al fuego es una prestación que ofrecen los materiales no combustibles que, además, son capaces de soportar elevadas temperaturas manteniendo un grado de resistencia tal que permite que las estructuras con ellos construidas no colapsen.

La Tabla 1, extraída del documento “Seguridad y protección completa frente al fuego con hormigón” de la Plataforma Europea del Hormigón, refleja el comportamiento en condiciones de incendio de los materiales más habitualmente utilizados en la construcción de las estructuras de los edificios.

Para el comportamiento mecánico de las estructuras frente al fuego, en términos de estabilidad estructural, tiene una importancia primordial la fila que se refiere a “Conductividad del calor”.

Refiriéndonos a los materiales de carácter estructural más habituales y no combustibles, es decir el acero y el hormigón, la diferencia de conductividad del calor, muy alta para el acero y muy baja para el hormigón, determina comportamientos absolutamente diferentes de ambos materiales frente al fuego.

El hormigón estructural, armado y pretensado, combina el material acero de las armaduras y el hormigón que conforma el elemento estructural y que, mediante el espesor del recubrimiento, protege al acero del exterior.

El acero, como material de alta conductividad térmica, se calienta de modo inmediato, de modo que expuesto directamente al incremento de temperaturas producido por el fuego adquiere, inmediatamente y en toda su sección, la temperatura que se alcanza en el incendio. La sección de hormigón no se comporta de la misma manera, calentándose mucho más lentamente. Su sección interior alcanza temperaturas inferiores a las que, en ese instante, se alcanzan en el incendio.

La Tabla 2, deducida del documento “Méthode de prévision par le calcul du comportement au feu des structures en béton (x PP92701/A1, Décembre 2000)”, indica la evolución en el tiempo de la temperatura que se desarrolla en un incendio, de acuerdo con la curva de fuego normalizado, así como

Tabla 1.- Análisis comparativo del comportamiento de los materiales frente al fuego.

	Madera	Acero	Hormigón
Resistencia al fuego sin protección	Muy baja	Baja	Alta
Combustibilidad	Alta	Ninguna	Ninguna
Contribución a la carga de fuego	Alta	Ninguna	Ninguna
Conductividad del calor	Baja	Muy alta	Muy baja
Incorpora protección frente al fuego	Muy baja	Baja	Alta
Posibilidad de reparación después del fuego	Ninguna	Baja	Alta
Protección para los usuarios durante la evacuación y los bomberos	Baja	Baja	Alta

Tabla 2.- Temperaturas - Tiempos.

Tiempo t (minutos)	Temperatura alcanzada (°C)			
	En el incendio	En el acero estructural sin protección	En la armadura con un recubrimiento r (mm)	
			r = 30	r = 45
30	815	815	205	140
60	925	925	370	270
90	990	990	490	350
120	1.030	1.030	570	425
150	1.070	1.070	620	490
180	1.100	1.100	660	510

Tabla 3.- Pérdidas de resistencia - Temperatura.

Temperatura (°C) T (°C)	Pérdida de resistencia (%)	
	Acero armadura	Hormigón
20	0	0
400	15	15
500	30	30
600	60	40
700	85	60

la temperatura que alcanzaría durante el mismo un acero estructural sin protección y un acero para hormigón en el interior de una losa de hormigón de 10 cm de espesor a diversas profundidades, medidas desde la superficie exterior que sufre el incendio. Si en esta losa se dispusiera una armadura de acero, a las diversas profundidades a las que nos referimos las llamaríamos "recubrimientos" y las temperaturas indicadas serían las temperaturas que alcanzaría el acero de la armadura dispuesta, en función del recubrimiento.

La Tabla 3, deducida del Eurocódigo 2: "Design of concrete structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design" (ENV 1992-1-2), indica la pérdida de resistencia del acero de la armadura (f_{yk}) de un hormigón armado y de la resistencia a compresión del propio hormigón con árido silíceo (f_{ck}), en función de la temperatura alcanzada por el material. Como puede observarse, la resistencia de ambos materiales se reduce al 70% de la que inicialmente tenían a 20°C cuando alcanzan una temperatura de 500°C.

Por otra parte la combinación de cargas con que se comprueba la resistencia al fuego de una estructura es, en

general, la correspondiente a la situación accidental, con todos los coeficientes de mayoración iguales a la unidad, y, además, con el valor de la sobrecarga frecuente (caso de la determinante) y el valor casi permanente de las demás sobrecargas concomitantes con la determinante. Se trata, en consecuencia, de un estado de cargas inferior a aquel que se ha utilizado para el dimensionado de la estructura en los diferentes Estados Límite Últimos. Es habitual considerar que la totalidad de las cargas (valores ponderados), representa el 70% del valor mayorado utilizado para asegurar la resistencia de la estructura en los Estado Límite Últimos.

Las razones anteriormente expuestas son la base del dimensionado de las estructuras frente a la acción del fuego. De acuerdo con la Instrucción EHE, que es un reglamento de obligado cumplimiento en España, y también de acuerdo con el Eurocódigo 2: "Design of concrete structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design". Se utiliza un procedimiento simplificado de dimensionado consistente en disponer secciones de hormigón con dimensiones adecuadas a la resistencia al fuego requerida, que se indican en unas tablas de uso directo. Las mismas tablas indican el recubrimiento de

cálculo que debe tener la armadura dispuesta así como las precauciones a considerar según el fuego alcance al elemento de hormigón en una, dos, tres o las cuatro caras.

Con todo ello se pretende, en general y de modo resumido, que el centro de gravedad de la armadura de acero dispuesta se sitúe coincidiendo con la isoterma 500, posición interior a la sección de hormigón donde la temperatura máxima durante el incendio no supera los 500°C y, por tanto, se puede contar con una capacidad de la sección resistente, durante el incendio, del orden del 70% de la capacidad de dicha sección a 20°C. De este modo, se mantiene la estabilidad estructural durante el incendio evitando el colapso de la misma y el derrumbamiento del edificio.

La acción del fuego, como situación accidental, exige de las estructuras una capacidad resistente que permita desalojar a las personas del edificio incendiado y actuar a los bomberos para extinguir el incendio, todo ello en condiciones de estabilidad estructural para evitar la pérdida de vidas humanas. La hipótesis de considerar la posibilidad de colapso estructural y el derrumbamiento del edificio es inadmisibles porque conlleva un alto riesgo de que se produzcan víctimas entre los usuarios del edificio, los bomberos y las personas afectadas en el área colindante al derrumbamiento del edificio, así como que las pérdidas patrimoniales originadas por el derrumbamiento del edificio superen las correspondientes al propio edificio. Es decir, el dimensionado de la resistencia al fuego de una estructura pensando únicamente en que se mantenga estable el tiempo suficiente para evacuar el edificio es insuficiente e irresponsable. Las temperaturas del incendio correspondientes a las especificaciones actuales de resistencia al fuego (en términos de integridad estructural) deben ser soportadas por la estructura sin pérdida de la estabilidad estructural para evitar, así, el colapso estructural que produce el derrumbamiento del edificio.

En este sentido la fortaleza última de la estructura, tras la que sobreviene el colapso de la misma, depende de la resistencia esencial o intrínseca del material constituyente, es decir aquella que aporta el material sin considerar el efecto reductor de las temperaturas ocasionado por los medios de extinción (sprinklers, etc.), por las protecciones que se colocan sobre la estructura (pinturas, gunitados, etc.), o por la acción directa de los equipos de extinción, ya que todo esto puede

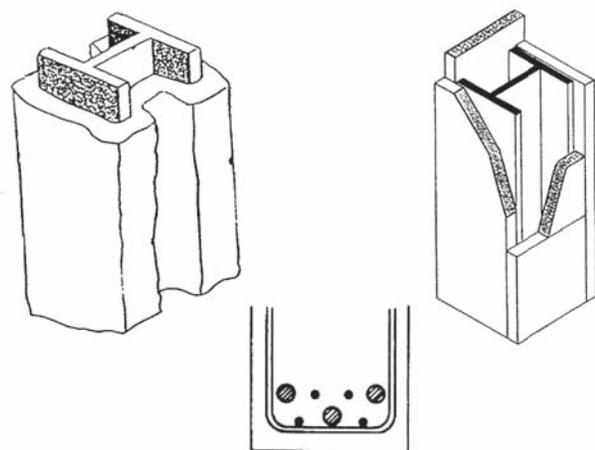
fallar en mayor o menor medida en el momento del incendio (aleatorio). Desde este punto de vista la continuidad del hormigón en una estructura es absoluta y asegura el buen comportamiento, sin fallos, de las estructuras de hormigón que constatan los servicios de bomberos.

La consideración de los datos recogidos en las Tablas 2 y 3 lleva a la conclusión de que el dimensionado de las estructuras frente al fuego pasa por la necesidad de proteger el acero en cualquier tipo de estructura y que el hormigón es una buena protección de dicho acero. La Figura 1 recoge diversas protecciones del acero, incluida la que ofrece el hormigón en el caso de las estructuras de hormigón estructural.

Proyectar en condiciones de fuego es proyectar las protecciones del acero. El hormigón protege el acero de modo eficaz, continuo, permanente, sin la existencia de puntos débiles mal protegidos y es una defensa que no envejece, no se deteriora y no necesita de un mantenimiento específico para que cumpla su función protectora.

La Figura 2 muestra la curva de temperatura del fuego normalizado (ISO 834) utilizada para el dimensionado de las estructuras frente al fuego y las curvas de temperatura correspondientes a diversos redondos de armadura de acero dispuestos en el interior de la sección de hormigón estructural con diversos recubrimientos. Se observa la gran diferencia entre la tempera-

Figura 1.- Secciones metálicas protegidas frente al fuego y sección de hormigón estructural resistente al fuego.



tura del incendio y, en consecuencia, de la cara de la sección de hormigón y la temperatura en los redondos, más baja, para el mismo tiempo de fuego normalizado, cuanto mayor es el recubrimiento, debido al efecto protector del hormigón.

En la misma Figura 2 se indica, mediante puntos, la curva de temperaturas correspondientes a un fuego paramétrico, deducido de fuegos reales. Estos últimos tienen final, el fuego normalizado no tiene final. No obstante, la rama inicial de crecimiento de la temperatura en los fuegos reales es similar y en ocasiones superior a la correspondiente al fuego normalizado.

También se indica, mediante puntos, la curva de temperaturas de los redondos, interiores a la sección de hormigón estructural, sometidos a la acción del fuego paramétrico considerado. Se observa que, como la acción protectora del hormigón retrasa la subida de temperatura en las armaduras, el final del incendio puede limitar la temperatura en las mismas acotándola y contribuyendo a que se mantenga la estabilidad estructural aún en fuegos muy severos.

La Figura 3 muestra las líneas isotermas en el interior de una sección de hormigón estructural correspondiente a un nervio de 16 cm de anchura con un fuego por las tres caras que produce una temperatura de 1.000°C en la superficie expuesta de dichas caras.

Las estructuras porticadas de hormigón, debido a su carácter hiperestático, permiten una cierta redistribución de esfuerzos cuando alguna sección suficientemente dañada plastifica. Esta redistribución colabora con el mantenimiento de la situación de estabilidad estructural. Tal distribución se basa en que el fenómeno de plastificación no da lugar a problemas de inestabilidad en las zonas comprimidas de la sección de hormigón que, por su configuración geométrica, se mantiene muy alejada de ellos. Cuando las secciones comprimidas son chapas de acero el fallo por inestabilidad de la sección puede producir el colapso de la estructura antes de que se produzcan fenómenos de redistribución plástica.

Por todo lo expuesto, el hormigón estructural es el material de construcción más indicado para realizar estructuras que de modo eficaz y competitivo aporten seguridad frente al fuego.

Hay que hacer notar que la resistencia al fuego se interpreta en los códigos modernos como una condición de la estructura que, además de permitir a las personas desalojar el edificio incendiado, evita el colapso estructural que acarrearía graves consecuencias tanto en el edificio afectado como en los colindantes y en las infraestructuras urbanas que lo circundan. Los requisitos actuales de resistencia al fuego se muestran suficientemente seguros cuando la estructura es de hormigón. El futuro, para el bien de la sociedad, no está en

Figura 2.- Comparación Curvas - Redondos intermedios.

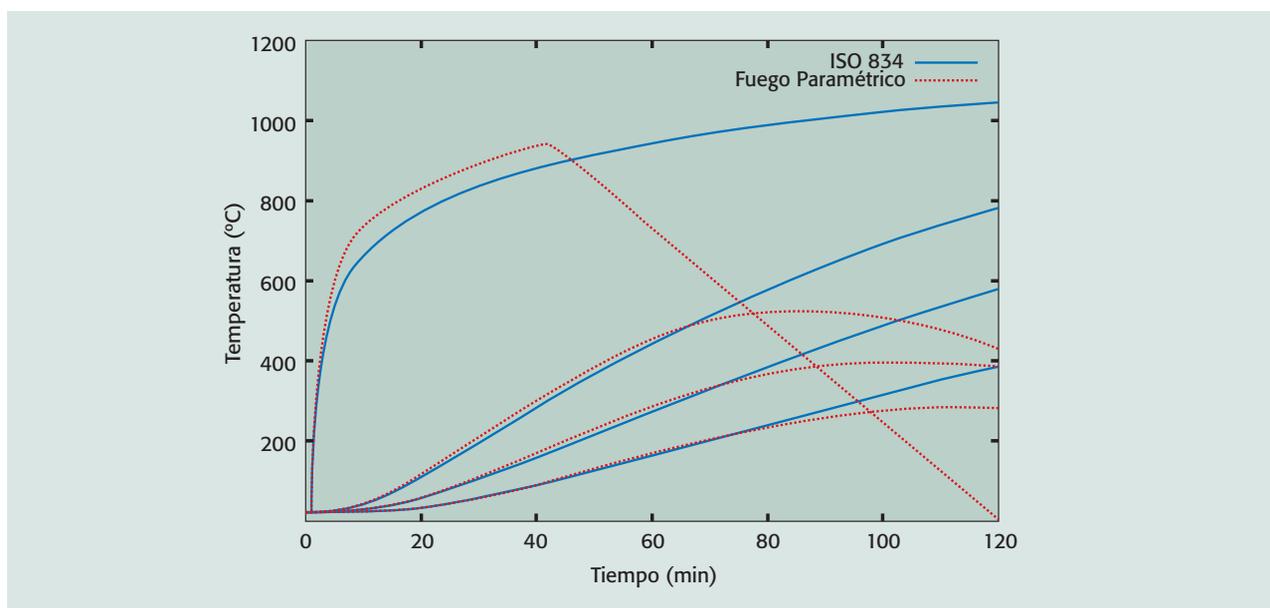
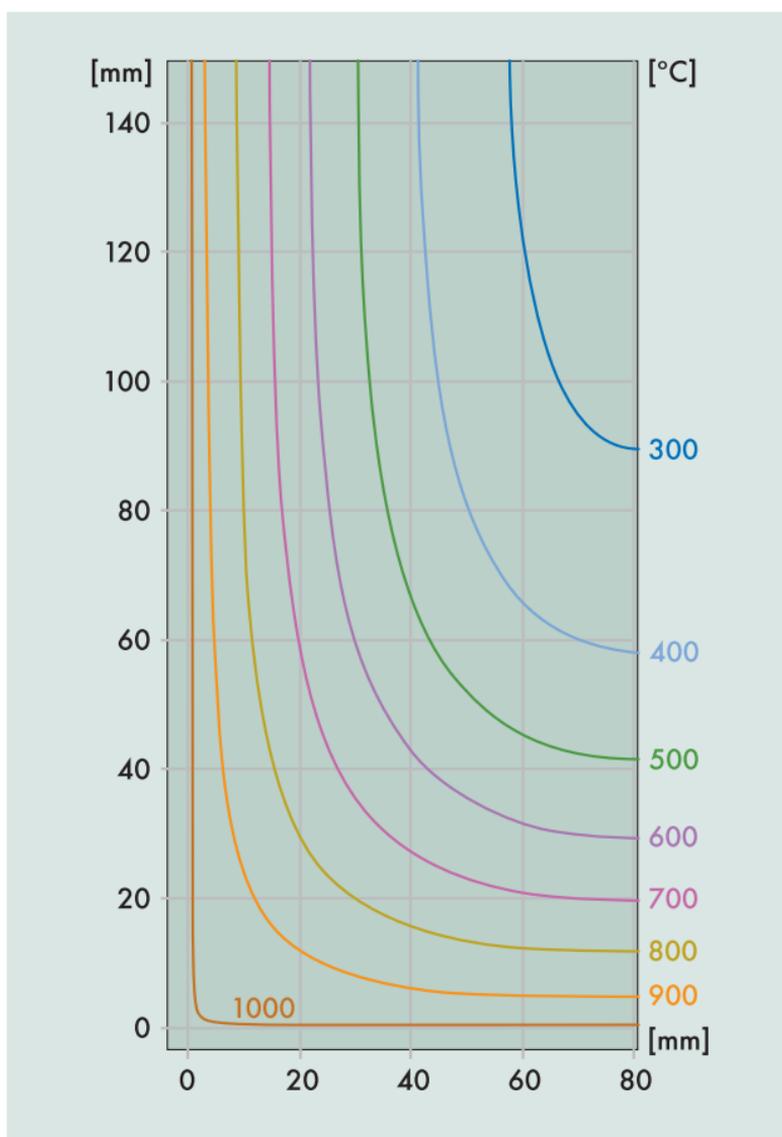


Figura 3.



reducir los requisitos sino en emplear las estructuras adecuadas para evitar el colapso estructural tales como las estructuras mixtas y las de hormigón estructural que se manifiestan como las más adecuadas y competitivas para tal fin.

Cuanto mejor sea la protección frente al fuego, en términos de compartimentación del incendio y en términos de resistencia al fuego para evitar el colapso estructural, mayor será la seguridad de los usuarios y de los patrimonios tanto públicos como privados. Estos aspectos con indudable relevancia social y económica inciden decisivamente en el índice de sostenibilidad del edificio construido, de modo que una mejor y mayor resistencia al fuego eleva la sostenibilidad de la construcción.

En definitiva, el hormigón ofrece protección y seguridad frente al fuego para las personas, las propiedades y el medio ambiente y, por tanto, su empleo aumenta la sostenibilidad de lo construido.