

SEGURIDAD FRENTE AL FUEGO DE LAS ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN

LUIS VEGA CATALÁN

ARQUITECTO

INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA CONSTRUCCIÓN EDUARDO TORROJA

MANUEL BURÓN MAESTRO

DR. INGENIERO DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

INSTITUTO ESPAÑOL DEL CEMENTO Y SUS APLICACIONES

Se exponen las bases del buen comportamiento de las estructuras de hormigón frente al fuego y los principios del dimensionado de las mismas a tal fin.

La resistencia última al fuego de una estructura depende de la resistencia al fuego del material constituyente, sin considerar las protecciones, que podrían estar en un mal estado de conservación, ni los medios de extinción, que podrían fallar. Desde este punto de vista la continuidad del hormigón es absoluta y asegura, permanentemente, un buen comportamiento de la estructura frente al fuego.

Las estructuras de hormigón proporcionan la resistencia al fuego requerida de modo eficaz y competitivo, como se ha constatado con el informe sobre el comportamiento de la estructura del Edificio Windsor de Madrid que resistió la acción del fuego durante un severo incendio.

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 siguiente, extraída del Documento "Seguridad y protección completa frente al fuego con hormigón" de la Plataforma

	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

Europea del Hormigón, establece cómo los materiales más habituales empleados para construir las estructuras de los edificios se caracterizan por su comportamiento en condiciones de incendio.

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 material hormigón que conforma el elemento estructural y que, mediante el espesor del recubrimiento, separa al acero del exterior.

El acero, como material con alta conductividad térmica, se calienta de modo inmediato, de forma tal 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. No se comporta de la misma manera la sección de hormigón que se calienta mucho más lentamente alcanzando temperaturas, en el interior de la misma, inferiores a las que, en ese instante, se alcanzan en el incendio.

La Tabla 1, deducida del documento "Méthode de prévision par le calcul du comportement au feu des structures en béton (XP P92701/A1, Décembre 2000)", indica la temperatura que se alcanza en un incendio, de acuerdo con la curva de fuego normalizado, en función del tiempo que dura el mismo, la temperatura que alcanzaría un acero estructural sin protección y aquella que alcanzaría 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"

Tabla 1.- 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	1030	1030	570	425
150	1070	1070	620	490
180	1100	1100	660	510

y las temperaturas indicadas serían las temperaturas que alcanzaría el acero de la armadura dispuesta, en función del recubrimiento.

La Tabla 2, deducida del Eurocódigo 2: Diseño de estructuras de hormigón. Parte 1-2: Resistencia al fuego (ENV 1992-1-2), indica la pérdida de resistencia a tracción 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.

Tabla 2.- Pérdidas de resistencia – Temperatura.

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

De las tablas anteriores se deduce que la resistencia de los materiales cuando alcanzan una temperatura de 500° C se reduce al 0'70 de la que presentan a 20° C.

Tabla 3.- Disminución del Módulo de Elasticidad – Temperatura

Temperatura (°C)	Disminución del módulo de elasticidad (%)	
T (° C)	Acero armadura	Hormigón
20	0	0
400	30	75
500	40	83
600	70	90
700	87	90

La Tabla 3, deducida del Eurocódigo 2: Diseño de estructuras de hormigón. Parte 1-2: Resistencia al fuego (ENV 1992-1-2), recoge la disminución, en tanto por ciento, del Módulo

de Elasticidad del acero de las armaduras y del hormigón con árido silicio en función de la temperatura alcanzada por el material.

La fuerte disminución de los módulos de elasticidad hace que la estructura bajo la acción del fuego sea mucho menos rígida, por lo que su deformabilidad aumenta y puede aceptar las elevadas deformaciones impuestas por el incremento de temperatura sin que aparezcan esfuerzos de importancia.

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 sobrecarga 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 donde los efectos colaterales del derrumbamiento del edificio se hacen notar, así como de 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 resistidas por la estructura sin pérdida de la estabilidad estructural para evitar, así, el colapso estructural que produce el derrumbamiento del edificio.

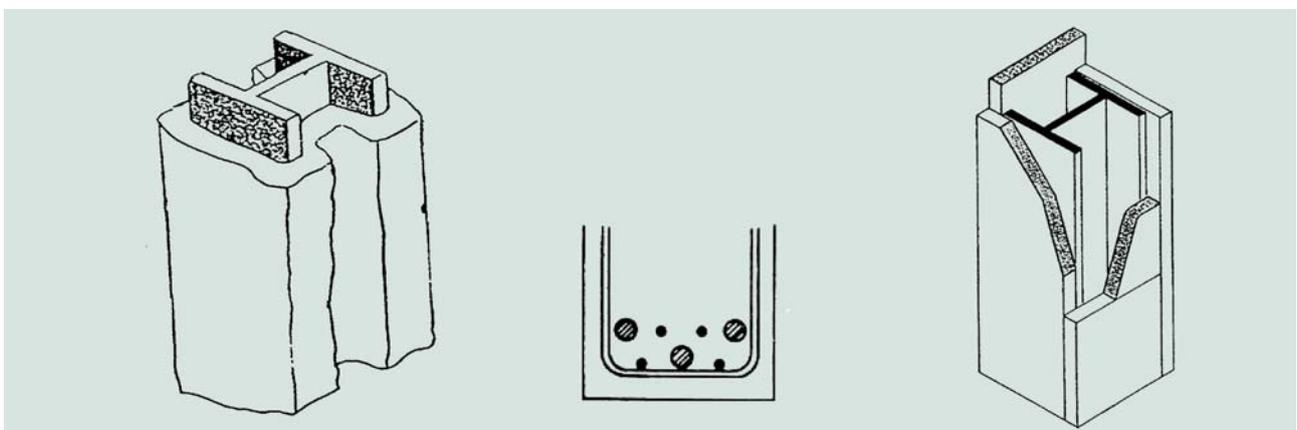
En este sentido, la resistencia última de la estructura, tras la que sobreviene el colapso de la misma, depende de la resistencia esencial o intrínseca del material constituyente, es

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 coeficientes reductores de la densidad de la carga de fuego según las medidas activas existentes tales como: detección automática, alarma automática a bomberos y extinción automática, suministran una buena medida de la prevención contra el incendio y la disminución del riesgo de que tal incendio se desarrolle, pero no son valorables directamente para establecer la acción del fuego que actúa sobre la estructura cuando se declara el incendio que sobrepasa la acción de las mismas y frente al cual la estructura debe asegurar la estabilidad estructural necesaria para evitar el colapso y consiguiente derrumbamiento del edificio.

La consideración de los datos recogidos en las Tablas 1 y 2 lleva a la conclusión de que el dimensionado de las estructuras frente al fuego pasa por la necesidad de proteger al 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.

Figura 1.- Resistencia al fuego protecciones al acero. Hormigón.



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 protección 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 temperatura 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, de puntos, la curva de temperaturas correspondientes a un fuego paramétrico (deducido de fuegos reales). Los fuegos reales 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, de 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 armaduras acotándola y contribuyendo a que se mantenga la estabilidad estructural aún en fuegos muy severos.

La Figura 3 muestra las líneas isotermales 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 1000°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 al 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

Figura 2.- Comparación de curvas – Redondos intermedios.

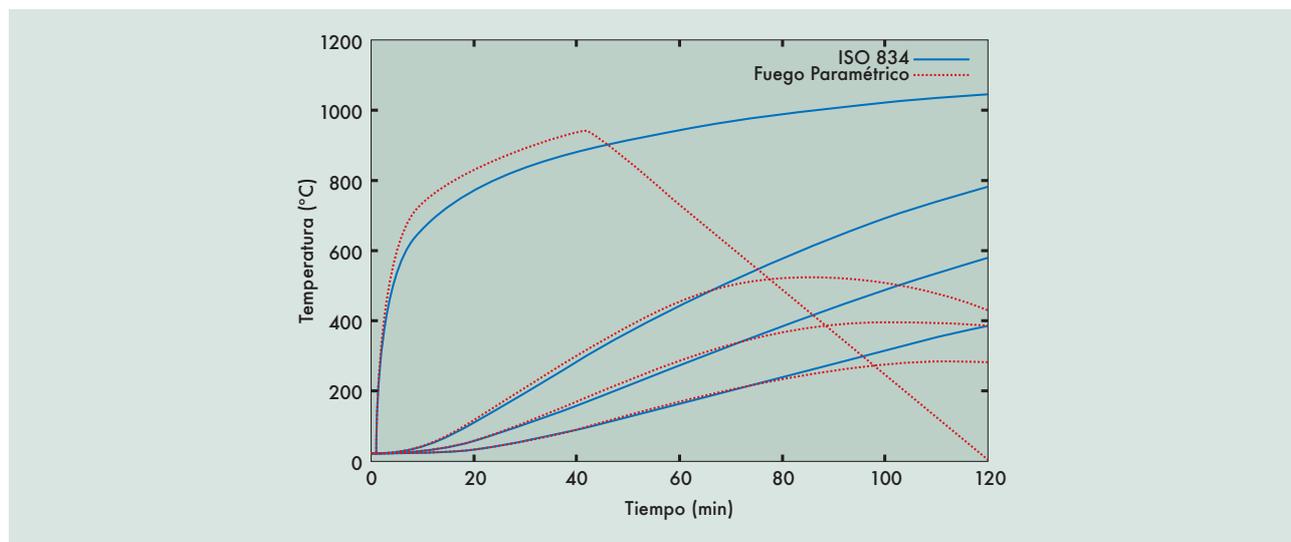
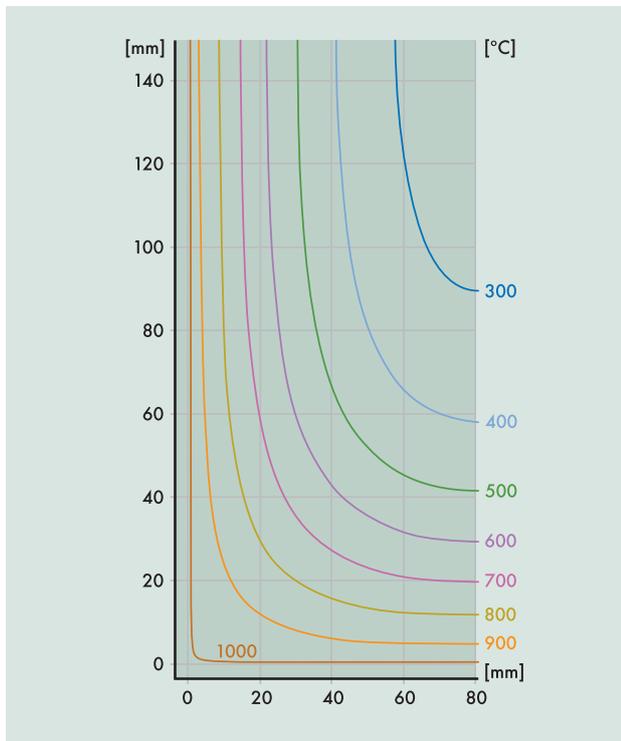


Figura 3.- Estructuras de hormigón resistencia al fuego.



que de modo eficaz y competitivo aporten seguridad frente al fuego.

En definitiva, el hormigón ofrece protección y seguridad frente al fuego para las personas, las propiedades y el medio ambiente por las razones que se indican a continuación, extraídas del Documento "Seguridad y protección completa frente al fuego con hormigón" de la Plataforma Europea del Hormigón:

- 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 contaminación 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, (incluso durante la construcción), y continuo sin puntos débiles.
- 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.
- El hormigón, después del incendio, es fácilmente reparable y facilita la vuelta a la actividad del edificio incendiado, reduciendo las consecuencias de aquel.
- El hormigón no se degrada por efecto del agua utilizada durante la extinción del incendio.
- El hormigón ofrece resistencia pasiva frente al fuego y por tanto es ésta una resistencia última, inherente al material estructural, capaz de ofrecer la estabilidad estructural 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

Fotos 1 y 2.- Incendio del Edificio Windsor.



bomberos y de salvamento y resiste la acción del fuego incluso en incendios muy severos.

Todo lo expuesto ha quedado de manifiesto en los incendios sufridos por edificios con estructura de hormigón. Un buen ejemplo ha sido el Edificio Windsor.

El comportamiento de la estructura de hormigón armado del Edificio Windsor de Madrid durante el severo incendio que afectó al mismo, evitó el derrumbamiento del edificio cuyas consecuencias hubieran sido catastróficas.

En la investigación realizada por el Instituto Eduardo Torroja, que ha estudiado el hormigón que resistió el incendio, y por el Grupo de Investigaciones y Desarrollo de Actuaciones Industriales (GIDAI) de la Universidad de Cantabria, que ha analizado la dinámica del incendio, se ha concluido, después de realizar sobre los elementos de hormigón armado que resistieron la acción del fuego ensayos mediante análisis térmico y técnicas de microscopía electrónica, en los laboratorios del citado Instituto, que la temperatura alcanzada en el interior del hormigón fue de 500 °C a una distancia de entre 2,5 y 5 cm contada desde la superficie del elemento de hormigón expuesta directamente a la acción del fuego.

Así mismo, se ha podido constatar cómo en condiciones de fuego severas una estructura de hormigón garantiza una resis-



Foto 3.- La estructura de hormigón resiste la acción del fuego.

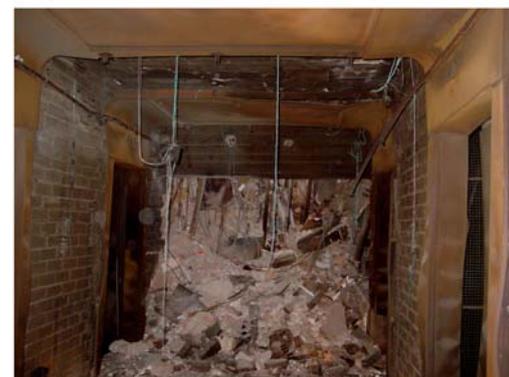


tencia del edificio que evita su colapso, ya que de estos ensayos se ha podido inferir que la estructura de hormigón estuvo sometida a temperaturas en el entorno de los 1.000 °C.

Foto 4.- La estructura de hormigón del Edificio Windsor tras resistir la acción del fuego.



Foto 5, 6, 7 y 8.- Interior del Edificio Windsor después del incendio.



(1) Instrucción de Hormigón Estructural EHE

(2) Norma Básica de la Edificación "Condiciones de protección contra incendios en los edificios" NBE – CPI/96

(3) Reglamento de incendios de la Comunidad de Madrid de 13 marzo 2003

(4) Guía para la comprobación de la resistencia al fuego de estructuras. Generalitat de Catalunya

(5) Eurocódigo 2: Diseño de estructuras de hormigón Parte 1-2: Resistencia al fuego (ENV 1992-1-2)

(6) Méthode de prévision par le calcul du comportement au feu des structures en béton (XP P92701/A1, Décembre 2000)

(7) Carrascón, S.; López Agúí, J.C.; Método de Proyecto o Evaluación de la Resistencia al fuego de estructuras de hormigón armado. Cemento-Hormigón (julio 2004)

(8) Vega, L. y Burón, M; Durabilidad y resistencia al fuego de las estructuras prefabricadas. Curso de Industrialización y prefabricación de elementos resistentes de hormigón. Cursos CEMCO 2004. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja.