



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

ESCUELA DE ARQUITECTURA E INGENIERÍA
EN LA EDIFICACIÓN

ARQUITECTURA TÉCNICA

PROYECTO FIN DE CARRERA

**COMPORTAMIENTO DEL
HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA
FRENTE AL FUEGO**

Autor:

D. Patricio Jiménez Madrid

Directores Académicos:

Dr. José Calvo López

Dr. Carlos José Parra Costa

COMPORTAMIENTO DEL

HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA

FRENTE AL FUEGO

Autor:

Patricio Jiménez Madrid

Directores Académicos:

Dr. José Calvo López

Dr. Carlos José Parra Costa

Índice

• Capítulo 0. Introducción	10
○ Objetivos	10
○ Resumen por capítulos	10
• Capítulo 1. Breve reseña histórica	12
○ Historia del hormigón	12
• Capítulo 2. Componentes del hormigón	24
○ Introducción	24
○ Cemento	24
○ Componentes del cemento	25
▪ Clinker	25
▪ Regulador de fraguado	25
▪ Agua	30
▪ Áridos	32
▪ Aditivos	44
▪ Adiciones	58
• Capítulo 3. Propiedades del hormigón endurecido	68
○ Introducción	68
○ Características mecánicas	68
○ Tensión-Deformación	72
○ Durabilidad	74
○ Densidad	80
○ Compacidad	80
○ Permeabilidad	81
○ Retracción y entumecimiento	84
▪ Retracción	85
▪ Entumecimiento	92
○ Fluencia, cansancio y fatiga.	93
▪ Fluencia	93
▪ Cansancio	95
▪ Fatiga	96

• Capítulo 4. Propiedades del hormigón de alta resistencia endurecido	98
○ Introducción	98
○ Propiedades mecánicas	98
▪ Resistencia a compresión y tracción	98
▪ Módulo de deformación	100
▪ Deformaciones diferidas	103
▪ Retracción	103
▪ Fluencia	105
○ Permeabilidad y porosidad	106
○ Durabilidad	107
▪ Introducción	107
▪ Alcalinidad	108
▪ Porosidad	109
▪ Permeabilidad	110
▪ Ataque por agentes químicos	110
▪ Resistencia a los sulfatos	112
▪ Resistencia a los cloruros	113
▪ Procesos de hielo-deshielo	113
▪ Resistencia a la abrasión	115
▪ Resistencia a ataques químicos	115
▪ Reacción Álcali-Árido	116
▪ Comportamiento a altas temperaturas	116
○ Ventajas e inconvenientes	116
• Capítulo 5. Comportamiento del hormigón frente al fuego	120
○ Introducción	120
○ Comportamiento del hormigón frente al fuego	123
○ Proyecto de seguridad frente al fuego con hormigón	129
▪ Requisitos que deben cumplir edificaciones frente al fuego	129
▪ Utilización del Eurocódigo 2	132
○ Protección de las personas	133

▪	Comparación de la seguridad frente al fuego en edificios de madera y de hormigón	144
▪	Evaluación independiente del daño provocado por incendios	146
○	Protección de los bienes y del comercio	148
○	El hormigón y la ingeniería frente al fuego	156
○	Efectos de un incendio en una estructura	161
▪	Efectos sobre el hormigón armado	162
▪	Efecto spalling	164
○	Protección contra incendios	168
▪	Medios pasivos	169
▪	Medios activos	169
▪	Normativas	171
▪	Métodos contra la acción del fuego	171
•	Capítulo 6. Comportamiento del hormigón de alta resistencia frente al fuego	186
○	Introducción	186
○	Ensayos de resistencia al fuego sobre el HAR	188
▪	Comportamiento de los pilares de HAR	189
○	Factores que influyen en el comportamiento frente al fuego	194
○	Directrices para mejorar la resistencia al fuego	198
•	Capítulo 7. Evolución de la microestructura del HAR frente al fuego.	202
○	Introducción	202
○	Metodología experimental	204
○	Resultados	207
▪	Evolución de la porosidad de los HAR por la acción de la temperatura	207
▪	Procesos de transformación de los hormigones a elevadas temperaturas.	212
▪	Comportamiento de los hormigones de alta resistencia frente al fuego	213

• Capítulo 8. Mejora del comportamiento del hormigón de alta resistencia a elevadas temperaturas.	216
○ Mejora de la resistencia al fuego utilizando fibras de polipropileno y fibras de acero.	216
▪ Análisis de los resultados para hormigones de resistencia normal	221
▪ Análisis de los resultados para hormigones de alta resistencia	223
○ Resistencia al fuego del hormigón de alta resistencia con una mezcla de fibras	226
▪ Comportamiento del hormigón de alta resistencia bajo cargas de fuego	227
▪ Ensayos de resistencia al fuego	228
▪ Resultados de los ensayos	230
○ Resistencia al fuego del HAR con fibras de caucho	232
▪ Resistencia al fuego del HAR con fibras de caucho reciclado	240
▪ Discusión de los resultados	245
• Capítulo 9. Conclusiones finales.	248
• Bibliografía.	252

Capítulo 0. Introducción

Objetivos

Con el objetivo de obtener el título de Arquitecto Técnico D. Patricio Jiménez Madrid ha realizado el proyecto final de carrera titulado “Comportamiento al fuego del Hormigón de alta Resistencia”. Este trabajo ha sido dirigido por el profesor D. José Calvo y D. Carlos Parra del Departamento de de Arquitectura y Tecnología de la Universidad Politécnica de Cartagena.

El proyecto fin de carrera que se expone a continuación tiene como principal objetivo explicar el comportamiento del hormigón de alta resistencia al ser sometido a elevadas temperaturas, así como métodos de evitar los problemas que genera.

Resumen por capítulos.

El presente proyecto se divide en nueve capítulos en los que se desarrollan los siguientes temas:

- El primer capítulo es una breve reseña histórica del hormigón.
- En el segundo se explican los componentes básicos del hormigón.
- En los dos siguientes capítulos se desarrollan las propiedades del hormigón de resistencia normal, y del hormigón de alta resistencia respectivamente.
- En el quinto capítulo se explica el comportamiento del hormigón frente al fuego, así como los efectos generados por un incendio en una estructura de hormigón armado y formas de proteger este material frente a dicho fenómeno. Además se describe la normativa vigente.
- En el sexto capítulo se comparan ambos tipos de hormigones cuando son sometidos a elevadas temperaturas.

- En el séptimo se desarrolla la evolución de la microestructura del hormigón de alta resistencia tras el efecto del fuego.
- En el penúltimo se explican diferentes formas de mejorar el comportamiento de este tipo de hormigón frente a la acción del fuego.
- Por último se exponen las conclusiones extraídas de este proyecto sobre el comportamiento del hormigón de alta resistencia cuando es sometido a elevadas temperaturas.

Capítulo 1. Breve reseña histórica

Historia del hormigón

Probablemente el empleo de materiales cementantes se remonta al inicio de la civilización cuando el hombre se vió en la necesidad de construir su habitación utilizando arcilla o una mezcla de cal y arena para unir las piedras y conformar una estructura simple que le sirviera de protección. No hay forma de determinar la primera vez que se utilizó un material aglomerante, sin embargo, hay vestigios que indican que la obra de hormigón más antigua fue construida alrededor de los años 5600 A.C. en las riberas del río Danubio en Yugoslavia. Esta obra estaba conformada por los pisos para chozas en un pueblo de la edad de piedra. Después de esta aplicación no se tiene noticia de la utilización de ésta técnica hasta el año 2650 A.C. cuando los egipcios construyeron las pirámides de GIZET (Fig. 1.1), en donde los bloques de piedra de esta obra, conformada por las pirámides de Cheops (137 m), Chefrén (136 m) y Miserino (62 m), fueron pegados con un mortero hecho de yeso calcinado impuro y arena; a esta obra, siguieron otras que aún se encuentran a lo largo del río Nilo.



Fig. 1.1 Pirámides de Gizet (2650 A.C.)

Posteriormente, en el año 500 A.C los antiguos griegos mezclaron compuestos basados en caliza calcinada (cal viva) y agua a la cual se adicionaba arena, para recubrir y unir piedras y ladrillos no cocidos,

llegando a mencionarse que los palacios de Creso y Atala fueron construidos de esta forma. La adición a estas mezclas, de piedra triturada, tejas rotas o ladrillo, dieron origen al primer hormigón de la historia. Probablemente, la civilización romana copió la idea de la producción de hormigón de los griegos. Se han encontrado obras de hormigón romanas fechadas con anterioridad al año 300 A.C.

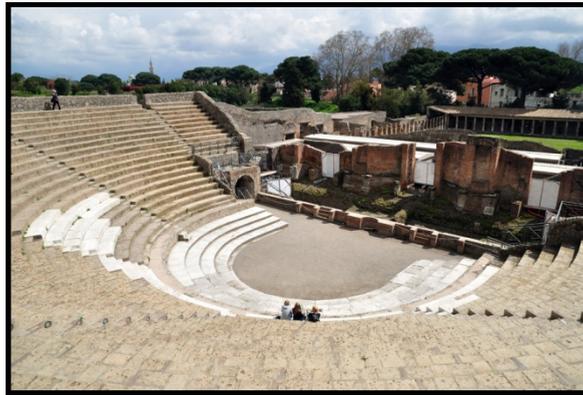


Fig. 1.2 Teatro de Pompeya (75 A.C.)

Como los morteros de cal viva no resistían muy bien la acción del agua durante períodos largos, se presume que a ésta mezcla se incorporaron toda clase de agregados y durante estas pruebas empíricas se descubrió que la arena proveniente de ciertas rocas volcánicas tenía mayor resistencia y duración tanto en aguas dulces como saladas. Por ejemplo, los griegos emplearon una toba volcánica extraída de la Isla de Santorín y los romanos usaron un material con apariencia de arena rosada que se encuentra en gran cantidad alrededor de la bahía de Nápoles, el cual es una ceniza volcánica que contiene sílice y alúmina que se combinan químicamente con la cal y dan como resultado lo que luego se conoce como cemento puzolánico. Este nombre obedece a que se le encontró por primera vez en la región donde estaba la población de Puzzulí, cerca del Vesubio.

Con éste material se construyó el teatro de Pompeya en el año 75 A.C. (Fig. 2.1) Existen evidencias de intentos romanos para reforzar algunas de las estructuras que construyeron con barras y láminas de bronce, sin embargo, como los resultados no fueron satisfactorios, porque

se presentaban agrietamientos y descascaramientos; diseñaron sus obras para soportar cargas de compresión, resultando estructuras con muros excesivamente gruesos y pesados, algunos de más 8 metros de espesor. Para reducir el peso de los muros se optó por aligerar el hormigón mediante la inclusión de jarras de barro en su masa, la utilización de agregado de baja densidad de procedencia volcánica y el diseño de arcos.

Con esta técnica de hormigón aligerado fueron construidos algunos arcos del coliseo romano, la Basílica de Constantino y también el domo del panteón, el cual es una de las estructuras antiguas más interesantes y fue la de mayor luz (diámetro 50 metros) durante mucho tiempo. Obras que dan testimonio de la propiedad que tiene el hormigón para soportar los embates de la naturaleza y permanecer durante largo tiempo.

Con la caída del imperio romano declinó el uso del hormigón y muchos de los conocimientos desarrollados desaparecieron completamente. La técnica comenzó a ser recobrada en Inglaterra y se tienen evidencias que hacia el año 700 D.C se construyeron en Saxon elementos mezclados de hormigón en forma de recipientes superficiales en la roca, de diámetro 2 y 3 metros, empleando en la fabricación del hormigón y el mortero una caliza del sector como agregado y cal quemada como cementante. Los Normandos emplearon hormigón como material de relleno en muros que luego eran recubiertos con piedra. De esta técnica da fe la abadía de Reading en la región de Berkshire, donde el recubrimiento de piedras cayó totalmente y dejó al descubierto el esqueleto en hormigón.

Durante la edad media y el renacimiento el hormigón no se utilizó a gran escala por la mala calidad debida a una cocción incompleta de la cal, descuido en la mano de obra y carencia de tobas volcánicas. Después del siglo XII, mejoró la calidad y de nuevo se utilizó gracias a una perfecta calcinación de la cal y al uso de algún material similar en propiedades a las tobas volcánicas anteriormente mencionadas. El Trass de Andernach, junto al Rhin, es una obra de ésta época construida con el material descrito.

La catedral de Salisbury tiene una cimentación en hormigón que aún permanece en buen estado; en la torre blanca, de la famosa torre de Londres, también se empleó ese material para su construcción. La casa Moretón en Cheshire, construida entre 1559 y 1580 tiene un piso superior hecho en un material que combina la cal, la arena y la ceniza de madera, el cual fue empleado en los cuartos que tenían chimeneas, con el fin de evitar los riesgos de incendio en los pisos de madera.

En Latinoamérica, hay muestras de desarrollo de materiales cementantes y estructuras imponentes como las ciudades construidas por los Mayas y los Aztecas en México o las construcciones de Machu Pichu en el Perú (Fig. 1.3), entre otras. Obras que resultan tan importantes como las pirámides de Egipto, e indican el gran desarrollo de la Ingeniería y de la tecnología del hormigón, en esas civilizaciones precolombinas.



Fig. 1.3 Construcciones de Machu Pichu (Perú)

Durante los siglos posteriores, los avances fueron escasos hasta el punto de que solo llegó a producirse un mortero débil hecho únicamente de cal y arena. A principios de la edad moderna se presentó una disminución general en la calidad y la crisis llegó al punto, de acabar con la fabricación y el uso del cemento.

Solamente hacia el siglo XVIII, en el cual se revivió el auge por la investigación, un ingeniero de Leeds fue comisionado para que construyera por tercera vez un faro en el acantilado de Edystone en la

costa Cornwall, situado a unos 8 km de Plymouth en Inglaterra (Fig. 1.4). Los dos primeros habían sido construidos en madera, siendo destruidos la primera vez por un incendio y la segunda por un vendaval. El encargado, John Smeaton, decidió adelantar una serie de estudios tendientes a encontrar la mejor solución para que el faro pudiera soportar el azote casi continuo del agua y, de estos estudios dedujo que la única manera de garantizar la resistencia de la construcción debía ser empleando piedra unida con un mortero producido con cal calcinada para formar una construcción monolítica la cual debía soportar en la parte inferior, la acción constante de las olas y de los vientos con alto contenido de agua de mar.

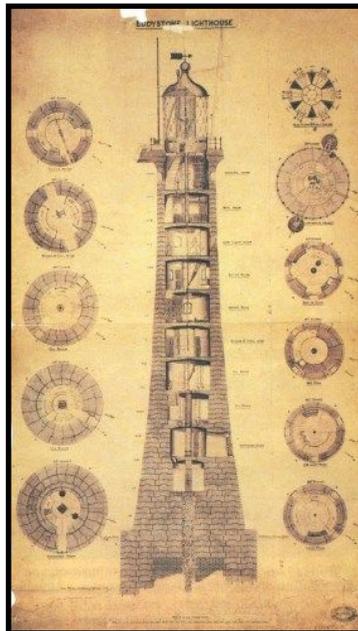


Fig. 1.4 Plano de faro de Edystone (John Smeaton – 1759)

El faro se construyó con este mortero y rocas, en una operación que tardó 6 semanas, entrando en servicio en octubre de 1759. En el año 1876 una parte de la estructura se debilitó y el faro fue reemplazado por uno más grande.

A petición de los habitantes de Plymouth, el antiguo faro fue desmontado hasta la cimentación y vuelto a erigir en esa ciudad, como monumento, el cual se conserva actualmente. La cimentación del faro todavía permanece en su sitio, desafiando al mar, después de más de 200 años de construida.

En los años siguientes, a este hallazgo, se desarrollaron muchos tipos de cementos hidráulicos y a partir de ese momento, mejora la calidad de los morteros y comienza el desarrollo del hormigón, gracias a los adelantos conseguidos en el conocimiento de los cementos. Así se inició una carrera por obtener cemento de construcción y en 1811, Dabbs obtuvo una patente para producirlo empleando arcilla y polvo de los caminos.

Posteriormente el 21 de octubre de 1824 Joseph Aspdin un constructor de Leeds (Inglaterra), calcinó en un horno una mezcla de tres partes de piedra caliza por una de arcilla, la cual molió y pulverizó y consiguió la patente para producir el primer cemento Portland; así llamado porque la coloración del mismo le recordaba al inventor, el color grisáceo de las rocas de Portland. La patente solo nombraba los ingredientes básicos, sin entrar en detalles de fabricación.

A Aspdin se le conoce como el inventor del cemento Portland, aunque su método de fabricación fue conservado con mucho secreto y su patente, escrita en forma confusa y oscura, solo se empleaba para producir ladrillo, con apariencia de las rocas de Portland.

La primera fábrica de cemento se instaló en Wakefield y funcionó entre 1826 y 1828, siendo luego demolida para dar paso a una vía férrea. De esa época se conserva un edificio, la fábrica de armas de Wakefield, muy cerca a la antigua fábrica de cemento, cuya fachada está confeccionada con cemento Portland.

La primera construcción en la cual se empleó en gran escala el hormigón, fue la casa construida por Jhon Bazley White en Swanscombe, Kent, (1835). Allí se empleó en muros, tejas, marcos de ventanas, trabajos de decoración e incluso en gnomos de adorno en el jardín delantero. Lo único que no está construido en ese material es el entepiso, puesto que aún no se conocía la técnica del hormigón reforzado.

Curiosamente una construcción de la época empleó cemento Portland por accidente: un barco fue cargado con barriles conteniendo cemento, los cuales fueron saqueados por los habitantes de Sheppper, creyendo que contenían whisky y se encontraron con cemento que ya había endurecido, decidieron entonces emplearlo en la construcción de un edificio público: el "barco en la playa" (1848), el cual aún permanece.

El proceso de producción de cemento fue mejorado por Isaac Johnson en 1845 cuando logró con éxito fabricar este producto quemando una mezcla de caliza y arcilla hasta la formación del Clinker, el cual después fue pulverizado obteniendo un compuesto fuertemente cementante. Johnson encontró que la temperatura de calcinación debía elevarse hasta el máximo que pudiera lograrse con métodos de ese tiempo y describió sus experimentos más explícitamente que Aspdin.

Tomando como base los experimentos de Johnson, la fabricación de cemento Portland se inició en varias plantas, no solo en Inglaterra, sino también en toda Europa. La cantidad producida fue muy pequeña.

El desarrollo del hormigón propiamente dicho como material de construcción, empezó hacia principios del siglo XIX, poco después de la obtención de la patente del "Cemento Portland" (1824) y posteriormente se afianzó con la invención del hormigón armado que se atribuye al jardinero parisiense Jack Monier, quien, hacia 1861, fabricó un jarrón de mortero de cemento, reforzado con un enrejado de alambre.

La primera referencia bibliográfica del uso de hormigón reforzado aparece en 1830 en una publicación titulada "Enciclopedia de la arquitectura de casas de campo, granjas y aldeas", la cual sugiere emplear una malla de varillas de hierro embebidas en hormigón, para conformar un techo

Este material, se vino a conocer como ferro-cemento, un siglo más tarde. La verdad, es que para entonces, ya se había construido diversos objetos aplicando la misma idea, pero sin que tuvieran trascendencia en la industria de la construcción. Así por ejemplo Lambot construyó en 1850 una barca de cemento reforzada con hierro, que pudo verse en la Exposición Universal de París del año 1855 y que aún se exhibe en el Parque Miraval.

En 1861, el Ingeniero francés Coignet estableció normas para fabricar bóvedas, vigas, tubos, etc., con este novedoso material y presentó, asociado con Monier, algunos ejemplares en la exposición del año 1867. En este mismo año, Monier obtuvo sus primeras patentes para hacer estos elementos.

Pero la persona a quien históricamente se le ha dado el mérito de haber desarrollado el hormigón reforzado es el constructor William Wilkinson, de Newcastle, Inglaterra.

El cemento Pórtland sigue investigándose, desarrollándose y progresando cada día más y así aparece la teoría de fraguado de Le Chartelier (1893) en vigor actualmente. Con este continuo desarrollo se llega a 1904 donde aparece el primer volumen completo sobre hormigón armado, un tratado con más de 600 páginas, escrito por De Tudesco.

Otros ejemplos de obras singulares realizadas con hormigón, ya dentro del siglo XX, es el primer edificio con estructura de hormigón de Perret, en el número 25 de la calle Franklin de París, en 1903. Freyssinet logra el desencofrado de arcos por apertura en clave y realiza los primeros hormigones pretensados.

El hormigón armado sigue su difusión imparable por todo el mundo llegando a alcanzar una etapa de gran esplendor y un incremento constante de la resistencia a compresión del hormigón. Incluso en 1913 se comienza a suministrar por primera vez hormigón preparado en Baltimore (USA), aunque no fue hasta tres años después cuando aparece el primer camión hormigonera, como los que se conocen hoy en día.

Le Corbusier propone construir en 1914 la primera casa prefabricada en hormigón armado. (Fig1.5)

Entre 1923 y 1924 se construyó lo que se cree fue una de las primeras cubiertas laminares o cáscaras, se trata de la cúpula de Jena, de 40m de luz y 6cm de espesor, con una relación luz/espesor de más de 600 y por consiguiente, superior a la de la cáscara de un huevo, siendo su autor el Profesor Walter Bauersfeld. Mientras que en 1929 Wright construye el primer rascacielos en hormigón.

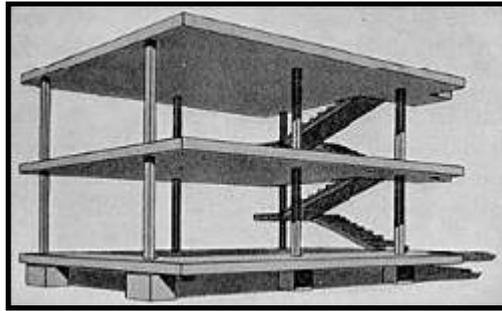


Fig. 1.5. Esqueleto de la estructura de Maison Domino (Le Corbusier, 1914)

La prefabricación encuentra su apogeo en estos años con el italiano Pier Luigi Nervi, difundiendo las ventajas de este sistema constructivo como son el ahorro en el tiempo de ejecución y el lograr producciones en serie de partes iguales de obra dentro de una gran riqueza de formas y de acabados superficiales.

El incremento imparable de la resistencia del hormigón debe admitirse por primera vez en Estados Unidos con la adopción de un valor de resistencia a compresión de 50MPa para el hormigón de la estructura del Executive House de Chicago.

En 1958, la F.W. Dodge Corporation de New York publica "Las estructuras de Eduardo Torroja", el cual, fue además el creador y director del "Instituto Técnico de la Construcción y el Cemento" en Costillares considerado uno de los tres principales laboratorios de ensayos a escala mundial. Su fama se debe exclusivamente a la grandeza de su trabajo, que ha despertado enorme interés entre los especialistas de la construcción en todo el mundo.

En la década de los 60 aparece el hormigón reforzado con fibras, las cuales se incorporan a su masa en el momento del amasado. Estas fibras le dan a la masa del hormigón cierta isotropía y aumentan sus prestaciones frente a impacto, flexión, tracción, fisuración, etc. Estos hormigones han abierto un nuevo campo de aplicaciones al ser más idóneos para soportar solicitaciones para las que no estaba capacitado el hormigón tradicional.

La aparición de los aditivos en la década de los 70, los cuales proporcionan características especiales a la masa del hormigón, abre la posibilidad de obtener hormigones con una resistencia superior a los 120MPa o incluso llegar a más de 200MPa con la incorporación de monómeros, consiguen también hormigones que sean prácticamente inatacables por la acción de los agentes químicos o indestructibles por los ciclos hielo y deshielo y una infinidad de mejoras en las distintas propiedades del hormigón. Aquí es donde se puede decir que hay un punto de inflexión y es donde aparecen de forma subyacente los hormigones de altas prestaciones.

En España las primeras utilizaciones del hormigón se pueden ver a principios del siglo XX cuando Rivera emplea cajones flotantes en la cimentación de seis puentes en Valencia y en el viaducto Alfonso XII. Pero la historia del hormigón en España no comienza su auténtica utilización hasta la mitad de la década de los años 60 del pasado siglo XX, tras la aparición del hormigón preparado, que ha representado otro gran salto en la utilización del hormigón proporcionando enormes avances en calidad de producto y servicio, aportando posibilidades de grandes volúmenes de suministro y rapidez de ejecución a las obras.

En la actualidad, la industria del hormigón preparado está inmersa en un proceso de modernización que pasa por la obtención de marca, certificaciones de aseguramiento de calidad, así como de preservar el medio ambiente y la aplicación de programas rigurosos en materia de prevención de riesgos laborales.

El hormigón, en su constante evolución, cada día ha ido perfeccionándose como consecuencia de la mejora experimentada por los materiales que lo componen y el avance de la tecnología, creándose así los hormigones de altas prestaciones, mencionados anteriormente, un ejemplo del empleo de este tipo de hormigón es la Torre Espacio de Madrid

En la Región de Murcia se pueden encontrar como ejemplos del comienzo de la utilización de hormigón el puente del cauce de riego de Tiata en la Vega de Lorca, construido en el año 1910, para cubrir una longitud de 55m, este puente está formado por un arco de 45m de luz

con 6m de flecha y que sirve de apoyo mediante montantes del tablero sostenido por viguetas que arriostran transversalmente el extremo libre de los montantes. Se puede ver en la siguiente imagen, la fotografía publicada en la revista de obras públicas en 1910.

Al igual que en el resto de España, en la Región de Murcia el hormigón se comienza a utilizar en edificación en la década de los 60 llegando a ser en la actualidad el producto por excelencia. Se pueden destacar varias construcciones realizadas con hormigones de altas prestaciones como son el puente atirantado que se encuentra sobre el río Segura en la carretera variante de Archena realizado con hormigón de alta resistencia de 60MPa.



Fig. 1.6 Torre de Godoy (Murcia)

Una edificación que se puede destacar es la Torre Godoy en Murcia con 65m. de altura y 19 plantas construidas con hormigón de alta resistencia de 70MPa.

En definitiva, el hormigón se ha impuesto de tal forma que hoy es imposible encontrar una construcción en la que no esté presente en alguna parte de la misma, encontrándose así que, aunque un edificio posea una estructura metálica, el hormigón estará soportándola en su cimentación.

Capítulo 2. Componentes del hormigón.

Introducción

Los constituyentes usados para la elaboración de hormigones tradicionales han de cumplir los requerimientos especificados en la norma europea UNE-EN 206.

En los siguientes apartados se desarrollarán los componentes esenciales de un hormigón:

- Cemento.
- Agua.
- Áridos.
 - Arena (árido fino).
 - Grava (árido grueso).
- Aditivos.
- Adiciones.
- Fibras.

Cemento.

El cemento es un material inorgánico dividido en pequeñas partículas que, amasado con agua, forma una pasta que fragua y endurece debido a las reacciones y procesos de hidratación de sus constituyentes, dando lugar a productos hidratados mecánicamente resistentes y estables tanto al aire como bajo el agua. Se trata del elemento fundamental de cualquier hormigón por varias razones:

- Función aglomerante.
- Aportación de resistencia mecánica.
- Protección que proporciona al acero.

Los diferentes tipos de cementos que se utilizan en España están regulados por la Instrucción de la Recepción de Cemento del 2008 (RC-08) y las normas UNE EN-197.

Componentes del cemento.

Los componentes principales del cemento son el clinker, adiciones y reguladores de fraguado.

Clinker

El componente esencial del cemento es el clinker. Existen diferentes tipos de clinker, pero los que se utilizan normalmente son:

- **Clinker Portland:** Es un producto que se obtiene combinando a altas temperaturas (de hasta 1450 °C), cal, sílice de alúmina y óxido férrico, seguido de un proceso de enfriamiento. Está constituido por unos compuestos que en función de su proporción el clinker tendrá unas características u otras; dichos compuestos son: silicato tricálcico, silicato bicálcico, aluminato tricálcico y ferroaluminato tetracálcico.
- **Clinker de cemento Aluminoso:** Es el resultado de la fusión de una mezcla de calizas y bauxitas de composición y granulometría adecuadas para conseguir un contenido de alúmina del 36%.

Regulador del fraguado

Pueden ser productos naturales o artificiales que añadidos al clinker en pequeñas proporciones y molidos conjuntamente, proporcionan cementos con un fraguado adecuado. El regulador de fraguado más usual es el sulfato cálcico (cal o yeso) en alguna de sus variedades o en mezcla de ellas.

Adiciones

En función de las características exigidas en cada momento, se le pueden añadir al clinker adiciones para obtener un cemento que cumpla con los requisitos deseados y mejoren el comportamiento del mismo en estado fresco y/o endurecido; estas adiciones pueden ser añadidas al clinker has un máximo del 5% y pueden ser: escorias siderúrgicas, puzolanas naturales, cenizas volantes, humo de sílice, filleres calizos...

Este apartado se desarrollará más adelante más detalladamente ya que las adiciones se pueden incluir en el propio clinker o añadirlas a la mezcla de hormigón.

La selección del tipo de cemento depende de los requisitos globales del hormigón, como durabilidad, resistencia, etc. Tanto el cemento tipo I como el tipo II son perfectamente utilizables, incluso cementos compuestos. En general, los requerimientos básicos en cuanto al tipo de cemento los marcará el tipo de aplicación. Por ello se recomiendan los cementos tipo I 42.5 y 52.5 (y su variante R) para prefabricados y aplicaciones donde se demande elevada resistencia inicial y cementos tipo II para hormigón preparado con mayor demanda de mantenimiento de la consistencia, siendo los criterios de elección en cuanto a tipos similares a los empleados para un hormigón convencional (bajo calor de hidratación, resistencia a los sulfatos, etc.).

El cemento al mezclarse con agua da lugar a una hidratación de los silicatos y aluminatos generando una masa rígida y dura conocida como cemento hidratación. Se ha de distinguir en este proceso el fraguado del endurecimiento, ya que el fraguado consiste en una progresiva rigidización de la masa plástica inicial hasta su transformación en un sólido sin una ganancia significativa de resistencia mecánica (su duración sólo son unas horas), sin embargo, el endurecimiento resulta un proceso mucho más lento y prolongado, durante el cual la masa va adquiriendo, resistencias mecánicas, rigidez y dureza de modo continuado pero con velocidad decreciente, además de ir disipando el calor de hidratación.

La hidratación de los silicatos cálcicos (C_3S y C_2S) da lugar a sustancias similares, los silicatos cálcicos hidratados, que son sólidos, porosos, poco cristalinos y suelen designarse con las iniciales C-S-H, o gel de tobermorita, e incluso solamente tobermorita. También se forma CH [$Ca(OH)_2$] conocido como portlandita, la cual debido a su elevada alcalinidad (con un pH del orden de 12,5) proporciona una buena protección frente a la corrosión a las armaduras embebidas en el hormigón.

La hidratación del aluminato, de carácter fuertemente exotérmico, da lugar a la formación de ettringita (trisulfoaluminato cálcico hidratado) en una primera fase y alrededor de las 24 ó 48 horas la ettringita se transforma en una solución sólida de placas hexagonales de monosulfoaluminato cálcico hidratado y de aluminato cálcico hidratado.

Por último, la hidratación del ferrito da lugar a ettringita y a ettringita férrica. (F. Cánovas, 1999)

Durante la hidratación el volumen de la pasta permanece constante mientras que el de los sólidos aumenta dando lugar a una disminución de la porosidad del conjunto, lo que se traduce en un aumento de las resistencias mecánicas de la pasta endurecida.

Para que esta hidratación del cemento anhidro se mantenga hasta completarse la masa debe contener la cantidad de agua adecuada. Esta cantidad se sitúa en una relación agua/cemento de entre el 0,35 al 0,40 (en peso). Por ello, es conocida la importancia de la aportación de agua externa durante la hidratación, en un proceso llamado curado (F. Cánovas, 1999).

En la fabricación de hormigones el contenido mínimo de cemento está fijado en el Art. 37, Tabla 37.3.2 de la EHE, y en el Art. 8, Tabla 8.2.2 de la EHE se regula la resistencia mínima en función del tipo de ambiente en el que se encuentre.

A continuación se reproducen dichas tablas:

Parámetro de dosificación	Tipo de hormigón	CLASE DE EXPOSICIÓN												
		I	IIa	IIb	IIIa	IIIb	IIIc	IV	Qa	Qb	Qc	H	F	E
Máxima relación a/c	Masa	0,65	-	-	-	-	-	-	0,50	0,50	0,45	0,55	0,50	0,50
	Armado	0,65	0,60	0,55	0,50	0,50	0,45	0,50	0,50	0,50	0,45	0,55	0,50	0,50
	Pretensado	0,60	0,60	0,55	0,50	0,45	0,45	0,45	0,50	0,45	0,45	0,55	0,50	0,50
Mínimo contenido de cemento (kg/m ³)	Masa	200	-	-	-	-	-	-	275	300	325	275	300	275
	Armado	250	275	300	300	325	350	325	325	350	350	300	325	300
	Pretensado	275	300	300	300	325	350	325	325	350	350	300	325	300

Tabla 2.1.a Máxima relación agua/cemento y mínimo contenido de cemento. (Tabla 37.3.2.a EHE)

Parámetro de dosificación	Tipo de hormigón	CLASE DE EXPOSICIÓN												
		I	IIa	IIb	IIIa	IIIb	IIIc	IV	Qa	Qb	Qc	H	F	E
Resistencia mínima (N/mm ²)	Masa	20	-	-	-	-	-	-	30	30	35	30	30	30
	Armado	25	25	30	30	30	35	30	30	30	35	30	30	30
	Pretensado	25	25	30	30	35	35	35	30	35	35	30	30	30

Tabla 2.1.b Resistencias mínimas compatibles con los requisitos de durabilidad (Tabla 37.3.2.b EHE)

CLASE GENERAL DE EXPOSICIÓN			DESCRIPCIÓN	EJEMPLOS
Clase	Subclase	Designación		
no agresiva	Normal	I	- interiores de edificios, no sometidos a condensaciones - elementos de hormigón en masa	- interiores de edificios, protegidos de la intemperie
		IIa	- interiores sometidos a humedades relativas medias altas (> 65%) o a condensaciones - exteriores en ausencia de cloruros, y expuestos a lluvia en zonas con precipitación media anual superior a 600mm. - elementos enterrados o sumergidos.	- sótanos no ventilados - cimentaciones - tableros y pilas de puentes en zonas con precipitación media anual superior a 600mm - elementos de hormigón en cubiertas de edificios
	Marina	IIb	- exteriores en ausencia de cloruros, sometidos a la acción del agua de lluvia, en zonas con precipitación media anual inferior a 600mm	- construcciones exteriores protegidas de la lluvia - tableros y pilas de puentes, en zonas de precipitación media anual inferior a 600mm
		IIIa	- elementos de estructuras marinas, por encima del nivel de pleamar - elemento exteriores de estructuras situadas en las proximidades de la línea costera (a menos de 5km)	- edificaciones en las proximidades de la costa - puentes en las proximidades de la costa - zonas aéreas de diques, pantolanes y otras obras de defensa litoral - instalaciones portuarias
con cloruros de origen diferente del medio marino	sumergida	IIIb	- elementos de estructuras marinas sumergidas permanentemente, por debajo del nivel mínimo de bajamar	- zonas sumergidas de diques, pantolanes y otras obras de defensa litoral - cimentaciones y zonas sumergidas de pilas de puentes en el mar
		IIIc	- elementos de estructuras marinas situadas en la zona de carrera de mareas	- zonas situadas en el recorrido de marea de diques, pantolanes y otras obras de defensa litoral - zonas de pilas de puentes sobre el mar, situadas en el recorrido de marea
	IV	- instalaciones no impermeabilizadas en contacto con agua que presente un contenido elevado de cloruros, no relacionados con el ambiente marino - superficies expuestas a sales de deshielo no impermeabilizadas.	- piscinas - pilas de pasos superiores o pasarelas en zonas de nieve - estaciones de tratamiento de agua.	

Tabla 2.2.a Clases generales de exposición relativas a la corrosión de las armaduras (Tabla 8.2.2 EHE)

CLASE ESPECÍFICA DE EXPOSICIÓN			DESCRIPCIÓN	EJEMPLOS
Clase	Subclase	Designación		
Química Agresiva	débil	Qa	- elementos situados en ambientes con contenidos de sustancias químicas capaces de provocar la alteración del hormigón con velocidad lenta (ver Tabla 8.2.3.b)	- instalaciones industriales, con sustancias débilmente agresivas según tabla 8.2.3.b. - construcciones en proximidades de áreas industriales, con agresividad débil según tabla 8.2.3.b.
	media	Qb	- elementos en contacto con agua de mar - elementos situados en ambientes con contenidos de sustancias químicas capaces de provocar la alteración del hormigón con velocidad media (ver Tabla 8.2.3.b)	- diques, bloques y otros elementos para diques - estructuras marinas, en general - instalaciones industriales con sustancias de agresividad media según tabla 8.2.3.b. - construcciones en proximidades de áreas industriales, con agresividad media según tabla 8.2.3.b.
	fuerte	Qc	- elementos situados en ambientes con contenidos de sustancias químicas capaces de provocar la alteración del hormigón con velocidad rápida (ver Tabla 8.2.3.b)	- instalaciones industriales, con sustancias de agresividad alta de acuerdo con tabla 8.2.3.b. - instalaciones de conducción y tratamiento de aguas residuales, con sustancias de agresividad alta de acuerdo con tabla 8.2.3.b.
con hieladas	sin sales fundentes	H	- elementos situados en contacto frecuente con agua, o zonas con humedad relativa media ambiental en invierno superior al 75%, y que tengan una probabilidad anual superior al 50% de alcanzar al menos una vez temperaturas por debajo de -5°C	- construcciones en zonas de alta montaña - estaciones invernales
	con sales fundentes	F	- elementos destinados al tráfico de vehículos o peatones en zonas con más de 5 nevadas anuales o con valor medio de la temperatura mínima en los meses de invierno inferior a 0°C	- tableros de puentes o pasarelas en zonas de alta montaña
erosión		E	- elementos sometidos a desgaste superficial - elementos de estructuras hidráulicas en los que la cota piezométrica pueda descender por debajo de la presión de vapor del agua	- pilas de puente en cauces muy torrenciales - elementos de diques, pantales y otras obras de defensa litoral que se encuentren sometidos a fuertes oleajes - pavimentos de hormigón - tuberías de alta presión

Tabla 2.2.b Clases específicas de exposición relativas a la corrosión de las armaduras (Tabla 8.2.3.a EHE)

Agua

El agua es el componente que además de participar en las reacciones de hidratación, confiere al hormigón la trabajabilidad necesaria para una correcta puesta en obra. Cuando no se posean antecedentes de su utilización, o en caso de duda, se deberán analizar las aguas, y salvo justificación especial de que no alteren perjudicialmente las propiedades exigidas al hormigón, deberán cumplir las siguientes condiciones (art. 27 EHE-08):

Exponente de hidrógeno pH (UNE 7234:71)	≥ 5
Sustancias disueltas (UNE 7130:58)	≤ 15 gramos por litro (15.000 p.p.m)
Sulfatos, expresados en $SO_4^{=}$ (UNE 7131:58), excepto para el cemento SR en que se eleva este límite a 5 gramos por litro (5.000 p.p.m)	≤ 1 gramo por litro (1.000 p.p.m)
ión cloruro, Cl^- (UNE 7178:60): -Para hormigón pretensado -Para hormigón armado u hormigón en masa que contenga armaduras para reducir la fisuración	≤ 1 gramo por litro (1.000 p.p.m) ≤ 3 gramos por litro (3.000 p.p.m)
Hidratos de carbono (UNE 7132:58)	0
Sustancias orgánicas solubles en éter (UNE 7235:71)	≤ 15 gramos por litro (15.000 p.p.m)

Tabla 2.3 Condiciones mínimas del estado del agua (EHE-08)

Se pueden realizar dos distinciones básicas, el agua de amasado y el agua de curado:

Agua de amasado

Se entiende por agua de amasado, aquella que se añade a la hormigonera para realizar la mezcla con el resto de los componentes del hormigón. Este elemento es necesario para la hidratación del cemento y,

por consiguiente para la formación de la matriz que rodea al esqueleto mineral formado por los áridos. Además otorga a la mezcla la trabajabilidad necesaria para una adecuada puesta en obra.

La cantidad de agua de amasado tiene que limitarse al mínimo necesario, ya que el agua en exceso se evapora produciendo una serie de huecos en el hormigón (capilares), que influyen en su resistencia negativamente. Sin embargo, no debe disminuirse excesivamente ya que se podrían obtener masas poco trabajables y de complicada colocación en obra, siempre que no se utilicen aditivos.

Atendiendo a estos factores, se puede llegar a la siguiente conclusión. A medida que la relación de a/c es menor, se produce una mejora tanto de la durabilidad, así como de resistencia mecánica del hormigón. En cambio, puede generar dificultades en el hormigonado debido a su poca trabajabilidad y acabados superficiales de escasa calidad. Por otro lado, si se emplean relaciones de a/c altas, se generará una disminución de la resistencia y de la durabilidad, así como una posible aparición de segregación.

Agua de curado

El agua de curado se utiliza durante el proceso de fraguado y primer endurecimiento del hormigón, y tiene por objeto:

- Mejorar la hidratación del hormigón.
- Evitar la desecación.
- Impedir una retracción prematura.

Mientras dura el proceso de fraguado, se producen pérdidas de agua debido a la evaporación, creándose una red capilar en el hormigón, disminuyendo en consecuencia su resistencia. Para evitar este hecho, y con el objetivo de compensar las pérdidas de agua y resistencia, el hormigón debe curarse adecuadamente añadiendo abundante agua, permitiendo de este modo que se desarrollen nuevos procesos de hidratación.

La falta de curado influye de forma muy negativa en la durabilidad de la estructura, ya que ésta depende de la impermeabilidad y por tanto

de la compacidad de las capas exteriores del hormigón, que son precisamente las más sensibles a una falta de curado, ya que el interior de la pieza se conserva con humedad constante durante un largo periodo de tiempo. De hecho, si el curado de un hormigón no se efectúa correctamente, conlleva que la capa de recubrimiento de las armaduras sea porosa y permeable, afectando a la vida útil de la estructura que se verá gravemente mermada.

Áridos

Este material ocupa aproximadamente entre un 65% y un 75% del volumen total del hormigón, por lo que, su proporción suele condicionar el peso específico de cualquier hormigón. En hormigones tradicionales, el árido suele ser la fase más resistente, aunque la resistencia del árido de masa normal, suele ser de poca trascendencia. Sin embargo, el módulo de elasticidad del árido influye de forma más relevante sobre el módulo de deformación, la retracción y fluencia del hormigón.

Se establece una distinción de este tipo de material, según su tamaño, así podemos distinguir:

- Gravas (Árido grueso) ≥ 4 mm.
- Arenas (Árido fino) < 4 mm.
 - Arena Gruesa ≥ 2 mm
 - Arena Fina < 2 mm
- Filler o Polvo $< 0,08$ mm.

El tamaño máximo del árido grueso utilizado en la elaboración del hormigón será inferior que las siguientes dimensiones (art. 28 EHE-08):

- 0,8 veces la distancia horizontal libre entre vainas o armaduras que no formen grupo, o entre un borde de la pieza y una vaina o armadura que forme un ángulo mayor de 45° con la dirección de hormigonado.
- 1,25 veces la distancia entre un borde de la pieza y una vaina o armadura que forme un ángulo no mayor que 45° con la dirección de hormigonado.
- 0,25 veces la dimensión mínima de la pieza, excepto en los casos siguientes:

- Losa superior de los forjados, donde el tamaño máximo del árido será menor que 0,4 veces el espesor mínimo.
- Piezas de ejecución cuidada (caso de prefabricación en taller) y aquellos elementos en los que el efecto pared del encofrado sea reducido (forjados que se encofran por una sola cara), en cuyo caso será menor que 0,33 veces el espesor mínimo.

Los áridos utilizados para la elaboración de hormigones deben satisfacer las características de resistencia y durabilidad exigidas al hormigón, y han de cumplir la norma UNE EN 12620. Se pueden emplear dos tipos diferentes de arenas y gravas:

- Áridos rodados, procedentes de la desintegración natural y erosión de rocas, generalmente silíceas, y caracterizados por una superficie lisa y sin aristas.
- Áridos de machaqueo originados a partir de la desintegración artificial mediante trituración de rocas volcánicas o calizas sólidas y densas. Se caracterizan por poseer una superficie rugosa con aristas vivas.

No es recomendable utilizar áridos procedentes de calizas blandas, yesos, feldespatos, piritas, ni aquellos que contengan sulfuros oxidables, ya que éstos últimos generarían un aumento de volumen provocando fisuras en la superficie del hormigón. Por otra parte, tampoco deben ser activos tanto a los componentes del cemento, así como a los agentes externos (aire, agua, hielo...).

Además, los áridos utilizados deben ser lo suficientemente resistentes para satisfacer las necesidades exigidas al hormigón y no absorber agua, ya que se produciría una disminución en la relación a/c . De este modo, la pasta se secaría quedando parte del cemento sin hidratar provocando un descenso en la resistencia y la durabilidad. En el caso de que el árido absorbiese agua, se deberá determinar su absorción, para incrementar dicha cantidad al agua empleada en el amasado, a partir del ensayo indicado en la norma UNE-EN 1097-6. Dicha cantidad no puede ser superior al 5% según la EHE-08.

La resistencia y durabilidad de los áridos dependen de su densidad, es decir, de la relación entre la masa y su volumen. Se aconseja el uso de áridos cuyo contenido de huecos sea mínimo o nulo. La densidad de los áridos utilizados para la confección de hormigones suele variar entre 2,4 y 3,0 kg/dm³.

Tanto la porosidad, definida como la relación existente entre el volumen de huecos accesibles al agua y el volumen real de la muestra, así como la absorción de los áridos, tienen una gran influencia en su adherencia con la pasta de cemento y por tanto en las resistencias mecánicas y durabilidad del hormigón. Los poros en la superficie del árido pueden ser de dimensiones diferentes variando desde los capaces de percibir por el ojo humano hasta los microporos, de tamaños inferiores a 0,004 mm, los cuales son muy importantes debido a la influencia positiva que tienen en la resistencia a los ciclos hielo-deshielo.

Preferiblemente se deben utilizar arenas y gravas limpias para conseguir una adherencia total entre el cemento y el árido, con el objetivo de eludir que se interponga una capa débil de finos que debilite la unión entre ambos componentes. La distribución grava/árido nunca debe ser superior al 50% para evitar la segregación del material.

Diversos autores afirman que es conveniente utilizar una granulometría continua en la elaboración de hormigones, es decir, que deben existir fracciones de áridos de todos los tamaños comprendidos entre el más pequeño y el mayor del mismo. Igualmente los áridos deben estar exentos de lajas, para conseguir que el árido se reparta de forma homogénea y constante por toda la pasta, y evitar que contengan impurezas orgánicas que impidan el correcto proceso de hidratación del cemento. Estas impurezas pueden provocar diversos efectos en la pasta de cemento y sus elementos:

- Aumento de las exigencias del agua de amasado.
- Disminución de la adherencia de los áridos con la pasta de cemento, repercutiendo desfavorablemente en las resistencias.
- Formación de compuestos que pueden reaccionar químicamente con los componentes del cemento.
- Pueden provocar que el árido a utilizar sea débil y/o inestable.

Otra de las propiedades ligadas de este material que influye en el estado de la pasta, es el entumecimiento de los áridos, principalmente el de las arenas. Se entiende por entumecimiento, al incremento de volumen experimentado cuando se humedece el árido. Si se incrementara la cantidad de agua comprendida en una arena hasta un determinado límite, el volumen del conjunto aumentará debido a la película de agua que envuelve a cada uno de los granos. De este modo es de vital importancia conocer el entumecimiento de las arenas, sobre todo cuando se realizan dosificaciones por volumen de conjunto.

El entumecimiento de una arena no depende únicamente de la humedad que contenga, sino también de su finura. Se puede apreciar en la siguiente imagen (Fig. 2.1) que el aumento de volumen puede llegar hasta un 40%, dependiendo del origen del material.

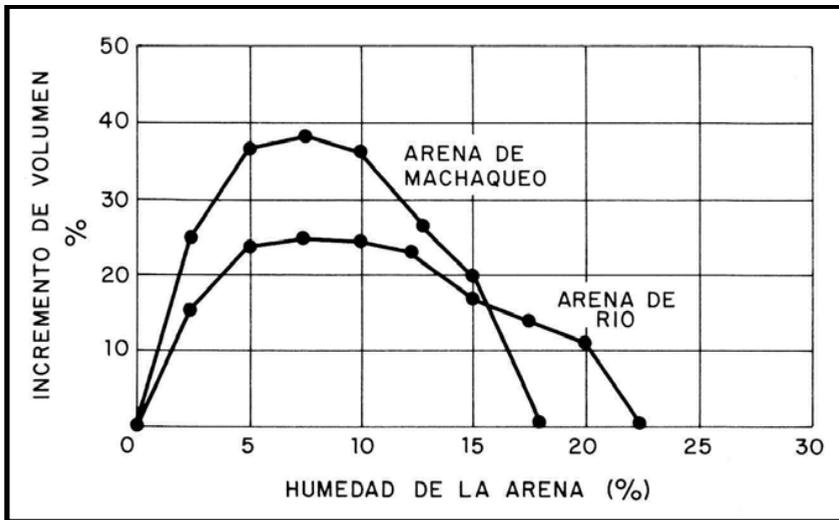


Fig. 2.1 Entumecimiento de arenas en función de su contenido de humedad (F. Cánovas, 1999)

Una de las características más importantes de los áridos es su resistencia mecánica, ya que un hormigón tradicional no puede tener una resistencia a compresión superior que la que presenten los áridos que lo forman. La influencia de este elemento sobre la resistencia del hormigón,

no solo se debe a la propia resistencia de los áridos, sino a otros factores como su forma, textura, absorción y limpieza superficial.

En la elaboración de hormigones, se suele utilizar áridos cuyas resistencias a compresión sean mayores a 100 N/mm. Entre los diferentes tipos de áridos utilizados podemos encontrar:

Árido	Resistencia a Compresión (N/mm)
Mármol	110
Cuarcita	250
Esquistos	170
Granito	180
Caliza	150
Gneis	140
Grava Sílicea	130

Tabla 2.4 Resistencia a compresión de áridos utilizados para la producción de hormigones

Además de la resistencia a compresión, la superficie exterior de los áridos tienen una gran influencia en algunas de las propiedades del hormigón, tanto en estado fresco así como en estado endurecido (docilidad, resistencias mecánicas...).

Utilizando áridos rodados se consiguen hormigones con una docilidad y trabajabilidad mayor, disminuyendo la cantidad de agua utilizada que con el uso de áridos de machaqueo. Sin embargo, el empleo de estos últimos otorga una mayor trabazón en la mezcla consiguiendo una mayor resistencia, especialmente a tracción y, en general, una mayor resistencia química (J. Montoya, 2001). Igualmente existen áridos laminares y aciculares que dan lugar a hormigones de una calidad inferior ya que por un lado influye negativamente en la resistencia del hormigón, y por otro y debido a su forma, tienden a orientarse en un plano acumulando bajo ellos agua y aire que repercute desfavorablemente en la durabilidad de los hormigones, produciendo una disminución de la adherencia árido/pasta.

Existe un método a partir del cual medir la forma de los áridos empleados para la confección de hormigones: el coeficiente de forma. Dicho coeficiente es la relación existente entre una esfera y la forma real

del árido, el cual debe ser lo más cercano a la unidad. Atendiendo a los tipos de áridos que nos podemos encontrar en el mercado, el árido rodado, es el que más se aproxima a la unidad, y por consiguiente es el que mayor fluencia consigue en el hormigón (F. Cánovas, 1999).

$$\alpha = \frac{V}{\frac{\pi \cdot d^3}{6}}$$

donde:

α es el coeficiente de forma.

V es el volumen de cada grano.

d es la mayor dimensión del grano, es decir, la distancia entre los dos planos paralelos y tangentes a dicho grano que estén más alejados entre sí, de entre todos los que sea posible trazar.

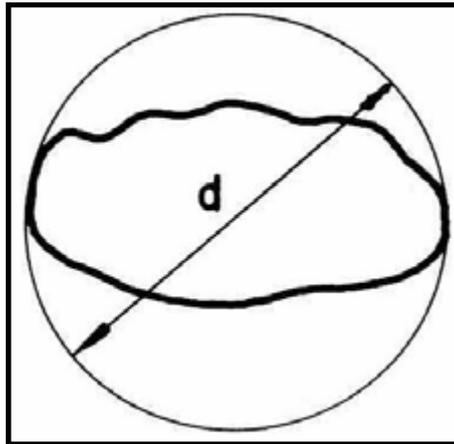


Fig. 2.2 Árido real y esfera circunscrita a él (F. Cánovas, 1999)

Ya se ha mencionado anteriormente que la textura superficial del árido influye en la resistencia de cualquier hormigón, sobretodo en la resistencia a flexotracción. Este hecho se debe la rugosidad del árido, es decir, cuanto más rugoso sea un árido, mayor será la superficie de

contacto entre la pasta cemento y el propio árido, por lo que, existirá una mayor adherencia entre ambos elementos.

La adherencia entre la pasta de cemento y el árido depende generalmente de la forma, naturaleza, porosidad del árido, y especialmente de su estado superficial. De este modo la superficie del árido debe ser la adecuada. Por otro lado se debe limitar la presencia de finos, ya que éstos influyen negativamente en la adherencia árido/pasta, además de exigir mayor cantidad de agua de amasado debido a su pequeño tamaño. También puede haber presencia de arcillas, las cuales deben ser eliminadas mediante un lavado, ya que generan una disminución en la resistencia a tracción del hormigón debido a la falta de adherencia que provocan entre el árido y la pasta de cemento.

La normativa vigente (EHE-08) limita el contenido máximo, en peso, de finos que pasan por el tamiz 0,063mm, según se trate de árido fino o grueso, rodado o de machaqueo, procedente de rocas calizas o no calizas, y del tipo de exposición al que vaya a estar expuesto.

ÁRIDO	% MÁXIMO QUE PASA POR EL TAMIZ 0,063mm	TIPOS DE ÁRIDOS
Grueso	1%	- Áridos redondeados - Áridos de machaqueo no calizos
	2%	- Áridos de machaqueo calizos
Fino	6%	- Áridos redondeados - Áridos de machaqueo no calizos para obras sometidas a las clases generales de exposición IIIa, IIIb, IIIc, IV o bien a alguna clase específica de exposición
	10%	- Áridos de machaqueo calizos para obras sometidas a las clases generales de exposición IIIa, IIIb, IIIc, IV o bien a alguna clase específica de exposición - Áridos de machaqueo no calizos para obras sometidas a las clases generales de exposición I, IIa o IIb y no sometidas a ninguna clase específica de exposición

	15%	- Áridos de machaqueo calizos para obras sometidas a las clases generales de exposición I, IIa o IIb y no sometidas a ninguna clase específica de exposición
--	-----	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Tabla 2.5 Contenido máximo de finos en el árido (Tabla 28.3.3.a , EHE-08)

A medida que aumenta el tamaño del árido disminuye la retracción, debido principalmente a dos factores:

- El árido es la parte resistente, a mayor tamaño más resiste dentro de unos límites.
- Al aumentar el tamaño del árido la pasta de cemento tiene que recubrir menos superficie por lo que disminuirá la cantidad de cemento, disminuye la cantidad de agua y como consecuencia la retracción es menor.

Aunque parezca un factor de poca relevancia, la distribución de los distintos tamaños de los granos que conforman un árido tiene una importancia decisiva en las características del hormigón. El estudio de dicha distribución suele efectuarse mediante la curva granulométrica, que se determina cribando el árido a través de una serie normalizada de cribas y tamices.

Los tamices normalmente empleados corresponden a las series ISO-565, UNE-7050 o la serie americana Tyler. Los áridos utilizados en la elaboración del hormigón se obtienen, usualmente, mezclando arenas y gravas en proporciones apropiadas, o mejor aún tres o más grupos de distintos tamaños.

Tamices	Abertura en milímetros									
	0,125	0,250	0,50	1,00	2,00	4,00	8,0	16,0	31,5	63,0
ISO-565	0,125	0,250	0,50	1,00	2,00	4,00	8,0	16,0	31,5	63,0
UNE-7050	0,160	0,320	0,63	1,25	2,50	5,00	10,0	20,0	40,0	80,0
Serie Tyler	0,149	0,297	0,59	1,19	2,38	4,76	9,5	19,0	38,0	76,0

Tabla 2.6 Series normalizadas de tamices (F. Cánovas, 1999)

Las propiedades que determinan las características granulométricas de un árido son:

- Tamaño máximo del árido (D).
- La compacidad.

- Contenido en granos finos.

Se denomina tamaño máximo de un árido (D) a la mínima abertura de tamiz por el que pasa más del 90% en peso, debiendo pasar la totalidad del árido por el siguiente tamiz. El tamaño máximo del árido está condicionado por las dimensiones de los elementos estructurales y por la separación entre armaduras, influyendo también los medios de amasado y la puesta en obra del hormigón.

Entendemos por compacidad de un árido a la relación entre el volumen real y su volumen aparente. Dicha relación aumenta con el coeficiente de forma de la grava. A medida que mayor sea la compacidad de un árido, menor será el volumen de huecos dejado por él mismo, por consiguiente, disminuirá la cantidad de pasta de cemento necesaria para rellenarlo. Las granulometrías de compacidad elevadas se obtienen con mezclas con gran proporción de granos gruesos y relativamente pobres en arena, requiriendo de este modo poca cantidad de agua de amasado; y dando lugar a mezclas poco trabajables y que tienden a disgregarse con facilidad. Sin embargo, disponiendo de medios adecuados para su correcta puesta en obra y compactación, se pueden conseguir hormigones muy resistentes, de mucha durabilidad y con poca retracción.

No obstante, para conseguir una masa de hormigón con cierto grado de docilidad, trabajabilidad, y que no se disgregue en el transporte, puesta en obra y compactación, debe tener un contenido óptimo de finos. Al aumentar el contenido de finos, se genera una disminución en la compacidad del propio árido y a consecuencia de esto, es necesario incrementar:

- La cantidad de cemento, a consecuencia del aumento de la superficie específica de los áridos.
- La cantidad de agua del hormigón, a causa del aumento del contenido de cemento y en función de la capacidad de absorción que tenga el árido utilizado.

Esto es necesario para conseguir que el cemento se hidrate completamente. En cada caso, se deberá elegir la opción que satisfaga ambos aspectos: la compacidad del árido y el contenido óptimo de finos.

La normativa establece unos límites en la curva granulométrica de la mezcla definitiva del árido fino y grueso, para limitar los factores anteriormente planteados (Fig. 2.3).

Resulta imposible establecer de una forma general una curva granulométrica óptima, por lo que existen varios métodos para obtener una curva para cada caso:

- Parábola de Bolomey.
- Parábola de Fuller.

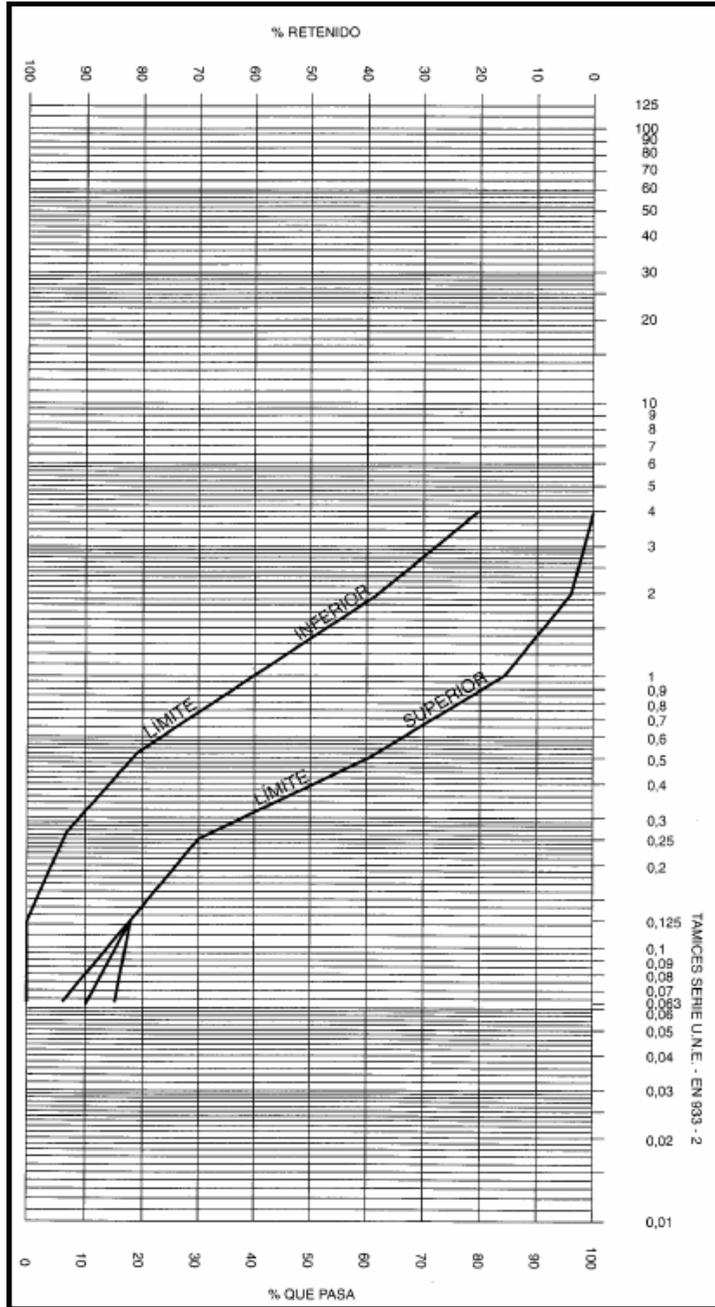


Fig. 2.3 Curvas granulométricas (EHE-08)

Árido Fino (Arena)

Este tipo de árido tiene una mayor importancia en relación con la fabricación de un hormigón que la grava. Además, a diferencia del agua, la grava e incluso el cemento, se puede decir que es imposible confeccionar un buen hormigón sin utilizar una arena con calidad. En este caso, las arenas más recomendables son las de río, ya que generalmente, son de cuarzo de una gran pureza, por lo que no hay que preocuparse acerca de su resistencia y durabilidad.

Atendiendo al tipo de arena que se debe utilizar, no existe ningún tipo de limitación, así que pueden utilizarse arenas trituradas, rodadas, síliceas o calizas. En cambio, acerca de la distribución de su tamaño, es necesario utilizar arenas continuas, sin cortes en su granulometría, evitando las formas lajosas.

Por otro lado, la humedad de este tipo de árido ejerce una gran importancia en la confección de cualquier hormigón, por lo que es un factor que se debe tener en cuenta.

La cantidad de árido fino empleado en la confección de cualquier tipo de hormigón está relacionada con la cantidad de grava utilizada, normalmente el contenido de arena suele representar entre el 50 y el 60% de la cantidad de árido total. Este factor depende a su vez de:

- Naturaleza del árido.
- Cantidad de adición empleada.
- Cantidad de cemento empleado.
- Características de la grava.

Árido Grueso (Grava)

Al igual que ocurre con el árido fino, la forma de las partículas del árido grueso tienen una influencia importante a la hora de elaborar un hormigón. De este modo, formas inadecuadas, como lajosas o aciculares, ofrecen una gran dificultad para obtener estructuras compactas, así como con una buena resistencia, y baja permeabilidad. Este hecho se debe entre otros factores, al deterioro de las propiedades de la zona de transición como consecuencia de la acumulación de agua exudada entre partículas.

La granulometría y forma del árido están especificados por el artículo 28 de la EHE fijando un tamaño máximo del árido grueso inferior a:

- 0,80 de la distancia libre entre armaduras.
- 1,25 de la distancia entre un borde de la pieza y una armadura.
- 0,25 de la dimensión mínima de la pieza.

La resistencia de este tipo de árido se puede apreciar en los cantos vivos resultantes del machaqueo, que deben ser limpios y agudos, y depende de tres factores:

- Densidad.
- Módulo de elasticidad.
- Dureza.

Aditivos

Se puede definir como aditivo, a cualquier sustancia o producto que, incorporados al hormigón (antes del amasado, durante el mismo o en el transcurso de un amasado suplementario) en unas cantidades determinadas, relacionadas con el peso del cemento, generan una modificación positiva deseada, tanto en estado fresco como en estado endurecido, de alguna de sus propiedades, características habituales o de su comportamiento. Debido a la importancia que tienen en la actualidad, este tipo de sustancia ha sido denominado como el “cuarto componente del hormigón”, por detrás de la fase árido, cemento y el agua. Además de la función descrita, los aditivos pueden tener alguna función secundaria independientemente de la que especifique la función principal.

Las dosis de aditivo empleadas en la confección de hormigones se deben controlar cuidadosamente, ya que en algunos casos sobrepasar un cierto límite puede generar efectos contraproducentes para el hormigón e incluso resultados contrarios a los deseados. Por otro lado, cabe citar que a doble dosis de aditivo no corresponde el doble efecto ni viceversa. (J. Montoya, 2001)

En el mercado se pueden encontrar numerosos tipos diferentes de aditivos (aceleradores, plastificantes, impermeabilizantes...) que otorgan al técnico varios caminos para conseguir hormigones con características variadas. La dosificación de este compuesto no suele superar el 5% del peso del cemento utilizado, y se aconseja tanto el uso de aquellos que estén garantizados y suministrados por empresas especializadas en el sector, como el seguimiento de las indicaciones de uso correspondientes. Igualmente, los fabricantes de aditivo deben etiquetar correctamente estos productos, según la norma 83.275:89 EX, y facilitar un certificado de garantía.

Según la norma UNE 83.200, los aditivos utilizados en la confección de hormigones, morteros o pastas se clasifican atendiendo a la función principal que desempeña cada uno de ellos. De este modo en el mercado se pueden encontrar:

- Aceleradores del fraguado.
- Retardadores del fraguado.
- Plastificantes.
- Fluidificantes.
- Superplastificantes y Superfluidificantes.
 - Naftalenos-Sulfonatos.
 - Melaminas-Sulfonatos.
 - Copolímeros de Vinilo.
 - Policarboxilatos.
- Aireantes.

Aceleradores del fraguado.

Este tipo de aditivo se utiliza en la elaboración de hormigones, morteros o pastas, con el objetivo de agilizar el proceso de fraguado o el de endurecido del mismo, y en general, ambos procesos a la vez.

El acelerante más conocido y utilizado es el cloruro de calcio (CaCl_2), sin embargo, existen en el mercado otros compuestos que también pueden desempeñar esta función, entre los que destacan: el cloruro de sodio, potasio o amonio, los carbonatos, silicatos, aluminatos, boratos de sodio o potasio...

Estos compuestos aceleran el proceso de fraguado y/o endurecimiento ya que favorecen la disolución de los constituyentes anhidros del cemento o su velocidad de hidratación. Aunque su acción no está muy bien definida, parece ser que provocan una cristalización rápida de los silicatos y aluminatos cálcicos que se encuentran en la pasta de cemento hidratada.

El cloruro de calcio (CaCl_2), aumenta la velocidad de hidratación en sus primeras horas, generando por un lado resistencias iniciales elevadas, y por otro una gran liberación de calor. Este hecho es debido a que dicho compuesto actúa como catalizador en las reacciones de hidratación del aluminado del cemento, dando lugar a la sal de Friedel y acelerando la reacción entre el yeso con el aluminato tricálcico (C_3A) y el ferroaluminato tetrálcico. (C_4AF).

Utilizando el cloruro de calcio, el tiempo de iniciación del fraguado puede ser reducido incluso por debajo de la mitad del tiempo normal. Al ser mayor la velocidad de desprendimiento de calor en las primeras horas del amasado del hormigón, este aditivo posibilita el hormigonado en tiempo frío, ya que el calor desprendido por la pasta contrarresta en parte el frío exterior. Dependiendo del tipo y dosificación de cemento, un 1% de CaCl_2 sobre el peso de cemento, equivale a una elevación de temperatura de 6°C .

Además de estas ventajas, el cloruro de calcio también mejora la docilidad de los hormigones e incrementa su compacidad, sin alterar ni perjudicar las resistencias finales de los mismos, como ocurre con otros cloruros.

Sin embargo, este tipo de acelerante tiene el inconveniente de que puede dar lugar a eflorescencias y/o corrosión de las armaduras, especialmente si el hormigón está ubicado en un ambiente húmedo. De este modo, su uso en hormigones armados y pretensados está completamente prohibido, al igual que en cualquier producto cuya composición intervengan cloruros, sulfuros, sulfitos u otros componentes químicos que ocasionen o favorezcan la corrosión de las armaduras.

A partir del dato mencionado en el apartado anterior, se entiende que el cloruro de calcio se emplee exclusivamente en un tipo de hormigón:

el hormigón en masa. La dosis normal de uso varía entre el 1% y el 2%, aunque, en algunos casos, se puede llegar al 3%. Se debe tener en cuenta que la utilización de altas dosificaciones de este compuesto pueden generar fraguados excesivamente rápidos creando dificultades en su puesta en obra, aunque en ocasiones, como en el taponamiento de canalizaciones de agua son muy útiles.

Finalmente y acerca del cloruro de calcio, se deben indicar otras especificaciones acerca del uso de este compuesto y las influencias que tiene sobre el hormigón:

- Incrementa la retracción y fluencia del hormigón.
- Aumenta la resistencia a la abrasión de los hormigones de forma permanente.
- Se puede emplear con cualquier tipo de cemento portland, pero no con morteros de cal o cemento aluminoso.

El cloruro de sodio (NaCl) tiene un comportamiento similar al de calcio aunque más moderado en el calor de hidratación. Sin embargo, se ha comprobado que su uso genera pérdidas de resistencia en el hormigón, por lo que se prescinde de su empleo.

Otro acelerante empleado de forma frecuente es el carbonato de sodio (Na_2CO_3), pero su dosificación debe controlarse estrictamente ya que en pequeñas dosis puede actuar como retardador. En cualquier caso provoca un aumento considerable de la retracción. Su dosificación óptima oscila entre el 2% y el 5%.

Durante estos últimos años se ha incrementado el uso de acelerantes a base de aluminato de sodio (NaAlO_2), debido a dos factores:

- Gran eficacia.
- Carencia de efectos secundarios.

Los aceleradores de fraguado pueden ir asociados con otros aditivos con el fin de formar combinaciones binarias, ya sea con hidrófugos, plastificantes, aireantes...

Retardadores del fraguado.

Este tipo de compuestos son utilizados para conseguir que el fraguado del hormigón se produzca más tarde que en condiciones normales, es decir, retrasan la disolución de los constituyentes anhidros del cemento o su difusión.

Los retardadores pueden ser sustancias inorgánicas solubles, así como sustancias orgánicas:

- Sustancias inorgánicas solubles: cloruro de aluminio, nitrato cálcico, cloruro de cobre, sulfato de cobre, ácido fosfórico, ácido bórico...
- Sustancias orgánicas: glucosa, sacarosa, celulosa, aminas y aminoácidos... que en pequeñas proporciones pueden frenar el fraguado y endurecimiento del hormigón.

La principal función de este tipo de aditivo es incrementar el tiempo durante el cual un hormigón es trabajable proporcionando:

- El transporte del hormigón sin que se produzca un endurecimiento prematuro y/o la segregación del mismo, sobre todo en largas distancias, hormigones bombeados, inyectados...
- La capacidad de controlar el principio de fraguado de una masa consiguiendo que una pieza hormigonada en varias fases fragüe al mismo tiempo sin provocar juntas o discontinuidades.
- La disminución del calor de hidratación, de modo que sea posible hormigonar en tiempo caluroso.

Dependiendo de su naturaleza los retardadores de fraguado pueden actuar de dos formas diferentes:

- Formando sales cálcicas que son adsorbidas por las partículas de cemento, de forma que se retrase la hidratación de la pasta.
- Beneficiando la solubilidad del sulfato cálcico, que por su condición es un retardador del fraguado.

La utilización de este tipo de compuestos debe realizarse de forma cuidadosa, ya que si se emplean dosis inexactas se puede dificultar el

fraguado y endurecimiento del hormigón. De este modo es más frecuente el uso de otro tipo de aditivos, como fluidificantes o reductores de agua de amasado, que al mismo tiempo actúan como retardadores. Sin embargo, el uso de éstos últimos disminuyen la resistencia a edades tempranas, pero no a los 28 días, la cual puede ser superior a la supuesta.

Plastificantes.

Este tipo de compuestos actúan tanto de forma mecánica como física, y están constituidos a base de polvos muy finos, tales como la bentonita, filler calizo, puzolanas molidas... que al aumentar la proporción de fino del hormigón mejoran su trabajabilidad facilitando el deslizamiento de los granos en la pasta. Se suelen emplear en proporciones entre el 2% y el 5% sobre el peso del cemento. Además de conseguir mayor trabajabilidad en un hormigón, también favorece la docilidad del mismo, mejorando su impermeabilidad, sin afectar a ninguna de sus propiedades. Los plastificantes son muy eficaces cuando los áridos están faltos de finos o presentan un coeficiente de forma bajo.

El hecho de añadir materiales polvorientos a la pasta, no permite reducir la relación a/c ; sin embargo, sí exige más cantidad de agua de amasado. Por consiguiente, estos productos no aumentan las resistencias mecánicas, excepto en el caso que consigan una granulometría más perfecta y/o sean de naturaleza puzolánica como sucede con las cenizas volantes. Si se añaden proporciones mayores al 5% de cenizas volantes se obtiene una mejora de las características mecánicas a largo plazo, debido a su origen puzolánico.

Fluidificantes

Este tipo de aditivos son compuestos líquidos de naturaleza orgánica constituidos por macromoléculas tensoactivas que, sin introducir aire en su masa, intentan mejorar la cohesión y reología del hormigón. Dichas moléculas ejercen en la pasta un efecto lubricante y una dispersión de las partículas de cemento, consiguiendo que requieran menor cantidad de agua para su hidratación. Dependiendo del tipo, la máxima capacidad de reducción de agua de un fluidificante puede llegar a ser del 15%.

Los primeros fluidificantes se comienzan a utilizar en los años 30 del siglo pasado y son, en general, lignosulfato sódico, cálcico o de amonio, abietatos alcalinos sódicos o potásicos, sales de hidrocarburos, derivados del petróleo..., todos ellos de origen tensoactivo aniónico, o bien de carácter tensoactivo no iónico como el éster de poliglicol.

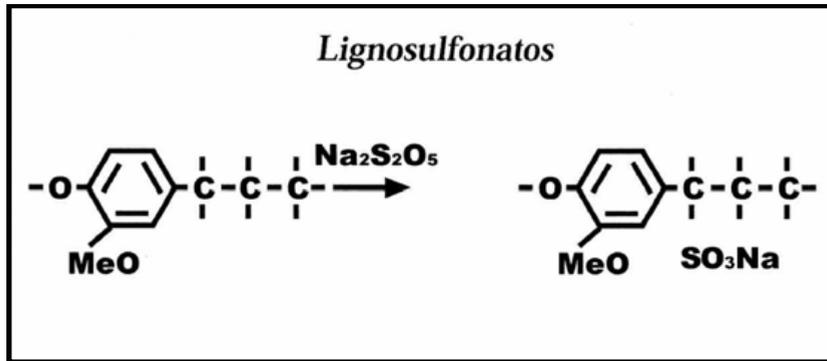


Fig. 2.4 Representación de los Lignosulfonatos (Garrido, 2003)

Este tipo de compuestos son utilizados en la elaboración de de hormigones, con el objetivo de mejorar alguna de sus características:

- Incrementar la docilidad sin aumentar la cantidad de agua de amasado.
- Reducir la relación agua/cemento en pastas con el mismo nivel de docilidad.
- Reducir la exudación y mejorar la adherencia a las armaduras.
- Disminuir la tendencia a la segregación del hormigón durante su transporte.
- Aumentar la resistencia a compresión a 28 días, entre un 10% y 20%, debido a la reducción de agua.
- Mejorar la durabilidad y la resistencia a la abrasión.
- Retardar ligeramente el fraguado de la pasta.

Estos aditivos deben emplearse en hormigones de consistencia seca o poco plástica, ya que son más eficaces en pastas con una pequeña relación agua/cemento.

Superplastificantes y Superfluidificantes.

En la mayoría de la bibliografía consultada, a este tipo de aditivo se le conoce indistintamente superplastificante o superfluidificante, ya que ambos están constituidos por los mismos componentes y realizan tanto las funciones de un fluidificante como de un plastificante.

Este tipo de productos son una mejora de los descritos en apartados anteriores (plastificantes y fluidificantes), ya que mediante su uso se pueden alcanzar reducciones de agua superiores, desde un 15% hasta un 40%, dependiendo de la naturaleza del aditivo. En el caso que se soliciten reducciones superiores se deberán utilizar cantidades considerables de plastificante, lo cual puede provocar una serie de efectos secundarios adversos, así como:

- Presencia de aire ocluido.
- Posibilidad de exudación y/o segregación.
- Alteraciones importantes en el fraguado.

La mayor eficacia de estos aditivos se obtiene empleando dosificaciones de cemento superiores a 300kg/m³.

Los superplastificantes y superfluidificantes pertenecen a una nueva generación de aditivos plastificadores en base a productos procedentes o melaninas y/o naftalenos, constituyendo una evolución de los aditivos reductores de agua, que en la adsorción y capacidad de dispersión del cemento es mucho más acentuada.

Los efectos derivados de la incorporación de algún componente tensoactivo a la pasta de cemento son los siguientes:

- Por un lado, la ionización de los filamentos del aditivo que genera la separación de los granos de cemento entre sí, conduciendo a una efectiva desfloculización.
- Por otro lado, las moléculas del aditivo son absorbidas y se orientan en la superficie de los granos de cemento en un espesor de varias moléculas, de lo que resulta una lubricación de las partículas.

Con el fin de comprender el funcionamiento de estos aditivos es necesario describir el comportamiento agua-cemento en el proceso de mezclado y fraguado del hormigón. En primer lugar, se forma la pasta aglutinante resultado de la lubricación de las partículas de cemento y de árido tras la adsorción de agua; después, dicha pasta se vuelve cementante debido a la reacción química existente entre ambas al iniciarse el proceso de fraguado.

En la primera de estas fases es donde se produce el mezclado de los componentes y comienzan las primeras reacciones electroquímicas entre el agua y el cemento, surgiendo las primeras propiedades del hormigón fresco: trabajabilidad, consistencia, docilidad...

Estas características son producto generalmente de las reacciones que se producen entre las moléculas de agua y los granos de cemento, los cuales poseen un gran número de iones en disolución en su superficie. Dichos iones suelen formar flóculos o capas de solvatación al entrar en contacto con el agua durante la fase de amasado, que generan dos efectos dañinos para la masa de hormigón:

- Dificultan la dispersión uniforme de las partículas de cemento en la masa de hormigón.
- Retienen cierta cantidad de agua en el interior de su masa que incide negativamente en la porosidad final del material por no ser utilizable para lubricar la masa ni para la lubricación de los granos de cemento.

Los efectos nocivos de la floculación pueden ser contrarrestados, en parte, mediante la incorporación a la masa de hormigón de ciertos compuestos químicos tales como policondensados de naftaleno y formaldehído, también conocidos superplastificantes, superfluidificantes o reductores de agua de alto rango.

Estos compuestos actúan neutralizando las cargas eléctricas ubicadas sobre la superficie de las partículas de cemento, por lo que también se impide la formación de flóculos. Debido a su forma lineal y alargada, estas moléculas orgánicas pueden cubrir totalmente la superficie de los granos de cemento, incorporándole cargas de signo negativo, que

provocarán una fuerza de repulsión entre las partículas de cemento dificultando el proceso de la floculación. En cambio, y debido al efecto envolvente de estas moléculas, y en el caso de altas dosis, se puede producir un efecto de retardo de la hidratación de los granos.

Así, el modo de acción de los superplastificantes y/o superfluidificantes se puede dividir en tres fases consecutivas:

- Adsorción de los polímeros por parte de las partículas de cemento en la etapa de transición sólido-líquido.
- Carga de la superficie de los granos con fuerzas electrostáticas de repulsión por tener el mismo signo.
- Aparición de tensiones superficiales que aumentan la distancia entre partículas.

Atendiendo a su naturaleza y su grado de acción, podemos encontrar diferentes tipos de superplastificantes y/o superfluidificantes:

- Naftalenos-Sulfonatos.
- Melaminas-Sulfonatos.
- Copolímeros de Vinilo.
- Policarboxilatos.

Naftalenos – Sulfonatos.

Los naftalenos – sulfonatos son compuestos que se obtienen a través de una serie de procesos de refinado del carbón. Éstos confieren al hormigón una serie de características:

- Reducen en aproximadamente un 20% el agua de amasado.
- Aportan una buena manejabilidad a la pasta.
- Mejoran considerablemente la resistencia a 28 días.

Sin embargo el uso de estos productos puede afectar negativamente al hormigón, ya que pueden ocluir aire en su interior, aunque siempre en pequeñas cantidades.

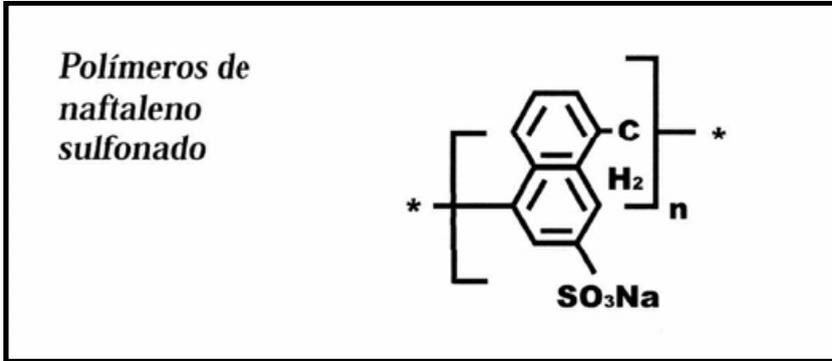


Fig. 2.5 Representación de los Polímeros de naftalenos-sulfonatos (Garrido, 2003)

Melaminas – Sulfonatos

Estos tipos de aditivos están constituidos a base de polímeros sintéticos. Proporcionan una reducción de agua semejante a la de los aditivos descritos en el apartado anterior, y como característica principal otorgan al hormigón resistencias a edades tempranas más elevadas. Por otro lado, son muy recomendables para la elaboración de elementos arquitectónicos con cemento blanco, ya que el polímero es incoloro.

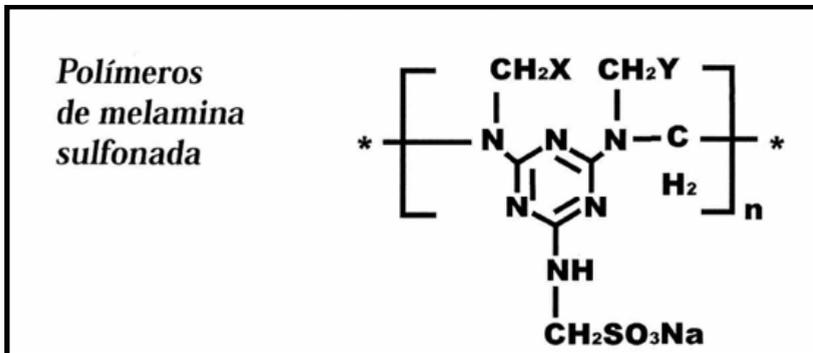


Fig. 2.6 Representación de los Polímeros de melaminas sulfonadas (Garrido, 2003)

Sin embargo, el uso de este compuesto presenta un efecto adverso: la pérdida de trabajabilidad del hormigón es demasiado rápida. Este problema se ha disminuido considerablemente con los aditivos superplastificantes de tercera generación, los policarboxílicos.

Copolímeros de Vinilo

Debido a que las moléculas que presentan estos polímeros sintéticos son de mayor tamaño que los detallados previamente, ejercen un efecto plastificante o fluidificante superior.

Al igual que el tamaño, la disposición de las partículas del cemento es mucho más efectiva, de este modo:

- Proporciona una mayor reducción de agua, alrededor de un 30%.
- La porosidad se reduce a valores entre el 5% y el 10%.
- Confiere al hormigón un mayor tiempo de trabajabilidad que los superplastificantes de melaninas o naftalenos.

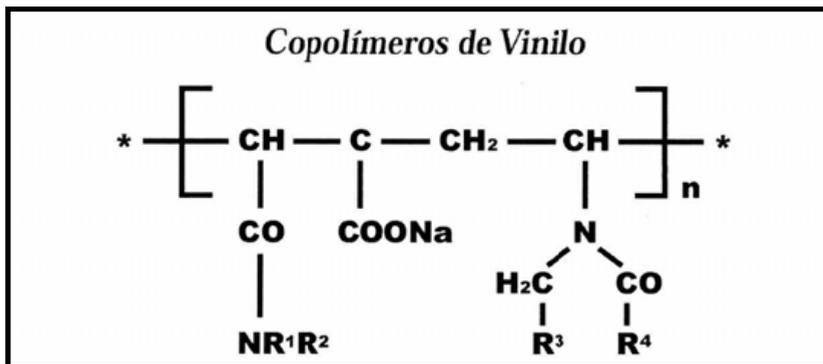


Fig. 2.7 Representación de los Copolímeros de Vinilo (Garrido, 2003)

Policarboxilatos

Ya se ha mencionado anteriormente que los policarboxilatos pertenecen a la tercera generación de aditivos. Están constituidos a base de copolímeros de ácido acrílico y grupos éter de ácido acrílico; a

diferencia de los superplastificantes o superfluidificantes clásicos los policarboxilatos poseen cadenas laterales.

Para poder entender la mejora que presentan los policarboxilatos respecto a los aditivos a base de melaninas y naftalenos, se debe explicar tanto la forma y método de actuar que ambos tienen sobre el hormigón. Por un lado, los aditivos tradicionales a base de melaninas y naftalenos se basan en un efecto de dispersión de las partículas de cemento. Ésta se obtiene debido a que la molécula del aditivo posee una estructura de dipolo con grupos cargados con energía negativa. Dichas moléculas se absorben por los gránulos de cemento y los dota de cargas negativas, haciendo que los mismos se repelan entre sí. El efecto de repulsión electrostática disminuye progresivamente al depositarse sucesivas capas de productos de hidratación en la superficie del grano de cemento, lo que conlleva una pérdida de la fluidez y trabajabilidad.

Sin embargo, los recientes aditivos, constituidos por éteres policarboxílicos, basan su efecto dispersante en considerables cadenas laterales, y no en la repulsión electrostática. Las extensas cadenas laterales crecen más allá de los productos de hidratación del cemento, aportando una mayor dispersión. Estas cadenas son las causantes del efecto esférico; con el transcurso del tiempo, una segunda molécula se activa mediante el efecto esférico consiguiendo que actúe durante más tiempo.

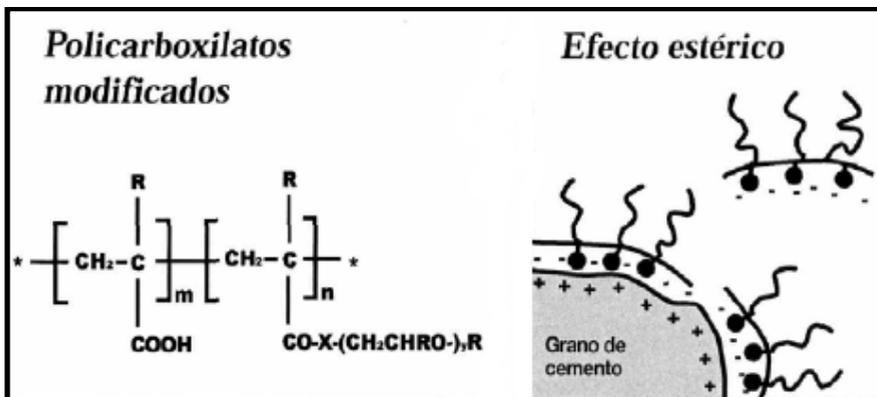


Fig. 2.8 Representación de los Policarboxilatos modificados (Garrido, 2003)

Debido a este proceso, el uso de este tipo de aditivos confiere al hormigón unas propiedades parecidas e incluso superiores a la de otros superplastificantes:

- Reducción de la cantidad de agua de amasado (hasta un 40%).
- Disminución de la porosidad capilar (entre el 5% y el 10%).
- El tiempo de trabajabilidad es muy superior al de los superfluidificantes y superplastificantes convencionales.
- Otorga al hormigón gran cohesión, impermeabilidad y excelentes acabados.

Este tipo de características son muy útiles para el hormigonado de piezas de geometría complicada o con gran concentración de armaduras, así como para bombear hormigón y en prefabricados. Además, permiten una puesta en obra rápida y económica, al no ser necesario, generalmente, vibrar la masa del hormigón, debido a la gran fluidez de la misma.

Aireantes

La función de este tipo de aditivos es generar en el hormigón una gran cantidad de finas burbujas de aire, de diámetros comprendidos entre 25 y 200 micras, distribuidas de forma uniforme. Dichas burbujas están presentes en el hormigón tanto en estado fresco como una vez endurecido.

Los aireantes son productos a base de resinas naturales (procedentes de la madera), detergentes sintéticos, sales de materias proteínicas, grasas, aceites animales o vegetales... Independientemente de su naturaleza, estos compuestos deben ser compatibles con el cemento, para evitar que afecten a cualquier tipo de sus propiedades.

Principalmente los aireantes confieren al hormigón dos propiedades:

- Mayor fluidez en estado fresco. Este hecho se debe a que el aire ocluido actúa como fino que no absorbe el agua, y como

rodamiento de bolas elástico, que mejora el deslizamiento entre los áridos.

- Mayor durabilidad en estado endurecido. Es el motivo principal de la utilización de los aireantes en la actualidad. Esta mayor durabilidad se produce al cortar la red capilar, que actúa de cámara de descompresión en el caso de helarse el agua del capilar, o de las sales expansivas debidas a sales de deshielo.

Esta clase de aditivos se utilizan normalmente en aquellos hormigones que tengan un bajo contenido de finos, o bien, estén sometidos a ciclos de hielo-deshielo (pavimentos, presas de alta montaña...)

La dosificación de estos compuestos debe realizarse con la del agua de amasado, con el fin de conseguir mayores resultados, ya que la cantidad a aditivar es generalmente pequeña y no se produciría un buen reparto al añadirlo a la masa del hormigón.

Se considera que un aditivo es eficaz cuando introduce en el hormigón una cantidad de aire comprendida entre el 2% y 6%. Sin embargo, la cantidad del aire ocluido en el hormigón mediante un aditivo aireante depende de la dosificación de éste, de la cantidad, tipo de y finura de molido de cemento, de la cantidad de finos, de la granulometría, consistencia del hormigón y tiempo de amasado, por lo que se debe hacer ensayos con los mismos componentes del hormigón y condiciones de la obra para determinar la dosificación óptima de aireante para obtener la cantidad de aire ocluido requerido a las necesidades de la obra.

Adiciones

Actualmente, la mayoría de las mezclas de hormigón contienen adiciones. Son materiales inorgánicos procedentes de procesos o de materiales de origen natural, que se añaden al hormigón con el objetivo de mejorar alguna de sus propiedades o proporcionarle características especiales. Estos materiales pueden o no ser procesados antes de ser utilizados.

Para su uso en el hormigón, las adiciones minerales deben cumplir una serie de requisitos que vienen descritos en las normas establecidas.

Las adiciones pueden ser utilizadas individualmente o en combinación con el hormigón, es decir, se pueden añadir a la mezcla junto con el cemento, o como un ingrediente dosificado separadamente en la planta de hormigón.

Las adiciones son utilizadas, para mejorar el comportamiento del hormigón, tanto en estado fresco como en estado endurecido, principalmente la trabajabilidad, durabilidad y la resistencia. Además, permiten diseñar y modificar la mezcla de hormigón para satisfacer la aplicación deseada. Las mezclas de hormigón con grandes contenidos de cemento portland generan un gran calor de hidratación y son susceptibles a la fisuración. Estos efectos pueden ser controlados en cierta medida mediante la utilización de adiciones al cemento.

Los materiales cementantes suplementarios tales como las cenizas volantes, las escorias y el humo de sílice le permiten a la industria del hormigón utilizar millones de toneladas de subproductos que de otra forma serían vertidos en el terreno como desechos. Por otro lado su utilización disminuye el consumo de cemento portland por unidad de volumen de hormigón. El cemento portland tiene un elevado consumo de energía y de emisiones asociadas con su producción, por lo que al reducir la cantidad de cemento utilizada, el consumo energético desciende.

En general, con el uso de estos productos se mejoran la consistencia y la trabajabilidad del hormigón fresco, ya que se le añade un volumen adicional de finos a la mezcla. El hormigón con humo de sílice es utilizado normalmente con bajos contenidos de agua, con aditivos superplastificantes, por lo que estas mezclas tienden a ser más cohesivas y viscosas que el hormigón tradicional. Por otro lado, las cenizas volantes y las escorias de alto horno reducen la demanda de agua requerida por el hormigón; así como, el fraguado del mismo se puede retrasar al emplear porcentajes elevados de adición, lo cual es beneficioso en el caso de climas calientes. Dicho retardo se elimina en invierno al reducir el porcentaje de adiciones utilizado.

Las mezclas de hormigón pueden ser diseñadas tanto para alcanzar una determinada resistencia, así como para conseguir que la velocidad de ganancia de resistencia sea la requerida dependiendo de la función

que vaya a desempeñar. Con las adiciones que no sean humo de sílice, la velocidad de ganancia de resistencia puede ser más baja inicialmente, pero es continuada por un período de tiempo más largo comparado con las mezclas que sólo poseen cemento portland, lo que frecuentemente da como resultado resistencias últimas más elevadas.

Además de los usos que se han comentado, las adiciones al cemento pueden ser empleadas para disminuir el calor asociado con la hidratación del cemento y reducir de este modo el potencial de fisuración térmica en elementos estructurales masivos. Estos materiales alteran la microestructura del hormigón y disminuyen su permeabilidad, por lo que se reduce la penetración de agua y sales disueltas en el hormigón. La mayoría de las adiciones mitigan la expansión interna del hormigón debido a reacciones químicas así como la reacción árido-álcali y el ataque de sulfatos.

La combinación óptima de materiales variará para diferentes requisitos de desempeño y para el tipo de adición. El fabricante de hormigón, con conocimiento de los materiales disponibles, debe establecer las proporciones de la mezcla para la función requerida. Las restricciones prescriptivas sobre las proporciones de la mezcla pueden inhibir la optimización y la economía. Si bien se discutieron anteriormente varias posibles mejoras de las propiedades del hormigón, estas no son mutuamente excluyentes y la mezcla debe ser dosificada para los requerimientos de desempeño más críticos de trabajo con los materiales disponibles.

Las adiciones más empleadas son: puzolanas naturales, cenizas volantes, microsíllice o humo de sílice, escorias de alto horno o escorias siderúrgicas y filleres.

Puzolanas naturales

Las puzolanas naturales tienen normalmente un origen volcánico, y tienden a ser reactivos si son enfriados rápidamente. Entre los tipos comercialmente disponibles encontramos: el metacaolín y las arcillas o esquistos calcinados. Estos materiales son producidos mediante la calcinación controlada de origen natural. El metacaolín es producido a partir de arcillas caolínicas relativamente puras y se emplean entre el

5% y el 15% en peso de los materiales cementantes. Las arcillas o esquistos calcinados son utilizados a mayores porcentajes en peso. Otras puzolanas naturales son: los cristales volcánicos, ceniza de cáscara de arroz y tierra de diatomeas.

Cenizas Volantes

Las cenizas volantes son las partículas no combustibles removidas de las chimeneas de gases y se obtienen a partir de los hornos que emplean carbón mineral como combustible para la generación de energía. En estructuras de edificación la cantidad máxima de cenizas volantes adicionadas no excederá del 35% del peso de cemento. Las características de este producto pueden variar significativamente dependiendo de la naturaleza del carbón mineral de donde se extrae. De este modo, podemos distinguir:

- Cenizas de Clase F: Se obtienen normalmente de la quema de la antracita o de carbones bituminosos. Posee un contenido bajo en calcio.
- Cenizas de Clase C: Se producen a partir de la quema de carbones sub-bituminosos. Tienen propiedades puzolánicas.

Se trata de una adición activa, con la cual se consigue una serie de factores que mejoran el comportamiento del hormigón:

- Se disminuye el calor de hidratación del hormigón, por lo que la retracción es más débil.
- Fija la cal del cemento, aumentando las resistencias a largo plazo, disminuyendo la permeabilidad, y mejorando el comportamiento contra sulfatos.

El uso de las cenizas ofrece grandes resultados en aplicaciones donde no se necesiten resistencias iniciales elevadas o se requiera un elevado mantenimiento de la consistencia. Sin embargo, no son la mejor opción en caso de hormigones prefabricados. Por otro lado, el empleo de esta adición, permite trabajar con cantidades de cemento más ajustadas debido a su naturaleza puzolánica, pero se debe verificar que la calidad de la ceniza sea la ideal.

Escorias molidas de alto horno

También son conocidas como escorias siderúrgicas, se obtienen por templado o enfriado brusco, mediante agua o aire, de la ganga fundida procedente de procesos siderúrgicos. Se trata de un material aglomerante hidráulico latente y granulado fino, que mejora las propiedades reológicas.

Es un residuo procedente de las fábricas siderúrgicas, pero se trata de una adición muy escasa. El empleo de este material confiere al hormigón una serie de propiedades:

- Al igual que las cenizas volantes, tienen un origen activo, por lo que reducen el calor de hidratación.
- Mejoran la retracción hidráulica, por lo que se utilizan en grandes volúmenes de hormigón.
- Aumentan las resistencias a largo plazo, aunque las iniciales disminuyen.
- Mejoran el comportamiento del hormigón frente al agua de mar y contra los sulfatos.

Sin embargo, aumentan la retracción autógena que aparece en relaciones a/c inferiores a 0.5, por lo que esta adición se debe emplear en relaciones a/c superiores.

Humo de sílice

El humo de sílice, también denominado microsíllice, es un subproducto pulverulento procedente de la fabricación en hornos eléctricos de silicio y ferrosilicio, a partir de cuarzo, hierro y caliza. El polvo se recolecta mediante filtros electrostáticos y está constituido por diminutas partículas esféricas de SiO_2 .

Según la Instrucción EHE, la adición de la microsíllice al hormigón no puede ser superior en dosificación al 10% del peso del cemento.

La función que desempeña el humo de sílice en el hormigón es doble: una física, al ejercer como plastificante debido a su finura, y otra química,

al reaccionar con el hidróxido de calcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ procedente de los compuestos activos del cemento dando lugar a silicatos cálcicos hidratados de composición semejante a los procedentes de la hidratación del cemento, produciendo una mejora de la resistencia mecánica. Además de los efectos descritos, la microsílíce consigue:

- Un aumento de la adherencia de la pasta a los áridos.
- Una disminución importante de la permeabilidad de los hormigones al cerrar muchos de los conductos capilares que éste posee.
- Un aumento de la cohesión de la mezcla.

El humo de sílice puede ser utilizado para cualquier aplicación, pero a pesar de que ofrece buenos resultados, tiene alguna limitación:

- Su cantidad está limitada por motivos de resistencia a flexión.
- Es un producto bastante caro.
- Exige una demanda elevada de agua.
- Altera el color final del hormigón.
- Debido a su extrema finura, deberán garantizarse procedimientos especiales para la manipulación, el vaciado y el curado del hormigón.

Filler

Este tipo de adición, procede de materiales inorgánicos minerales, naturales o artificiales, especialmente seleccionados, que mediante una correcta preparación en función de su granulometría, consiguen mejorar las propiedades físicas del cemento.

Pueden ser inertes o poseer propiedades ligeramente hidráulicas, hidráulicas latentes o puzolánicas. Generalmente son de naturaleza caliza, aunque también pueden proceder de dolomitas y granitos, pero siempre triturados finamente.

El filler calizo, constituido principalmente por carbonato de calcio (CaCO_3), es un residuo de difícil colocación, por lo que suele ir a vertederos inertes. De este modo, se trata de la adición con menor coste y que debido a su recuperación convierte la elaboración de hormigón en más sostenible. Ya que es un material inerte, no tiene reacción hidráulica, pero aumenta la cohesividad necesaria para estos hormigones. Además mejora la durabilidad, disminuye la retracción química y no afecta a la adherencia con las armaduras. Este tipo de adición, debe estar libre de contaminación de materia orgánica o arcilla, ya que son perjudiciales para las propiedades del hormigón.

Fibras

Las fibras utilizadas para reforzar la matriz del hormigón, son fibras discontinuas, rígidas o flexibles que se distribuyen de forma discreta y uniforme en el interior de la masa, otorgando al material tanto isotropía como homogeneidad. La capacidad de transmitir tensiones y la efectividad de la acción reforzante depende de varios factores, principalmente:

- Naturaleza.
- Tipo.
- Características geométricas.

La elección del tipo de fibra a utilizar depende del tipo de aplicación que vayan a desempeñar; de este modo las fibras de acero galvanizado se emplearán en hormigones en los que se deba mejorar la resistencia a tracción, flexión, fatiga e impacto y controlar la fisuración, las de acero inoxidable en la mejora de estas mismas propiedades en hormigones refractarios; las fibras de vidrio se emplearán en hormigones proyectados para aumentar la resistencia a tracción, flexión e impacto, las fibras plásticas se utilizarán en hormigones resistentes a choques o impactos.

Fibras sintéticas

Entre este tipo de fibras podemos encontrar varios modelos en el mercado: rayón, poliéster, polietileno, polipropileno, acrílicas, nylon,

kevlar, aramida... Las más utilizadas en hormigones son las de polipropileno, polietileno, acrílicas y nylon. Pueden estar formadas por filamentos sueltos o por redes plegadas que se abren cuando se amasan con el hormigón.

Las fibras sintéticas se caracterizan por tener un bajo módulo de elasticidad, consiguiendo mediante su empleo hormigones muy deformables. Aunque la resistencia a tracción no aumenta de forma significativa, se mejora la resistencia al impacto y se reduce la posible fisuración por retracción.

Fibras inorgánicas

Podemos distinguir entre las fibras inorgánicas: las de asbesto, las de vidrio y las de carbono, entre las que destacan las fibras de vidrio (AR).

Las fibras de vidrio poseen un módulo de elasticidad unas diez veces mayor que el de las fibras de polipropileno, y una resistencia de 3 a 4 veces superior a la de acero. El contenido de fibras en el hormigón suele oscilar entre el 3 y el 5%. Suelen tener una longitud que varía entre 20 y 400mm.

Este tipo de fibras presentan el inconveniente de ser atacadas por los álcalis de los cementos Portland. Este problema se puede evitar mediante varios procedimientos:

- Mediante el empleo de vidrios E con cementos ricos en alúmina y con un pH bajo.
- Utilizando vidrios resistentes a los álcalis con un 16% aproximado.
- A partir de vidrios E revestidos con una película de resina epoxi.
- Usando dichas fibras con cementos de alto contenido en alúmina y añadiendo a la pasta un polímero.

A pesar de estas soluciones, se ha comprobado que tanto las fibras revestidas con resina epoxi como las que emplean óxido de circonio, terminan por ser atacadas por los álcalis cuando los morteros están

sometidos a la acción de ambientes muy húmedos y, especialmente, si las temperaturas son elevadas.

Fibras vegetales

Las fibras vegetales empleadas normalmente en hormigones son: yute, sisal, coco, algodón, palmera, abacá...

Estas fibras incorporadas al hormigón dan lugar a mezclas muy interesantes desde el punto de vista de resistencias mecánicas, trabajabilidad y ligereza. Se debe tener muy en consideración el empleo de este tipo de fibras, ya que aunque puedan resolver de forma económica muchos de los problemas que se presentan en la construcción de viviendas de bajo coste, su excesiva utilización puede generar peligros de desertización.

Estos tipos de fibras deben recibir un tratamiento protector cuando se vayan a utilizar como refuerzo del hormigón, ya que pueden ser atacadas por acciones físicas o químicas, especialmente los álcalis, o por la acción de microorganismos. Dichos tratamientos deben estar en concordancia con el ambiente al que van a estar expuestos y a la alcalinidad del medio.

Fibras metálicas

Las fibras metálicas que se suelen emplear en hormigones son las de acero, ya que se trata de las más eficaces y económicas, y por poseer el acero un módulo de elasticidad diez veces superior al del hormigón. Entre otras propiedades, se pueden distinguir:

- Una buena adherencia a la pasta.
- Facilidad de mezclado.
- Poseen un alto alargamiento de rotura.

Estas fibras soportan los esfuerzos a tracción que resisten por adherencia al hormigón, controlan la fisuración y reducen la intensidad de la misma a la vez que mejoran la tenacidad.

En función del sistema de elaboración, las fibras pueden presentar en distintos tamaños, secciones, rugosidad superficial y formas. Estas fibras se pueden obtener de diferentes modos:

- Normalmente se obtienen por trefilado continuo, cortándose el alambre resultante a las dimensiones adecuadas.
- Mediante el corte de láminas de acero.
- Por arrancamiento de una pieza giratoria de acero a alta temperatura.

En el primer caso las fibras son de sección circular, en el segundo de sección cuadrada y en el tercero de sección irregular.

La incorporación de este tipo de fibras al hormigón puede generar un aumento de la resistencia a flexotracción y a tracción, un ligero aumento de la resistencia a compresión, un fuerte incremento de la resistencia a impacto, un aumento de la resistencia a la fatiga, fisuración controlada y el aumento de la tenacidad.

Capítulo 3. Propiedades del Hormigón Endurecido.

Introducción

Las propiedades de un hormigón endurecido no sólo dependen de su propia naturaleza sino, también, de su edad y de las condiciones de humedad y temperatura a las que haya sido sometido.

Es un material que, principalmente, va a trabajar a compresión, de este modo, el conocer su resistencia frente a esta sollicitación es de gran importancia.

Los ensayos que se deben realizar para determinar las características de un hormigón endurecido no tienen una normativa universal, por lo que cada país dispone de la suya propia, por lo que, los valores obtenidos, para un mismo hormigón, pueden ser muy dispares. Estos ensayos pueden ser destructivos y no destructivos:

- Ensayos destructivos: La probeta se destruye al realizar el ensayo.
- Ensayos no destructivos: Se puede seguir la evolución de las características mecánicas del hormigón en función del tiempo sin que el hormigón se altere.

Las características físicas importantes en el hormigón endurecido son: la densidad, la compacidad y la permeabilidad.

Características mecánicas

El hormigón es un material que ha sido diseñado para resistir principalmente esfuerzos de compresión. Aunque la resistencia a compresión del hormigón está principalmente influenciada con la porosidad del mismo, también depende de otros factores como la permeabilidad y la densidad.

Generalmente existe una relación inversamente proporcional entre la porosidad y la resistencia del sólido. Por la simple homogeneidad de los materiales, esto puede ser descrito por la siguiente expresión.

$$S = S_0 e^{-kp}$$

donde:

- S es la resistencia del material que tiene una porosidad dada p ;
- S_0 resistencia intrínseca con porosidad 0;
- k constante.

Powers encontró que a los 28 días la resistencia a compresión f_c de tres diferentes morteros tenía una relación entre los productos sólidos de hidratación en el sistema y el espacio total.

$$f_c = ax^3$$

donde:

- a resistencia intrínseca del material con porosidad 0;
- x relación sólido/espacio o cantidad de fracción sólida en el sistema, que es por lo tanto igual $(1 - p)$

Powers lo demuestra en el siguiente gráfico (Fig. 3.7) obteniendo un valor para la resistencia intrínseca del material $a = 234MPa$. Se aprecia que la semejanza de las tres curvas confirma la validez general de la relación de la fuerza y la porosidad en sólidos. Aunque en la pasta o mortero de cemento la porosidad se pueda relacionar con la fuerza, con el hormigón la situación es más compleja.

La presencia de microfisuras en la zona de transición entre el árido grueso y la matriz de la pasta lo hace complejo, aunque se puede seguir utilizando esta relación entre la fuerza y la porosidad debido a que llegan a ser fuerzas limitadoras, ya que tanto la pasta como la zona de transición es la que marca la resistencia del hormigón. Normalmente, en edades tempranas la zona de transición es más débil que la matriz, pero en edades tardías es al revés.

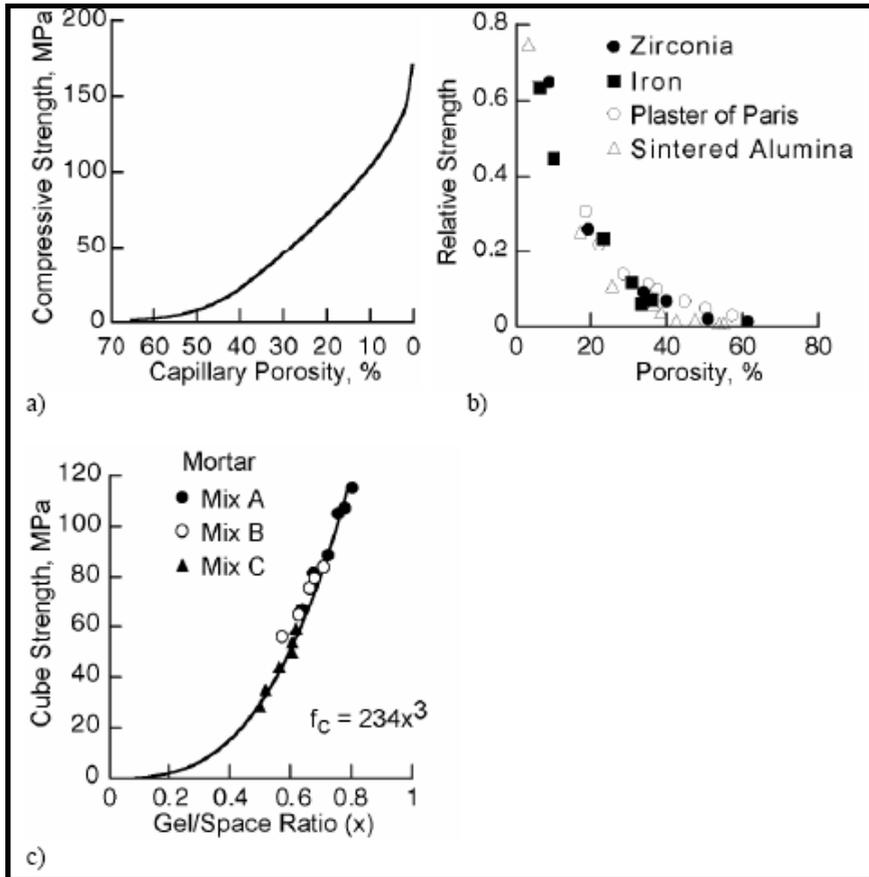


Fig. 3.7 Relación entre la resistencia y la porosidad (Monteiro, 2004)

De hecho la resistencia a compresión es la propiedad mecánica más relevante de un hormigón. Se determina mediante la realización de ensayos en probetas, siguiendo métodos normalizados. Depende de muchos factores, unos inherentes a la calidad del mismo y otros a la forma, dimensiones de las probetas y a las condiciones en que se lleva a efecto el ensayo.

En cuanto a la resistencia característica especificada, la EHE-08, recomienda la siguiente serie:

20, 25, 30, 35, 40, 45, | 50 |, 55, 60, 70, 80, 90, 100

En la cual las cifras indican la resistencia característica especificada del hormigón a compresión a 28 días, expresada en N/mm².

La resistencia de 20 N/mm² se limita en su utilización a hormigones en masa.

El hormigón que se prescriba deberá ser tal que, además de la resistencia mecánica, asegure el cumplimiento de los requisitos de durabilidad (contenido mínimo de cemento y relación agua/cemento máxima) correspondientes al ambiente del elemento estructural, reseñados en el artículo 37.3 (EHE-08).

Para conseguir un hormigón con una buena resistencia compresión es fundamental confeccionar una correcta dosificación con una relación a/c lo más baja posible, evitando el escape del agua por evaporación el cual crea la red capilar causante de la pérdida de resistencia; una buena puesta en obra con su correspondiente vibrado capaz de eliminar el aire ocluido del interior, compactando la masa, con el fin de lograr una compacidad lo mayor posible; y un buen curado, para que todo el cemento se hidrate y aumente la compacidad y durabilidad disminuyendo la retracción por lo que no aparecerán fisuras que disminuyan de algún modo la resistencia del hormigón.

A diferencia de su elevada resistencia a compresión, el hormigón presenta una resistencia a tracción baja, aproximadamente diez veces menor, causando generalmente la fisuración del mismo. La tracción suele determinar en función de la resistencia a compresión como se aprecia en la siguiente fórmula:

$$f_{ct,k;0,05} = 0,21 \sqrt[3]{f_{ck}^2}$$

Aunque no se suele tener en cuenta la resistencia a tracción del hormigón a efectos resistentes, es necesario conocer su valor porque juega un importante papel en ciertos fenómenos, como la fisuración, el esfuerzo cortante, la adherencia de las armaduras, etc.

Tensión-Deformación

Para determinar la forma de trabajar del hormigón en las estructuras de las que va a formar parte se debe conocer su módulo de elasticidad.

El diagrama tensión-deformación del hormigón varía en función de varios factores: edad del hormigón, duración de la carga, forma y tipo de sección, naturaleza de sollicitación, tipo de árido, estado de humedad, etc. (EHE-08 Art.39.3)

Debido a lo difícil que resulta disponer del diagrama tensión-deformación del hormigón, a efectos prácticos se pueden utilizar diagramas característicos simplificados.

La EHE en los comentarios del Art. 39.3 dice que se puede considerar, a título puramente cualitativo, el diagrama de Sagrin cuyos diagramas unitarios tensión-deformación del hormigón adoptan las siguientes formas (Fig. 3.1 y Fig. 3.2)

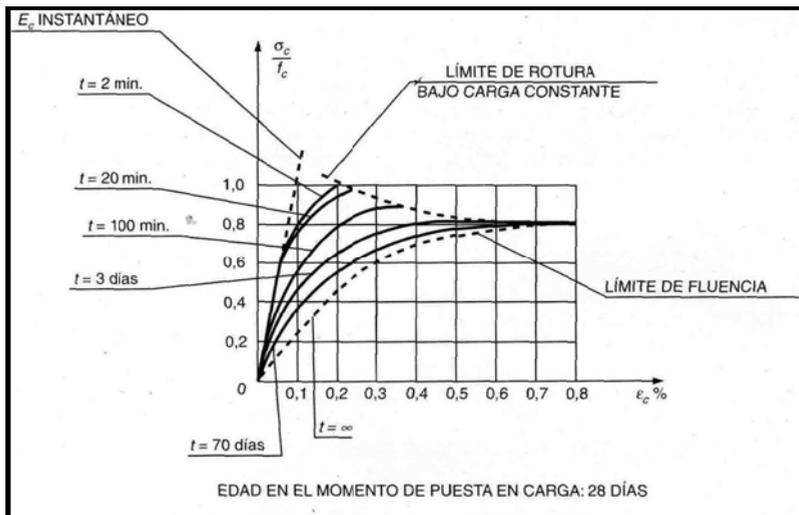


Fig. 3.1. Relación entre la tensión del hormigón y la tensión de rotura por compresión en probetas cilíndricas (Puesta en carga: 28 días)

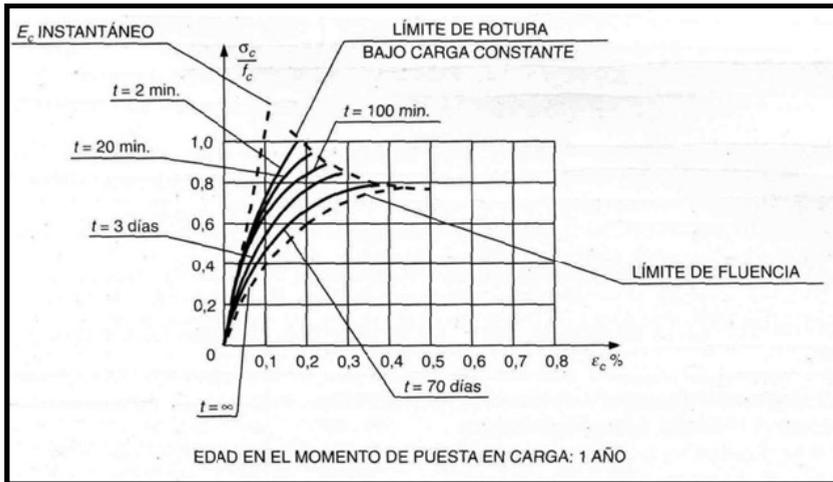


Fig. 3.2 Relación entre la tensión del hormigón y la tensión de rotura por compresión en probetas cilíndricas (Puesta en carga: 1 año)

Otro diagrama clásico utilizado hasta ahora es el que se obtiene de someter a una probeta de hormigón a un esfuerzo de compresión hasta una tensión menor a la de la rotura, determinándose los acortamientos unitarios experimentados en relación a las tensiones a las que ha sido sometida (Fig. 3.3). En ella se aprecia una línea ascendente hasta llegar a la tensión de carga considerada en la que la curva no presenta zonas rectilíneas, salvo en los primeros escalones de carga, es decir, que a diferencia de los metales, en el caso del hormigón se puede asegurar que no se cumple la Ley de Hooke.

Cuanto mayor es el módulo de elasticidad de los áridos y mayor la proporción en que entran en el hormigón, mayor es el módulo de elasticidad de éste.

El módulo de elasticidad es tanto mayor cuanto mayor es la edad del hormigón, aumentando más rápidamente con la edad que la resistencia a compresión.

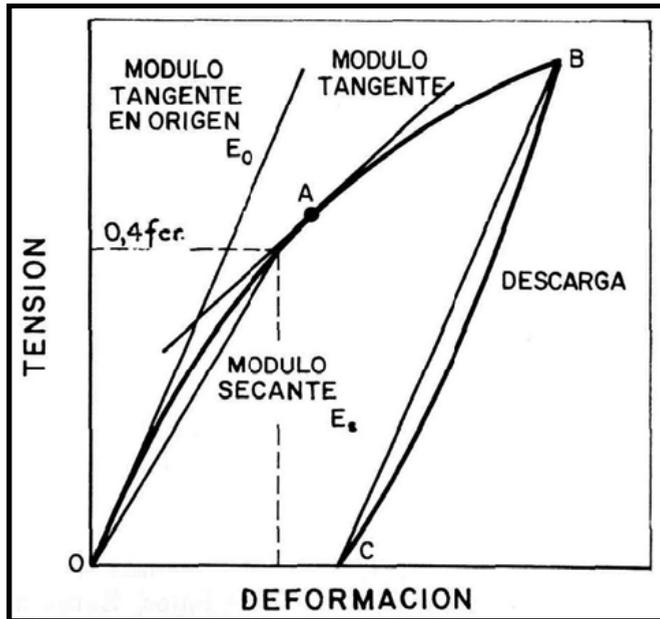


Fig. 3.3 Módulo de elasticidad del hormigón (F. Cánovas, 1999)

La forma de los áridos y su textura superficial afectan también al módulo de elasticidad debido a su influencia en la formación de microfisuras.

La elevación de temperatura afecta por igual y en el mismo sentido, a la resistencia a compresión y al módulo de elasticidad del hormigón, sin embargo, hasta una temperatura de 200°C puede considerarse que el hormigón no sufre alteraciones.

El módulo de elasticidad a tracción coincide con el de compresión si se determina como secante sobre el punto del 30% de la resistencia a tracción.

Durabilidad.

Además de para que resistan las cargas o acciones mecánicas previstas sin alcanzar el estado límite de agotamiento, las obras de hormigón deben proyectarse para que resistan aquellas acciones ambientales, ya sean físicas o químicas, que puedan deteriorarlas

reduciendo su vida de servicio o exigiendo para su conservación un costo importante de mantenimiento o reparación.

La durabilidad de una estructura de hormigón es su capacidad de soportar, durante su vida útil para la que ha sido proyectada, las condiciones físicas y químicas a las que va a estar expuesta, y que podrían llegar a provocar su degradación como consecuencia de efectos diferentes a las cargas y sollicitaciones consideradas en el análisis estructural (EHE-08). De este modo, un hormigón durable será el que conserve su forma original y su capacidad resistente de servicio en el tiempo, cuando se encuentre expuesto a estas acciones (F. Cánovas, 1999).

Un hormigón sano y compacto presenta una buena durabilidad cuando se encuentra sometido a unas condiciones normales de ambiente y de desgaste, presentando además, una buena protección frente a la corrosión del acero en el caso de estar armado.

Esta propiedad del hormigón está muy relacionada con la porosidad abierta del mismo así como con la distribución y el tamaño de sus capilares. Aunque en sí misma no sea una propiedad indicativa de la durabilidad, la permeabilidad está claramente relacionada con los mecanismos de penetración de sustancia en el interior del mismo.

Aquellos hormigones sometidos a condiciones ambientales y climáticas severas con bajas temperaturas, heladas, acción de sales de deshielo, aguas puras, ácidas... presentan una durabilidad muy disminuida que depende de los medios que se hayan adoptado para protegerlos y de la calidad de los mismos. Este tipo de hormigones han exigido, en numerosos casos, costos elevados de reparación e incluso su demolición.

El agua es el agente de deterioro más importante que afecta a las estructuras de hormigón, ya que sus moléculas son capaces de penetrar por los capilares más finos o coqueras. Además es el líquido que más capacidad tiene para disolver sustancias en el hormigón así como para aportarlas (sales). A temperatura ambiente este elemento tiene aproximadamente el 50% de los enlaces de hidrógeno rotos y como los componentes del hormigón tienen cargas superficiales libres, se genera

una tensión superficial, que explica la tendencia de una gran cantidad de moléculas a adherirse a los enlaces libres de hidrógeno del agua.

Una agente derivado del agua es el hielo, que produce una acción destructora debido a los ciclos hielo-deshielo se pueden atenuar con el empleo de un hormigón bien compactado y curado con una baja relación agua/cemento e incluso con la incorporación de un agente aireante (J. Montoya, 2001).

De este modo, y dependiendo del ambiente que se encuentre, el hormigón tendrá unas características especiales y será protegido elevando su resistencia al desgaste, abrasión...

- La acción del agua del mar y de los sulfatos se reduce empleando hormigones de alta calidad y cementos adecuados. Las protecciones y revestimientos juegan un papel importante en la vida de estos hormigones.
- La abrasión en pavimentos industriales y obras hidráulicas puede disminuirse con hormigones de alta calidad y áridos duros, resistentes al desgaste y de tamaño grande.
- La disgregación provocada en el hormigón armado por la corrosión de armaduras, especialmente en estructuras situadas en las proximidades del mar y en las de puentes en las que se emplean sales de deshielo, puede disminuirse con el empleo de grandes recubrimientos, hormigones de baja permeabilidad y con fuerte reserva alcalina. Algunas veces hay que utilizar protecciones especiales.
- Las disgregaciones provocadas por la reacción álcali-árido pueden evitarse eligiendo cementos de bajo contenido en álcalis, puzolánicos, o mediante el empleo de áridos que no sean reactivos.

A partir de lo citado anteriormente podemos afirmar que la durabilidad de un hormigón es un complejo proceso en el que intervienen numerosos factores: las condiciones ambientales a las que va a estar expuesto, los materiales de los que esté compuesto, el diseño estructural de la obra, la calidad de ejecución ésta, incluyendo compactación y curado, los sistemas de protección adoptados, etc.

Además de estar sometida a unas sollicitaciones mecánicas a partir de las cuales se calcula, una estructura de hormigón está expuesta a unas acciones de origen físico o químico que pueden provocar su degradación, ya sea debido a la corrosión de las armaduras de acero, por ataques agresivos directos sobre el propio hormigón o por combinación de ambas.

Las clases generales de exposición frente a la corrosión de las armaduras vienen en la Tabla 3.1, mientras que las clases específicas de exposición relativas a otros procesos de degradación del propio hormigón, distinto de los de corrosión de armaduras, vienen definidas en la Tabla 3.2.

CLASE GENERAL DE EXPOSICIÓN			DESCRIPCIÓN	EJEMPLOS
Clase	Subclase	Designación		
no agresiva		I	- interiores de edificios, no sometidos a condensaciones - elementos de hormigón en masa	- interiores de edificios, protegidos de la intemperie
	Normal	IIa	- interiores sometidos a humedades relativas medias altas (>65%) o a condensaciones - exteriores en ausencia de cloruros, y expuestos a lluvia en zonas con precipitación media anual superior a 600mm. - elementos enterrados o sumergidos.	- sótanos no ventilados - cimentaciones - tableros y pilas de puentes en zonas con precipitación media anual superior a 600mm - elementos de hormigón en cubiertas de edificios
		IIb	- exteriores en ausencia de cloruros, sometidos a la acción del agua de lluvia, en zonas con precipitación media anual inferior a 600mm	- construcciones exteriores protegidas de la lluvia - tableros y pilas de puentes, en zonas de precipitación media anual inferior a 600mm
	Marina	IIIa	- elementos de estructuras marinas, por encima del nivel de pleamar - elemento exteriores de estructuras situadas en las proximidades de la línea costera (a menos de 5km)	- edificaciones en las proximidades de la costa - puentes en las proximidades de la costa - zonas aéreas de diques, pantales y otras obras de defensa litoral - instalaciones portuarias
IIIb		- elementos de estructuras marinas sumergidas permanentemente, por debajo del nivel mínimo de bajar mar	- zonas sumergidas de diques, pantales y otras obras de defensa litoral - cimentaciones y zonas sumergidas de pilas de puentes en el mar	
IIIc		- elementos de estructuras marinas situadas en la zona de carrera de mareas	- zonas situadas en el recorrido de marea de diques, pantales y otras obras de defensa litoral - zonas de pilas de puentes sobre el mar, situadas en el recorrido de marea	
con cloruros de origen diferente del medio marino		IV	- instalaciones no impermeabilizadas en contacto con agua que presente un contenido elevado de cloruros, no relacionados con el ambiente marino - superficies expuestas a sales de deshielo no impermeabilizadas.	- piscinas - pilas de pasos superiores o pasarelas en zonas de nieve - estaciones de tratamiento de agua.

Tabla 3.1 Clases generales de exposición relativas a la corrosión de las armaduras (Tabla 8.2.2 EHE-08)

CLASE ESPECÍFICA DE EXPOSICIÓN				DESCRIPCIÓN	EJEMPLOS
Clase	Subclase	Designación	Tipo de proceso		
Química Agresiva	débil	Qa	ataque químico	- elementos situados en ambientes con contenidos de sustancias químicas capaces de provocar la alteración del hormigón con velocidad lenta (ver Tabla 8.2.3.b)	- instalaciones industriales, con sustancias débilmente agresivas según tabla 8.2.3.b. - construcciones en proximidades de áreas industriales, con agresividad débil según tabla 8.2.3.b.
	media	Qb	ataque químico	- elementos en contacto con agua de mar - elementos situados en ambientes con contenidos de sustancias químicas capaces de provocar la alteración del hormigón con velocidad media (ver Tabla 8.2.3.b)	- diques, bloques y otros elementos para diques - estructuras marinas, en general - instalaciones industriales con sustancias de agresividad media según tabla 8.2.3.b. - construcciones en proximidades de áreas industriales, con agresividad media según tabla 8.2.3.b.
	fuerte	Qc	ataque químico	- elementos situados en ambientes con contenidos de sustancias químicas capaces de provocar la alteración del hormigón con velocidad rápida (ver Tabla 8.2.3.b)	- instalaciones industriales, con sustancias de agresividad alta de acuerdo con tabla 8.2.3.b. - instalaciones de conducción y tratamiento de aguas residuales, con sustancias de agresividad media según tabla 8.2.3.b.
con heladas	sin sales fundentes	H	ataque hielo-deshielo	- elementos situados en contacto frecuente con agua, o zonas con humedad relativa media ambiental en invierno superior al 75%, y que tengan una probabilidad anual superior al 50% de alcanzar al menos una vez temperaturas por debajo de -5°C	- construcciones en zonas de alta montaña - estaciones invernales
	con sales fundentes	F	ataque por sales fundentes	- elementos destinados al tráfico de vehículos o peatones en zonas con más de 5 nevadas anuales o con valor medio de la temperatura mínima en los meses de invierno inferior a 0°C	- tableros de puentes o pasarelas en zonas de alta montaña
erosión		E	abrasión cavitación	- elementos sometidos a desgaste superficial - elementos de estructuras hidráulicas en los que la cota piezométrica pueda descender por debajo de la presión de vapor del agua	- pilas de puente en cauces muy torrenciales - elementos de diques, pantales y otras obras de defensa litoral que se encuentren sometidos a fuertes oleajes - pavimentos de hormigón - tuberías de alta presión

Tabla 3.2 Clases específicas de exposición no relativas a la corrosión de las armaduras (Tabla 8.2.3a EHE-08)

Densidad.

La densidad o masa específica del hormigón endurecido depende de muchos factores, básicamente de la naturaleza de los áridos, de su granulometría y del método de compactación empleado. Será proporcional a la densidad de los áridos empleados, aumentando con el uso de árido grueso.

En menor medida influye la relación agua/cemento sobre la densidad del hormigón, debido a que cuanto mayor sea ésta, más poroso será el hormigón por lo que contendrá mayor cantidad de huecos, siendo la densidad menor.

El grado de compactación también influye en la densidad, ya que el objetivo de la compactación es la expulsión de las burbujas de aire y el ordenamiento de las partículas para ir juntando en la medida de lo posible la masa de hormigón, de este modo, la densidad aumentará conforme aumente la energía consumida de compactación. Sin embargo, se debe tener en cuenta que el tiempo y la energía consumida para la vibración del hormigón deben ser limitadas para no provocar la segregación ni exudación del material. (J. Montoya, 2001).

Por otro lado, los aditivos aireantes influyen negativamente en la densidad al incluir en la masa del hormigón burbujas de aire.

De todos modos, las variaciones de densidad del hormigón son pequeñas, pudiendo tomarse en los cálculos el valor de $2.300\text{kg}/\text{m}^3$ para los hormigones en masa y $2.500\text{kg}/\text{m}^3$ para los armados (F. Cánovas, 1999).

En consecuencia, se puede afirmar que un hormigón con una densidad elevada, tendrá generalmente buenas resistencias mecánicas y buena durabilidad.

Compacidad

La compacidad es una propiedad del hormigón endurecido que está muy ligada a la densidad, dependiendo de sus mismos factores, sobre todo del método de consolidación empleado.

Estos métodos tienen la finalidad de incluir, en un volumen determinado, la máxima cantidad de áridos posible y, a la misma vez, que los huecos dejados por éstos sean rellenados con la pasta de cemento, con el objeto de eliminar las burbujas de aire.

Evidentemente existe una relación directa entre la compacidad de un hormigón y sus resistencias mecánicas; dicha compacidad aumenta con el volumen de materias sólidas que conforman el hormigón, en relación con los volúmenes ocupados por el agua y el aire.

Además de proporcionar una mayor resistencia mecánica (frente a esfuerzos, impactos, desgaste, vibraciones, etc.), una buena compacidad otorga mayor resistencia física (efecto de la helada) y química frente a las acciones agresivas, debido a una presencia menor de huecos o porosidades siendo más difícil la entrada de agentes exteriores.

Permeabilidad

Se entiende por permeabilidad de un hormigón la facilidad que éste presenta a ser penetrado por un fluido, ya sea líquido o gaseoso, y es consecuencia de la porosidad que tenga la pasta hidratada y los áridos, de una falta de compactación adecuada incluso de la exudación y segregación por un exceso de compactación. El volumen de poros generado por estos dos últimos factores puede llegar a alcanzar el 10% del hormigón, siendo causado por un deficiente estudio de la mezcla, una mala ejecución y un curado poco cuidadoso...

El agua puede introducirse en el hormigón ya sea por presión (depósitos, conducciones, etc.) o por capilaridad (contacto con el medio húmedo). Un hormigón correctamente dosificado, confeccionado, colocado y curado, es generalmente impermeable por sí mismo, tanto más cuanto menor sea su red capilar, o sea, cuanto mayor sea su compacidad y en consecuencia mayor densidad.

El coeficiente de permeabilidad de la pasta de cemento recién mezclado es del orden de 10^{-4} a 10^{-5} cm/s, con el progreso de la hidratación la disminución de la porosidad, es decir el tubo capilar va disminuyendo por lo que hace disminuir dicho coeficiente (Mehta, 2001).

Cuando la porosidad ha disminuido de un 40 a un 30% debido al proceso de hidratación, seguir la disminución de la porosidad se hace más complicada, debido a que el proceso de hidratación del elemento progresa y va segmentando los distintos poros más grandes dividiéndolos en varios más pequeños por lo que se llega a un punto en que las interconexiones entre poros se cierran o son muy tortuosas, debido a esto la disminución de la porosidad no se acompaña de la disminución correspondiente de la permeabilidad (Mehta, 2001).

También influye la porosidad del árido que se utilice, siendo su coeficiente de permeabilidad del orden de 1 a $10 \cdot 10^{-12}$ cm/s (Mehta, 2001).

Teniendo en cuenta estos dos factores importantes, se puede decir que para hormigones tradicionales el rango aproximado del coeficiente de permeabilidad es de $1 \cdot 10^{-10}$ a $30 \cdot 10^{-10}$ (Mehta, 2001).

La red de capilares se crea por la evaporación en exceso del agua de amasado sobre la justamente necesaria para hidratar el cemento. Dicho exceso es siempre necesario para poder manejar y colocar el hormigón, debiendo ser, lógicamente, lo más pequeño posible. La red capilar tendrá más importancia a medida que disminuya la finura de molido del cemento, mayor sea la relación agua/cemento, peor sea la composición granulométrica del hormigón y más corto sea el curado.

Se puede apreciar en la Fig. 3.4 que la influencia de la relación agua/cemento sobre la permeabilidad es importante, ya que al pasar dicha relación de 0,7 a 0,3 la permeabilidad se reduce mil veces.

De lo anteriormente citado se puede deducir que existen dos vías complementarias para disminuir la permeabilidad de un hormigón:

- Se puede reducir la relación agua/cemento, con lo que se reduce la porosidad.
- Realizar curados húmedos prolongados que den lugar a la formación de nuevas reacciones químicas.

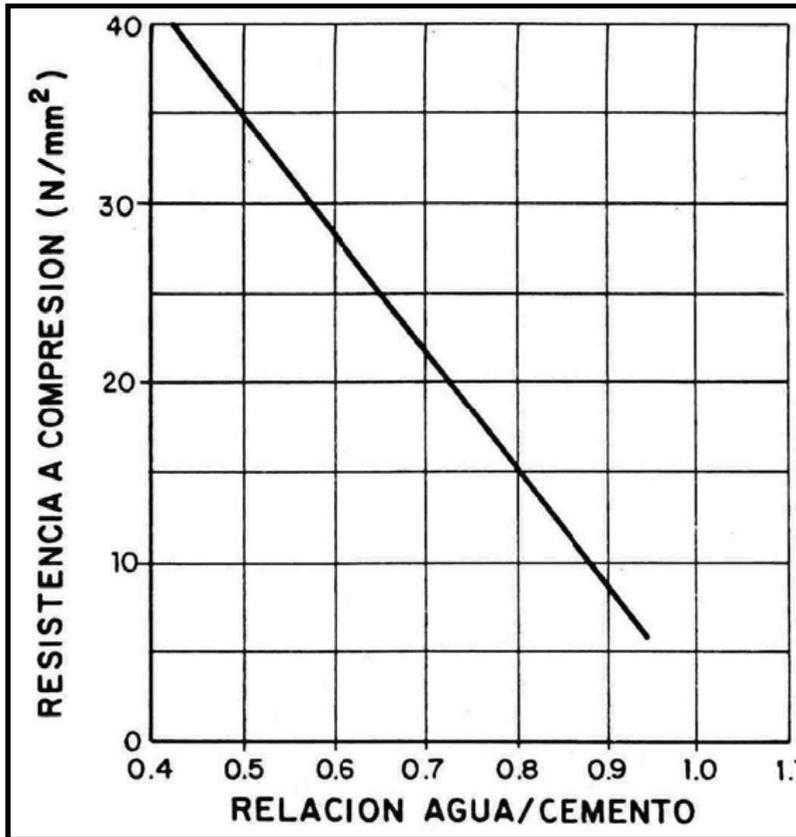


Fig. 3.4 Influencia de la relación a/c del hormigón sobre su permeabilidad (F. Cánovas, 1999)

Para una misma relación a/c y dosificación de cemento, la permeabilidad está influenciada por el grado de finura de éste, pues cuanto mayor sea el mismo más rápidamente se hidratará y tendrá lugar la formación de reacciones químicas, reduciéndose la permeabilidad. De ningún modo, la relación a/c debe superar el valor de 0,55 si se quiere obtener un hormigón impermeable (F. Cánovas, 1999).

La permeabilidad de los hormigones no sólo depende de la pasta de cemento sino también de la contribución que pueden aportar los áridos, de este modo, éstos presentan generalmente una permeabilidad inferior que la propia pasta, en consecuencia, la permeabilidad de un

hormigón con una relación de a/c determinada será más reducida que para la pasta de la misma relación.

La utilización de aireantes da lugar a una reducción de la permeabilidad ya que al provocar un aumento de la docilidad de los hormigones generan una reducción de la relación a/c, disminuyendo de este modo los poros capilares.

Aunque medir la permeabilidad de un hormigón resulta algo difícil, existen varios métodos; unos basados en la permeabilidad bajo presión y otros en la permeabilidad por succión (absorción). Las mediciones se efectúan de varias maneras:

- Por diferencia de pesada.
- Por el tiempo requerido para que el agua atraviese de una cara a otra.
- Por medición de la superficie de mancha en una sección obtenida por corte...

Sin embargo, ningún método proporciona una garantía completa, siendo incierta la concordancia entre medidas realizadas según métodos sobre un mismo hormigón.

Además, los ensayos sólo pueden realizarse sobre probetas obtenidas in situ del hormigón endurecido, ya que el uso de probetas cilíndricas no es representativo desde el punto de vista de la permeabilidad. Estos ensayos pueden determinarse mediante la norma UNE 83903/90 que se ocupa de la penetración de agua bajo presión en un hormigón.

Retracción y Entumecimiento.

Tanto la retracción como el entumecimiento, son cambios de volumen que sufre el hormigón.

- La retracción es una contracción que ocurre fundamentalmente durante el fraguado y en la primera época del endurecimiento del hormigón, especialmente, si se produce una falta de agua en el mismo.

- El entumecimiento es una expansión o aumento de volumen del hormigón como consecuencia de absorción de agua.

Retracción.

Durante el proceso de fraguado y endurecimiento, el hormigón contrae su volumen cuando tal proceso sucede en el aire, y se entumece si sucede en el agua. Al primer fenómeno se le conoce como retracción.

La retracción puede explicarse por la pérdida paulatina de agua en el hormigón. En este fenómeno influyen las siguientes variables.

- *El tipo, clase y categoría del cemento* influyen en el sentido de dar más retracción a los más resistentes y rápidos, teniendo en cuenta la igualdad en los factores restantes. Dependiendo del cemento utilizado retraerá antes o después, más o menos, todo esto dependiendo de la resistencia del propio cemento, ya que cuanto mayor sea la resistencia, mayor será la velocidad para hidratarse. Además depende de si es un cemento de rápido fraguado o no, ya que por sus propiedades el comienzo de fraguado empieza antes. En ambos casos se genera una disminución de la relación a/c .
- *A mayor finura de molido del cemento* obtendremos una mayor retracción, ya que a mayor finura de molido la hidratación del cemento es más rápida reduciéndose la relación a/c , secándose la pasta comenzando de este modo la retracción por falta de agua.
- *La presencia de finos* en el hormigón genera un aumento notable de la retracción, ya que éstos absorben parte de agua, disminuyendo la relación a/c , por lo que la masa se seca y se retrae.
- *La cantidad de agua de amasado* es un factor que tiene relación directa con la retracción del hormigón. De este modo a igualdad de dosis de cemento por metro cúbico de hormigón, la retracción aumenta con la relación a/c , y a igualdad de la relación a/c aumenta con la dosis de cemento.

- *La retracción aumenta cuando disminuye el espesor de elemento que se encuentra en contacto con el medio ambiente, ya que el volumen de la pieza donde se produce la desecación del material es mayor.*
- *El hormigón armado retrae menos que el hormigón en masa, ya que las barras de acero se oponen al acortamiento y lo disminuyen, tanto más cuanto mayor sea la cuantía de acero. La relación entre un valor y otro de la retracción viene a ser del orden del 80%.*

No se debe entender por retracción un tipo de fuerza, ya que se trata de una deformación impuesta, la cual provocará tensiones de tracción y en consecuencia, fisuras, siempre y cuando se encuentre impedido el libre acortamiento del hormigón, de este modo, tiene más influencia conforme aumenta la rigidez de la estructura.

Por otro lado, la retracción es, a su vez, el solapamiento de varios tipos de retracciones: retracción plástica, retracción hidráulica o de secado y retracción por carbonatación.

Retracción plástica

Cuando el volumen de agua evaporado de la superficie del hormigón es mayor que el volumen aportado por exudación, el hormigón retrae dando lugar a tensiones de tracción superficial las cuales generan fisuración, ya que el hormigón a edades tempranas aún no ha desarrollado resistencias a tracción. Esta retracción suele ser crítica en tiempo caluroso, con baja humedad, ó con fuertes vientos. Su valor final depende del espesor medio de las piezas y de la dosificación empleada (Parra, 2006).

Antes de que haya finalizado el proceso de fraguado el volumen de la pasta tiene una contracción del orden del 1% con respecto al volumen absoluto de cemento seco, esta contracción ocurre dentro de las primeras 8 horas (F. Cánovas, 1999).

A esta retracción, se une que la reacción de los productos de cemento anhidro con el agua da lugar a un volumen resultante de productos hidratados menor que el volumen del cemento anhidro original,

aunque el volumen de los productos iniciales más el agua es menor que el de los productos finales más el agua que ha reaccionado, lo cual da lugar a una disminución de volumen conocida como retracción química (Parra, 2006).

Además, durante el proceso de hidratación, se crea una estructura porosa fina, al verse impedida la retracción de la pasta por los áridos. Esta fina capa porosa drena agua desde los poros de mayor diámetro. Si el aporte de agua debido al fenómeno de la exudación, o aportes de agua exteriores (curado) no es suficiente para compensar esta pérdida de agua por drenaje, el contenido de agua es cada vez menor en los poros y a su vez este descenso en la humedad detiene el proceso de hidratación, y se genera un endurecimiento inicial de la pasta (Parra, 2006).

Este fenómeno de drenaje produce unas tensiones de tracción en la pasta de cemento que, debido a su corta edad, no puede resistir generando una retracción, denominada retracción autógena. Dicha patología se puede disminuir e incluso eliminar mediante el uso de aditivos reductores de la retracción, ya que poseen agentes tenso-activos reductores de la tensión superficial del agua y del ángulo de contacto de la superficie de los meniscos.

La retracción autógena es despreciable para hormigones con relaciones a/c , mayores de 0,45. Aunque puede representar cerca del 50% del total de la retracción cuando este ratio alcanza valores próximos a 0,30 (Parra, 2006).

De este modo, durante el proceso de la pasta, se produce una pérdida de agua por absorción química. Si no se aporta agua para que las relaciones a/c se mantengan del orden de 0,45 o mayores (es decir si el sistema esta sellado), la fisuración que aparece puede llegar a ser importante (Parra, 2006).

Al aumentar la cantidad de cemento se produce un aumento de la retracción como se puede apreciar en la Fig. 3.5. donde se muestran las retracciones experimentadas por una pasta de cemento, un mortero 1:3 y hormigones con dosificaciones de cemento de 500, 300 y 200kg/m³,

conservados durante esas primeras horas a 20°C, 50% de humedad relativa con un viento de 3,6km/h (F. Cánovas, 1999).

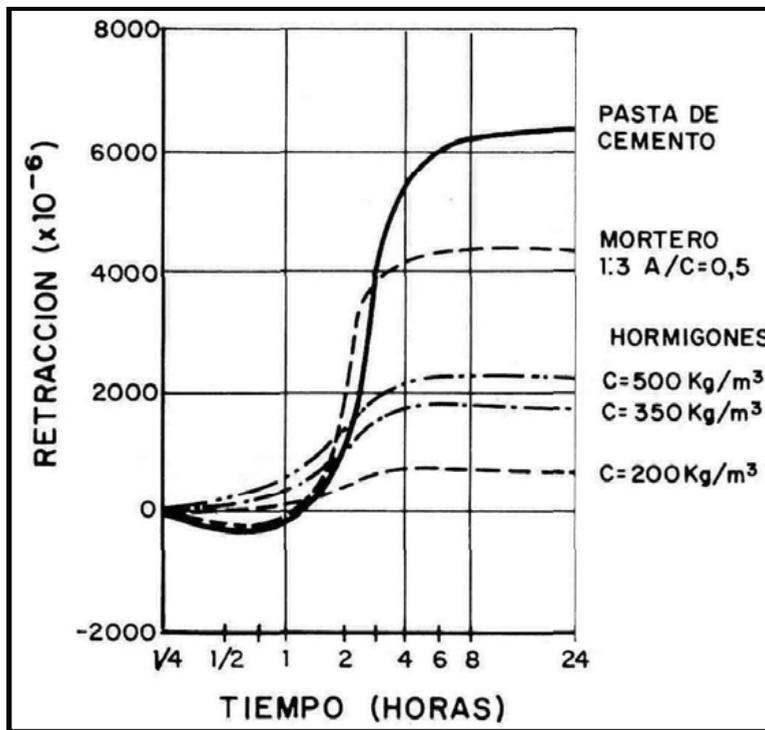


Fig. 3.5 Retracción plástica de pasta de cemento, mortero y hormigones (F. Cánovas 1999)

Retracción hidráulica o de secado

Se entiende por retracción hidráulica o de secado como la pérdida de volumen por la pérdida del agua libre o agua contenida en los poros capilares que no ha sido absorbida por ninguno de los componentes del hormigón. La retracción de la pasta de cemento es la causa más importante de la retracción del hormigón, y depende principalmente de la porosidad total de la pasta: a mayor porosidad, mayor retracción de la pasta (Parra, 2006).

La retracción aumenta cuando lo hace la relación a/c , debido a la menor resistencia, que conduce a un menor módulo de elasticidad, y a una mayor deformabilidad del sistema, además de un incremento en la

permeabilidad que favorece la evacuación del agua desde los poros de menor diámetro a los poros capilares de mayor tamaño o al exterior (F. Cánovas 1999).

Cuanto más finamente molido se encuentre un cemento mayor será el número de partículas que existan en él por unidad de peso y en consecuencia, mayor será también la retracción experimentada por la pasta pura de cemento, pero esto no indica que forzosamente tenga que ser mayor la retracción del hormigón hecho con ese cemento. Por otra parte, se ha observado que las partículas de tamaño superior a 0,08mm, que se hidratan lentamente, actúan disminuyendo la retracción al hacer un papel parecido al de los áridos (F. Cánovas, 1999).

En función de las condiciones de curado este tipo de retracción será más o menos agresiva; los hormigones curados al vapor, en los que se forman microcristales, aunque de baja superficie, retraen la décima parte, e incluso menos, que los curados en agua. a partir de este hecho, se puede afirmar que la retracción de secado está muy relacionada con la estructura física de las partículas hidratadas del cemento y poco con su carácter químico o mineralógico.

Además de la cantidad de cemento, el tamaño máximo y la naturaleza de los áridos empleados también tienen influencia en la retracción del hormigón:

- A medida que aumente el tamaño del árido la retracción será menor, debido a que se necesitará menos cantidad de pasta de cemento.
- La retracción será tanto mayor cuanto menor sea el módulo de elasticidad de los mismos, es decir más deformables sean éstos.

Troxell ha determinado la retracción que sufren varios hormigones de la misma composición pero elaborados con áridos distintos y conservados a 20°C y con una humedad relativa del 50%, obteniendo los valores indicados en el gráfico de la Fig. 3.6.

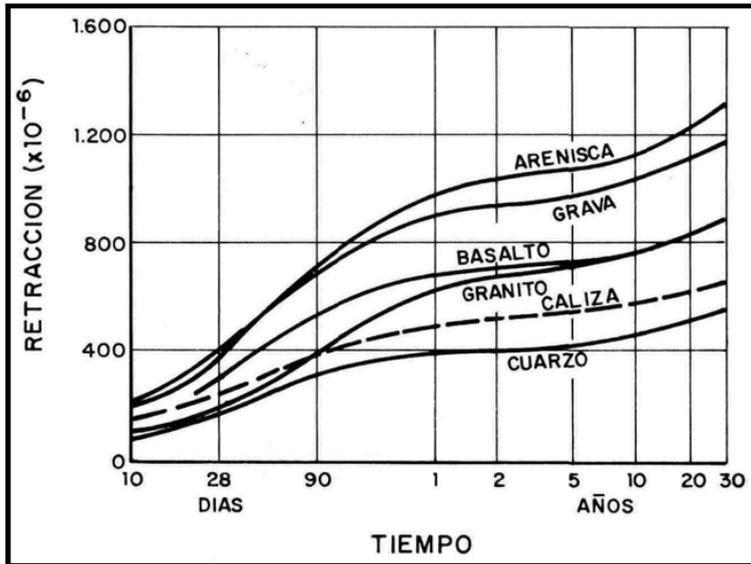


Fig. 3.6 Influencia de la naturaleza de los áridos en la retracción (F. Cánovas, 1999)

Retracción por Carbonatación

Este fenómeno se produce a causa de la reacción del dióxido de carbono (CO_2), que se encuentra en la atmósfera con el hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), presente en la pasta de cemento. La cantidad de retracción combinada cambia según se produzca la secuencia de carbonatación y el proceso de secado. Si ambos procesos se superponen la retracción es menor.

Podemos considerar de gran importancia la retracción por carbonatación del hormigón, no sólo por el hecho de la retracción en sí, sino por pérdida de alcalinidad que provoca sobre el hormigón, disminuyendo la protección de las barras de acero en el caso de que esté armado.

El proceso de carbonatación ocurre cuando el CO_2 de la atmósfera reacciona, en presencia de agua, con productos de hidratación de la pasta de cemento, principalmente con el $\text{Ca}(\text{OH})_2$, y también con el K_2O y el NaOH .

En el momento que el aire atmosférico (CO_2), entra en contacto con el hormigón, la portlandita y los álcalis del cemento son transformados en los correspondientes carbonatos con desprendimiento de agua.



Este carbonato cálcico (de menor volumen que los productos de hidratación) se deposita en los espacios no solicitados por las tensiones de compresión impuestas por la retracción de secado. Este fenómeno conduce un incremento temporal de la deformabilidad del sistema que provoca una disminución adicional de su volumen aparente (Parra, 2006).

La cinética del proceso de carbonización es muy lenta ya que aumenta con la porosidad del hormigón y con la disminución del espesor medio y de la ausencia de humedad relativa, así como de modo acusado, con ciclos sucesivos de humectación y secado del hormigón.

Dicho proceso se denomina carbonatación y comienza en la superficie del hormigón penetrando hacia el interior disminuyendo el pH a valores por debajo de 9, así el potencial electroquímico de las armaduras evoluciona hacia valores más notables (positivos), y a otras partes de las armaduras conectadas eléctricamente con ella manteniendo inalterado el potencial electroquímico (producido por la pasivación), por lo que se produce una diferencia de potencial eléctrico, que conduce a la formación de la conocida como pila de corrosión (reacciones entre las regiones anódica y catódica del acero), induciendo a un flujo de corriente a causa de la diferencia de potencial, provocando un consumo de oxígeno del acero, es decir, se inicia un proceso de corrosión.

La carbonatación del hormigón da lugar además de a retracción, a un ligero incremento del peso del mismo, a un aumento de su resistencia a compresión, a una pérdida de reserva alcalina y a una disminución de la permeabilidad (Parra, 2006).

La retracción de carbonatación parece ser causada por la disolución de los cristales de hidróxido de calcio o portlandita en las zonas comprimidas como consecuencia de la retracción de secado y a la precipitación de cristales de carbonato en las zonas de tensiones.

Puede hacerse más notable en el caso de elementos sujetos a alteraciones de humedad y secado como puede ocurrir en estructuras situadas en zonas de oscilación de mareas, o de salpicaduras de agua, en las que la retracción por carbonatación alcanza valores que puede llegar a fisurarlos superficialmente.

Entumecimiento

Si una pieza de hormigón está constantemente sumergida en agua experimenta un aumento de peso y un incremento de volumen debido a la absorción de agua por los geles procedentes del cemento hidratado que, al contrario que en el retracción por secado, tienden a esponjarse dando lugar a este hinchamiento.

Al principio de la inmersión del hormigón en el agua el entumecimiento tiene lugar con gran velocidad y luego éste va disminuyendo hasta llegar con el tiempo a una práctica estabilización.

El aumento de peso de la pasta debido a la entrada de agua en los espacios creados por la contracción de volumen de ésta al hidratarse el cemento, con respecto a la suma de volúmenes de cemento más agua, llega a ser del 1%.

En la siguiente tabla se muestran los resultados de ensayos donde se ha medido el entumecimiento del hormigón al cabo de 100 días y un año respectivamente, variando el tipo de cemento y con relaciones a/c distintas.

	Cemento	Relación a/c	Entumecimiento
100 días	350kg/m ³ de CEM I 42,5	0,55	170·10 ⁻⁶
		0,65	100·10 ⁻⁶
	350kg/m ³ de CEM II 32,5	0,55	120·10 ⁻⁶
		0,65	110·10 ⁻⁶
1 año	350kg/m ³ de CEM I 42,5	0,55	220·10 ⁻⁶
		0,65	140·10 ⁻⁶
	350kg/m ³ de CEM II 32,5	0,55	145·10 ⁻⁶
		0,65	130·10 ⁻⁶

Se aprecia que a medida que aumenta la finura del cemento, los valores de los entumecimientos son más elevados debido a la mayor cantidad de geles que se producen en el proceso de hidratación; del mismo modo las relaciones a/c altas generan menores entumecimientos que las bajas ya que el diámetro de los poros es menor, reduciéndose los efectos por absorción capilar.

Fluencia, cansancio y fatiga.

Fluencia

En el hormigón la relación tensión-deformación varía en función del tiempo, de este modo si es expuesto a una tensión de compresión simple $\sigma(t_0)$ en el instante t_0 experimenta una deformación instantánea $E_c(t_0)$, pero si la tensión se mantiene durante un periodo de tiempo $(t-t_0)$ la deformación sigue aumentando. A esta deformación debida al mantenimiento de la carga se le conoce como fluencia.

Se llama deformación diferida por fluencia al conjunto de deformaciones diferidas (elasticidad y plástica) que dependen de la tensión. Retracción y fluencia se solapan en el tiempo, aunque son fenómenos más o menos independientes (Parra, 2006). La fluencia producida sin intercambio de humedad con la atmósfera se denomina fluencia básica, mientras que la experimentada al perder agua del hormigón (retracción hidráulica), se denomina fluencia de secado, siendo la suma de ambas la fluencia total.

Generalmente la pasta de cemento de los hormigones ordinarios experimenta fluencia tras ser sometida a cargas de larga duración, siendo los áridos (componentes inertes) los que coaccionan estas deformaciones.

La fluencia de la pasta de cemento se incrementa a medida que aumenta el contenido de humedad y se reduce cuando aumenta la resistencia de la misma. A partir de una cierta madurez la fluencia es proporcional a la relación tensión aplicada/resistencia. La proporcionalidad tiene un límite superior que es del orden del 0,85 (Parra, 2006).

Debemos tener en cuenta que en servicio, raramente la tensión aplicada supera el 40% de la resistencia con lo que se puede admitir una cierta proporcionalidad. Si se supera el límite de proporcionalidad para tensiones relativas de 0,8 a 0,9, la fluencia hace que aumente la deformación total hasta alcanzar la deformación última y así el agotamiento (Parra, 2006).

La resistencia de cálculo del hormigón influye notablemente en la fluencia, así a medida que esta última aumenta, crece la relación α/c . La deformación por fluencia es proporcional a la magnitud de la tensión aplicada. Dicha deformación depende de una gran cantidad de factores entre los que influyen: los áridos, el cemento, la compactación, la edad del hormigón, el tamaño de la pieza, el nivel de carga a que está sometido, la temperatura y humedad ambiente, etc.

Los áridos influyen en la fluencia ya que no tienen una fluencia apreciable realizando en este caso el efecto de restricción. Así, a medida que aumenta el contenido de éstos la fluencia disminuirá. Igualmente ocurre con la composición de la roca; si su compacidad aumenta la fluencia será menor (F. Cánovas, 1999).

El tipo de cemento no tiene normalmente una influencia importante en esta propiedad excepto la debida a las resistencias mecánicas que proporciona a una edad determinada. Sin embargo, la finura de molido del cemento si puede afectar, ya que los que tengan mayor finura se hidrataran más rápido generando resistencias superiores a edades tempranas.

Por otro lado la edad a la que se pone en carga la pieza tiene cierta importancia, su influencia depende de la variación de la resistencia con la edad, de este modo en hormigones jóvenes se notan mucho estas variaciones pero, a partir de cierta edad las alteraciones disminuyen ya que las resistencias se estabilizan.

El aumento de la temperatura influye también en la fluencia haciendo que ésta sea mayor como consecuencia de la pérdida de agua de la superficie obteniéndose, por tanto, a mayores temperaturas mayores deformaciones por fluencia. Esta variación de la fluencia tiene

una gran importancia en determinadas estructuras y especialmente en las de puentes (J. Montoya, 2001).

Los cambios de humedad influyen con cierta importancia sobre la fluencia dando lugar a un aumento de la misma cuando se reduce la humedad relativa.

Aquellos hormigones que presenten una gran retracción suelen tener una fluencia elevada a causa de la pérdida de resistencia. En consecuencia, si el proceso de curado de un hormigón es el correcto, se reducirá la retracción, disminuyendo su fluencia.

Las dimensiones de la pieza, al menos hasta un espesor de un metro, tienen también influencia en el sentido de cuanto menor sea el tamaño de ésta mayores serán las fluencias detectadas para el mismo tipo de carga. Este fenómeno hay que atribuirlo a que la retracción y la fluencia actúan simultáneamente y, la fluencia no está afectada por la pérdida de agua mientras que la retracción si y, por tanto, cuanto mayor sea la relación superficie/volumen de la pieza, mayor será esta pérdida y por consiguiente la deformación, por otra parte, en piezas de dimensiones superiores a un metro, el núcleo mantiene la humedad y sigue hidratándose y aumentando su resistencia y disminuyendo al mismo tiempo la fluencia, hecho que no ocurre en piezas delgadas.

Cansancio

Cuando un hormigón es sometido a tensiones de compresión elevadas durante un periodo prolongado se genera una disminución de su resistencia, la cual se compensa, en parte, por el progreso de la hidratación del cemento.

La aplicación de cargas de larga duración habitual en edificación justifica que se multiplique por el coeficiente α (1-0,85) la resistencia a compresión del hormigón en la comprobación de los Estados Límites Últimos, de tensiones normales para disminuir la resistencia de este en un 15% como coeficiente de seguridad. Y que se produzca el agotamiento de soportes después de estar bastantes años en servicio la estructura.

Fatiga

La fatiga del hormigón es un proceso donde el material sufre sucesivos cambios, el cual puede derivar el inicio de la microfisuración y la posterior propagación de ésta hasta generar macrofisuras. Éstas son las responsables del agotamiento final causado por las concentraciones tensionales y la reducción de la sección transversal. Se puede definir como la fracción de la resistencia bajo cargas estáticas que es resistida tras la aplicación de un cierto número de ciclos de carga.

Los daños generados en el hormigón al aplicarle cargas cíclicas aumentan si crece el contenido de humedad y la resistencia nominal del hormigón, si disminuye la frecuencia de aplicación de las cargas y si aumenta el rango tensional aplicado.

Capítulo 4. Propiedades del hormigón de alta resistencia endurecido

Introducción.

Al igual que ocurre con otros tipos de hormigones, las propiedades de un hormigón de alta resistencia endurecido no sólo dependen de su propia naturaleza sino, también, de su edad y de las condiciones de humedad y temperatura a las que haya sido sometido. En los siguientes apartados se comentaran las características de estos tipos de hormigones en estado endurecido.

Propiedades Mecánicas

Al igual que ocurre con otros convencionales, la resistencia a compresión es el parámetro normalmente usado para caracterizar un hormigón de alta resistencia. De este modo, si se quiere profundizar en el conocimiento y análisis del comportamiento de este material, se deben establecer las relaciones existentes entre esta propiedad y el resto de características que presentan estos tipos de hormigones.

En este capítulo se desarrollarán las propiedades específicas de los hormigones de alta resistencia: resistencia a compresión, tracción, flexotracción y módulo de elasticidad. Como complemento a dichas características, también se estudiarán diversos aspectos relativos a los fenómenos de retracción y fluencia, finalizando con otros relacionados con su capacidad de adherencia y comportamiento frente a fatiga.

Resistencia a compresión y tracción

Al igual que ocurre con el hormigón tradicional, el hormigón de alta resistencia es un material constituido por dos materiales frágiles, los áridos y la pasta de cemento. La diferencia de rigideces entre ambos materiales disminuye al aumentar la resistencia característica del hormigón.

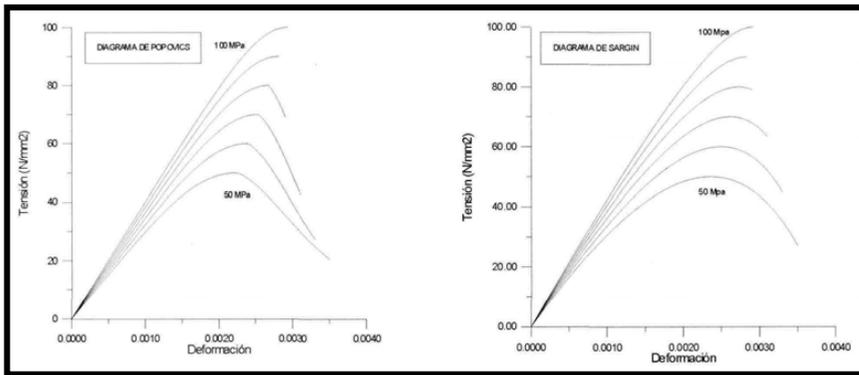


Fig. 4.1 Diagrama σ - ϵ de un hormigón convencional y uno de alta resistencia (fib-CEB Working Group on HSC, 1990)

En hormigones convencionales, la diferencia de rigideces que presenta entre los áridos y la pasta genera, en estado de carga, deformaciones relativas en la superficie de contacto, rompiendo la adherencia en la interfaz, dando lugar a pequeñas microfisuras. Dicha microfisuración se extiende si aumenta la carga, provocando derivaciones en el diagrama tensión-deformación en relación con el diagrama lineal. En hormigones de alta resistencia, se retrasa esta microfisuración ya que las rigideces entre la pasta y los áridos son más similares, por lo que se obtienen diagramas más lineales. (M. Sosa, 2003)

Asimismo, la superficie de rotura que presentan ambos hormigones es diferente. En hormigones tradicionales presenta un acoplamiento entre caras, lo que permite un cierto esfuerzo tangencial y ejercer cierta resistencia postcrítica. En hormigones de alta resistencia la fractura es más limpia, ya que atraviesa los áridos en vez de rodearlos, por lo que disminuye de forma relevante su capacidad de transmisión de esfuerzos cortantes, aumentando la pendiente de la rama después de la carga de rotura y disminuyendo la deformación última.

Aunque en hormigones de altas prestaciones, la resistencia a compresión es superior a la de hormigones convencionales, no se produce el mismo aumento proporcional en la resistencia a tracción. A partir de diferentes estudios realizados, se conoce que para hormigones convencionales la resistencia a tracción puede ser aproximadamente un

10% de la resistencia a compresión, y para hormigones de alta resistencia esta relación puede situarse en torno al 5%. Además, la resistencia a tracción está influida por la forma y textura superficial de los áridos y puede verse sustancialmente reducida por efectos termohigrométricos, siendo mayor para hormigones con áridos machacados que con áridos rodados. Por estos motivos, la resistencia a tracción para cualquier tipo de hormigón debe considerarse con prudencia en el proyecto.

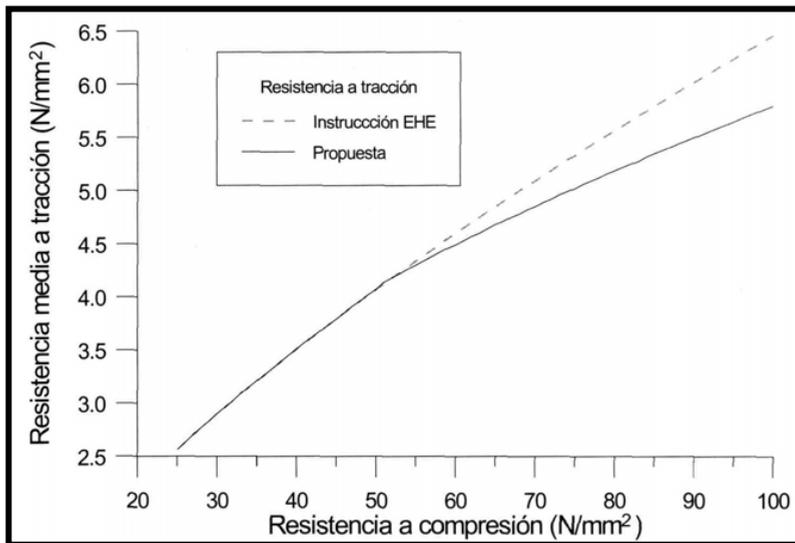


Fig. 4.2 Evolución de la resistencia media a tracción con la resistencia a compresión

Módulo de deformación

El módulo de deformación, para una edad determinada, varía en función del módulo de la pasta de cemento, de los áridos con los que ha sido confeccionado y de las proporciones relativas a los componentes del hormigón. Este hecho se puede observar en la siguiente imagen (Fig. 4.3), donde se compara el módulo de deformación para hormigones convencionales y de alta resistencia. Existen distintas fórmulas matemáticas que permiten calcular el módulo de deformación de cualquier hormigón.

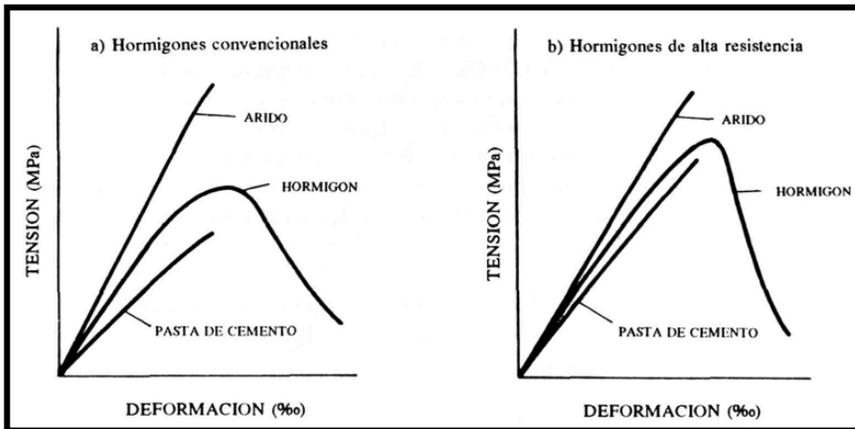


Fig. 4.3 Diagrama Tensión-Deformación según el árido, pasta de cemento y hormigón (F. Cánovas, 1999)

El módulo de deformación de la pasta de cemento depende la porosidad de la propia pasta, la cual es una función directa de la relación a/c utilizada. Existe una relación entre la resistencia de cualquier hormigón y la relación a/c , por lo que una formulación correcta que relacione el módulo del hormigón con su resistencia a compresión, dará a conocer las posibles variaciones que pueden producirse en la pasta de cemento.

Otro factor que influirá en el módulo de deformación del hormigón son las proporciones relativas entre la pasta de cemento y el árido. Dicha proporción oscila entre unos valores normales del 70 al 75%, aunque se pueden encontrar valores de hormigones con un 65% de áridos (con contenidos muy altos de cemento y agua) y hormigones con un 80% de áridos (con contenidos muy bajos de cemento y agua). Estas proporciones no generarán importantes variaciones en el módulo de deformación del hormigón.

Se ha demostrado experimentalmente que se pueden conseguir hormigones con la misma resistencia y módulos muy diferentes, solamente cambiando el árido utilizado para confeccionar el hormigón.

Dependiendo del tipo de familia, las rocas tienen unas propiedades mecánicas que varían según su origen y formación. Pero incluso dentro de

las mismas familias, dichas propiedades pueden variar significativamente, ya que dependen de la porosidad de la roca, su densidad...

La cuestión se complica aún más si se fabrica un hormigón a partir de más de un tipo de árido, lo cual es muy normal si se utilizan arenas rodadas y gravas de machaqueo.

Debido que a mayor resistencia, la rama descendente del diagrama tensión-deformación es bastante más abrupta que en hormigones convencionales, para hormigones de alta resistencia, es conveniente utilizar una curva que se adecue tanto a la rama ascendente como a la descendente en el rango de resistencias de los hormigones consideradas en estas recomendaciones (20-100MPa).

Entre los modelos existentes válidos en este rango, destacan dos de ellos que constituyen sendas adaptaciones para un uso en hormigones de alta resistencia, de modelos existentes para hormigones convencionales:

- Diagrama de Popovics.
- Diagrama de Sargin.

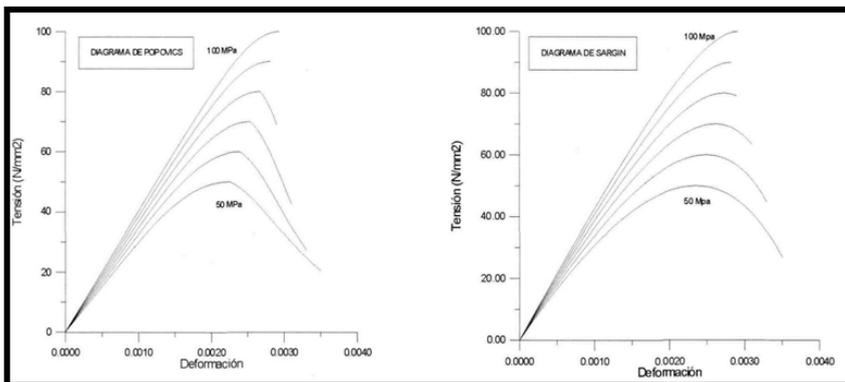


Fig. 4.4 Diagrama de Popovics (izquierda) y diagrama de Sargin (derecha) (M. Sosa, 2003)

Deformaciones diferidas

La microestructura que presenta los hormigones de alta resistencia difiere en varios aspectos en la de los hormigones con resistencias inferiores:

- Menor porosidad.
- Mayor uniformidad en la pasta de cemento endurecida.
- Diferente estructura en la zona de contacto entre la pasta y el árido.

La primera característica se debe, por un lado a la mayor rigidez que presentan los hormigones de alta resistencia, y por otro a la reducción que presentan las deformaciones diferidas respecto a la de los hormigones convencionales. En particular, aquellas características de la retracción y fluencia que pueden asociarse a fenómenos tipo difusión son notablemente diferentes para hormigones de alta resistencia. (M. Sosa 2003)

Retracción

La retracción que se produce en cualquier tipo de hormigón, ya sea de alta resistencia o no, consta de dos componentes:

- La retracción autógena o básica, que se produce independientemente de las condiciones medioambientales.
- La retracción de secado, que implica un intercambio hidráulico con el medio ambiente, por lo que depende de las condiciones ambientales, forma de la pieza y otros factores extremos.

En la siguiente imagen se muestra el desarrollo en el tiempo de las componentes de la retracción para hormigones convencionales y hormigones de alta resistencia.

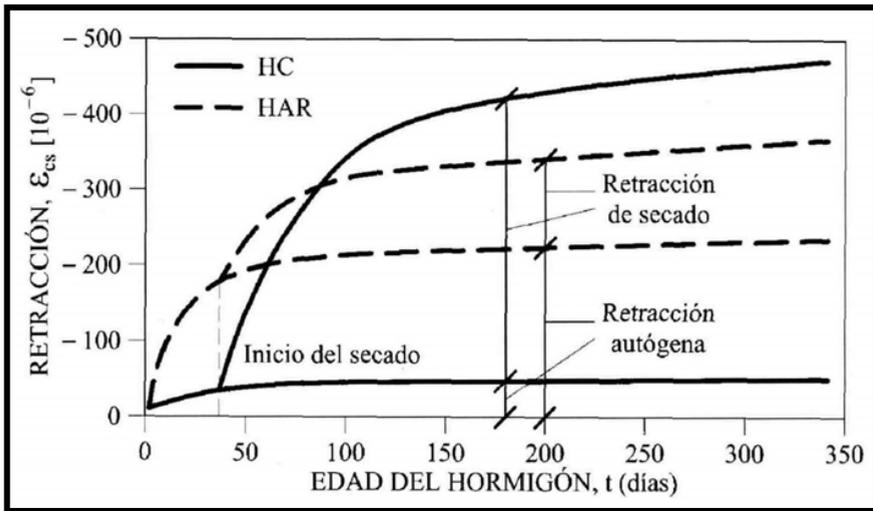


Fig. 4.5 Retracción para hormigones convencionales y de alta resistencia

A partir de este diagrama y de los resultados experimentales disponibles se pueden extraer las siguientes características acerca de la retracción de los hormigones de alta resistencia:

- La retracción total, o suma de la retracción autógena y de secado, es algo inferior en hormigones de alta resistencia que en convencionales.
- Los hormigones de alta resistencia presentan una retracción autógena mucho mayor que los convencionales, debido a la finura de su microestructura y a la baja relación de a/c que presentan. Sin embargo, la retracción de secado es muy baja debido a la escasa presencia de agua libre en este tipo de hormigones.
- La forma de la función de desarrollo temporal de la retracción de los hormigones de alta resistencia es similar a la de los hormigones convencionales. La componente autógena, al ser independiente de parámetros externos, se desarrolla más rápidamente en el tiempo que la componente de retracción por

secado, que está afectada por parámetros externos tales como la humedad ambiental o la forma del elemento.

- Los efectos de parámetros tales como la edad a partir de la cual comienza el secado (fin del curado) o el tipo de cemento, son diferentes entre hormigones de alta resistencia y hormigones convencionales.

Investigaciones realizadas han demostrado que la retracción autógena aumenta con la reducción de la relación a/c , y por tanto, con el aumento de la resistencia a compresión. Este hecho se debe, al efecto de autodesecación, que conduce a una humedad relativa interna muy baja dependiendo de la relación a/c . En consecuencia, en hormigones de alta resistencia, si la humedad relativa es comparativamente alta ($HR > 90\%$) puede darse un aumento de volumen en lugar de una contracción. (M. Sosa, 2003)

Un aspecto importante, relacionado con la magnitud y desarrollo en el tiempo de la retracción, es el efecto de adiciones minerales como el humo de sílice o las cenizas volantes. Algunos investigadores como Müller han evidenciado que la adición de humo de sílice aumenta la retracción autógena, mientras que la adición de cenizas volantes reduce las deformaciones atensionales, en comparación con otros hormigones.

Fluencia

Al igual que ocurre con la retracción, la fluencia de los hormigones de alta resistencia consta también de dos partes:

- La fluencia básica.
- La fluencia de secado.

Las principales diferencias entre la fluencia de hormigones de alta resistencia y hormigones convencionales son:

- El valor total de la fluencia en hormigones de alta resistencia, a diferencia de la retracción, puede ser hasta un 50% inferior que la de los hormigones convencionales.

- Mientras que la componente de fluencia por secado es notablemente menor para hormigones de alta resistencia que para hormigones convencionales, la componente de fluencia básica sólo es ligeramente inferior. La relación entre las componente de fluencia por secado y fluencia básica es menor a medida que la resistencia aumenta.
- La forma de la función de desarrollo temporal de la deformación total de fluencia de los hormigones de alta resistencia es similar a la de los hormigones convencionales.
- El valor umbral entre la tensión y la resistencia, a partir de la cual la fluencia deja de ser lineal, es mayor para hormigones de alta resistencia debido a que la microfisuración del hormigón se produce por un valor mayor de esta relación.

Permeabilidad y porosidad

Para lograr un hormigón durable frente a agentes agresivos, la propiedad más importante es la permeabilidad. Reacciones destructivas, tales como ataque por sulfatos, reacción álcali-árido, corrosión de las armaduras, y procesos de hielo-deshielo, inicialmente involucran el ingreso de movimientos de agua o soluciones agresivas.

La baja permeabilidad restringe el acceso del agua o soluciones provenientes de fuentes externas, o el movimiento interno de soluciones desde los poros a zonas donde puedan reaccionar. De este modo, el estudio de la porosidad y de la distribución por tamaños de los poros proporciona valores cualitativos en relación con la permeabilidad.

En relación con su efecto sobre la permeabilidad, estructura de los poros, y la durabilidad frente a la acción agresiva de elementos específicos, el uso de humo de sílice proporciona una porosidad muy baja con un incremento de la permeabilidad del hormigón.

Este incremento es debido a una disminución en el número de poros de mayor tamaño en el sistema pasta-microsílice. Las mejoras en otras propiedades de los hormigones con humo de sílice han sido también

atribuidas a estos cambios en la naturaleza de la porosidad y en la microestructura del hormigón endurecido.

Esto permite que los hormigones a los cuales se ha añadido microsílíce puedan ser empleados en ambientes agresivos tales como alcantarillas, plantas de tratamiento, obras de irrigación, ambientes industriales, estructuras marinas, así como en elementos estructurales expuestos al ataque de cloruros.

El coeficiente de permeabilidad de los hormigones con humo de sílice es menor que en aquellos donde no se ha utilizado esta adición. Las pastas que contienen un 20% de microsílíce son las más efectivas para minimizar esta propiedad. Además, la presencia de este material reduce la concentración de iones sodio, potasio y calcio en el agua presente en los poros y aumenta la resistencia al lavado.

Durabilidad

Introducción

La durabilidad de un hormigón es la capacidad que éste posee para ofrecer un comportamiento correcto a lo largo de la vida de servicio del elemento estructural. En cambio, el término durabilidad abarca a su vez otros, cada uno de los cuales puede utilizarse para evaluar dicha propiedad. Entre ellos destacan los siguientes: permeabilidad, resistencia al ataque químico (sulfatos, cloruros, etc.) resistencia a los ciclos hielo-deshielo, resistencia a las sales fundentes. En este capítulo se analizarán de forma separada cada una de estas propiedades.

En principio, las características que posee el hormigón de alta resistencia permiten suponer un buen comportamiento a los fenómenos de durabilidad en general. Su baja relación agua/cemento y la compacidad que se obtiene debido a este hecho, son factores que influye en la durabilidad favorablemente. Además, su baja porosidad impide la penetración de agentes físicos y/o químicos que puedan deteriorar el hormigón.

El principal efecto físico y químico de la adición de microsílíce al hormigón es una reducción en los contenidos de los hidróxidos de calcio,

potasio, y sodio, y una estructura de poros muy refinada en la mezcla en estado endurecido.

Sin embargo, aún son necesarias numerosas investigaciones para conocer con más profundidad los diferentes aspectos de la durabilidad del hormigón de alta resistencia. Los disponibles en la bibliografía consultada confirman la mejora experimentada por el hormigón frente a ataques físicos y químicos conforme aumenta su resistencia. En los siguientes apartados se comentan algunas de estas investigaciones.

Alcalinidad

Un valor alto del pH es importante para la durabilidad de las estructuras de hormigón armado debido a que se asegura la pasividad del acero, no debiendo ser menor de 8.5. En un medio alcalino, una capa pasiva de óxido se forma sobre la superficie del acero y previene los ataques por corrosión.

Incluso si los álcalis son lavados del hormigón o consumidos por reaccionar químicamente con un ácido débil, como el ácido silícico, el hormigón normalmente tiene en reserva una gran cantidad de hidróxido de calcio no disuelto para reemplazar esta pérdida y renovar la presencia del OH en el agua de los poros.

El consumo de cal libre por el humo de sílice genera una modificación en el nivel del pH de los poros de agua del hormigón de alta resistencia. Además, puede ocurrir que el reducido contenido de Ca(OH)_2 cause una reducción en la resistencia a la carbonatación debido a que este compuesto actúa como un amortiguador de la reacción total de carbonatación.

La pasta de cemento hidratada contiene entre un 20 y un 25% de hidróxido de calcio, lo cual permite que los poros estén saturados de una solución del mismo. Dicha solución tiene un pH de 12.4, asegurando suficiente alcalinidad. Sin embargo, deben existir otros factores que influyan en esta característica ya que algunas mediciones muestran un pH de 14. Por otro lado, los ensayos de alcalinidad del hormigón con un 20% de microsílíce, han mostrado unos resultados de 12.5, con una

reducción lineal para contenidos de microsilíce que varían entre un 0 y un 20%.

La principal cuestión relacionada con la alcalinidad es que determina el pH del agua de los poros. Diversos estudios han mostrado que los hidróxidos de sodio y potasio tienen mayor influencia sobre la alcalinidad, que el hidróxido de calcio. Atendiendo a este hecho, se puede afirmar que los hidróxidos alcalinos presentes en el agua de los poros protegen al acero contra la corrosión, pero no dejan una reserva de alcalinidad, la cual debe ser proporcionada por el hidróxido de calcio no disuelto.

En aquellos hormigones en los que parte de los álcalis reaccionan con ácidos débiles, los productos de la reacción son de gran interés. Los hidróxidos alcalinos son solubles y ellos pueden parcialmente ser neutralizados por ácidos débiles, tales como el CO_2 , o el SiO_2 , en agua. Las sales producidas por la reacción dan un alto pH en solución. Los pH estándar para soluciones de estos productos de la reacción son:

- 0,1 M Hidróxido de sodio (NaOH) pH = 13,0
- 0,1 M Carbonato de sodio (Na_2CO_3) pH = 11,6
- 0,1 M Metasilicato de sodio (Na_2SiO_3) pH = 12,6

Así, aquellos hormigones de alta resistencia con mucho contenido de humo de sílice y prácticamente sin cal libre, deberá tener un pH alto y pasivante. De este modo, la reducción de la alcalinidad y la correspondiente unión de los iones sodio y potasio en la solución de poros es uno de los medios en los cuales que estas reacciones disminuirán el riesgo de la reacción álcali-sílice en el hormigón. La utilización de la microsilíce compensa el posible alto contenido de álcalis en el cemento.

Porosidad

Tal como se ha indicado, el efecto principal físico que genera el humo de sílice sobre la microestructura del hormigón endurecido es un refinamiento en la estructura de los poros. El volumen total de estos no cambia necesariamente, pero los grandes aparecen subdivididos en otros más pequeños. Esta mejora en la estructura de los poros se refleja

en una resistencia más alta, siendo también importante para la permeabilidad del material.

Otro factor importante es la mejora en la calidad de la zona de transición árido-pasta, tanto en la estructura como en la composición. Además de la mejora en la adherencia entre el árido y la pasta, la porosidad y la capacidad de transporte de la región que corresponde a la interfase se reducen.

Permeabilidad

La presencia de humo de sílice en el hormigón disminuye su permeabilidad. Al mejorar la estructura porosa y disminuir dicha propiedad, esta adición contribuye de forma importante a incrementar la durabilidad del hormigón frente a ataques externos. Este hecho es debido a una disminución del número de poros de mayor tamaño de la mezcla.

Las mejoras en otras propiedades mecánicas de los hormigones de alta resistencia pueden igualmente ser atribuidas a cambios en la naturaleza de la porosidad y microestructura de la pasta endurecida.

Ataque por agentes químicos

El hormigón es, en general, un material estructuralmente altamente durable, aun así, determinadas acciones físicas y químicas pueden convertirlo en un material inservible antes de que haya alcanzado el límite de su vida útil.

Puede ocurrir un deterioro acelerado si está expuesto a agentes químicos fuertes, tal como los ácidos, pero igualmente puede ser deteriorado por una exposición a agentes relativamente menos severos, tales como las sales descongelantes, o las aguas naturales.

Otros tipos de agentes, tales como los procesos de hielo-deshielo, la corrosión de las armaduras, la acción del fuego, los procesos de erosión y corrosión... pueden destruir igualmente el hormigón.

Un deterioro rápido del material puede ser causado por un diseño inadecuado de la mezcla, un tipo de cemento no conveniente, uso de áridos de baja calidad, o una puesta en obra deficiente. Estos factores

son importantes para cualquier tipo de hormigón, y si son adecuadamente rectificadas se mitigará o se eliminará dicho deterioro.

Sin embargo, algunos ambientes son los suficientemente agresivos y obligan a considerar acciones adicionales para garantizar la durabilidad. De este modo, el uso de cementos especiales, aditivos diversos, puzolanas, revestimientos... son algunas de las opciones que se deben emplear con el fin de conseguir un material durable.

El uso del humo de sílice reduce el deterioro generado por el ataque químico, ya que produce un aumento de resistencia a dichos ataques. La disminución de la permeabilidad en el hormigón de alta resistencia es el factor individual más importante para mejorar la resistencia a ataques externos dado que reduce tanto el volumen del hormigón expuesto como la magnitud con la que las soluciones pueden alcanzar el material.

Una reducción de la permeabilidad significa una disminución significativa en la magnitud del deterioro. La reducción de la relación agua/cemento es una alternativa para reducir la permeabilidad; siendo otra, la adición de materiales con actividad puzolánica, como es el caso de la microsílice.

Dependiendo del tipo de puzolana empleado, el incremento de la durabilidad se puede alcanzar de alguna de las siguientes formas:

- Por reducción en la permeabilidad del hormigón.
- Por reducción del contenido de hidróxido de calcio del cemento hidratado.
- Por consumo de álcalis durante el proceso de hidratación

La extrema fineza y el alto contenido de sílice que presenta el humo de sílice lo convierten en un material puzolánico muy efectivo el cual ha alcanzado valores importantes de uso frente a las acciones internas o externas que podrían afectar a la durabilidad del hormigón; acelera la reacción de hidratación y mejora el grado de hidratación.

La mejora en la durabilidad es atribuida a la reducción del contenido de hidróxido de calcio, disminución en la permeabilidad, y a los silicatos cálcicos hidratados que se forman por reacción con la

microsílice. Debido a su gran finura, el humo de sílice es muy reactivo por lo que acelera la reacción de hidratación y mejora el grado de hidratación.

Durante el proceso de fraguado, el humo de sílice reacciona con el hidróxido de calcio para formar silicato de calcio hidratado; dicho compuesto tiene una baja relación calcio-sílice y un alto grado de polimerización. Es capaz de acomodar iones extraños tales como álcalis y aluminio, es especialmente estable y, presumiblemente, menos proclive a descomponerse en la cal y el gel de sílice cuando se produce depresión del pH. Como consecuencia el hormigón es más resistente a los procesos de lavado y carbonatación y a la exposición a ácidos diluidos.

La adición del humo de sílice puede incrementar la resistencia de un hormigón al ataque por un medio químico severamente agresivo. Las principales razones son una reducción en la permeabilidad y la reducción o completa eliminación del hidróxido de cal libre en el hormigón.

Factores adicionales son que la pasta de silicato hidratado formada por la acción del humo de sílice es más estable en ambientes de bajo pH, así como que la alta polimerización de estas pastas es capaz de controlar iones potencialmente reactivos tales como los de los álcalis y el aluminio.

Las microsílises no producen hormigones que estén totalmente libres de ataque químicos, pero pueden ser empleadas para ampliar el campo de los ambientes en los cuales el hormigón pueda comportarse satisfactoriamente sin necesidad de una protección superficial. Cuando se emplea esta adición, el aumento de resistencia a los ataques químicos es integral a través de todo el hormigón.

Resistencia a los sulfatos

Aquellos hormigones que presentan humo de sílice en su contenido, son más resistentes al ataque de sulfatos que otros que no presenten esta adición. El buen comportamiento de los hormigones de alta resistencia es atribuido a diversos factores de los cuales los más importantes pueden ser:

- Una refinada estructura de poros que hace más difícil el paso de los iones dañinos.

- Un menor contenido de hidróxido de calcio, lo cual permite la reducción en la formación de yeso y por consiguiente de etringita

Las anteriores consideraciones permiten concluir que la presencia de microsílíce contribuye de forma importante a la resistencia del hormigón frente a la acción de los sulfatos. Si comparamos con otros tipos de puzolanas, o materiales con actividad puzolánica, se ha encontrado que en todos los casos las mayores resistencia a los sulfatos se obtienen empleando humo de sílice.

Resistencia a los cloruros

La reducción del pH generada por el uso del humo de sílice en este tipo de hormigones disminuye la concentración de cloruros necesaria para destruir la capa pasiva y se inicie la corrosión de las armaduras. La microsílíce trabaja de diversas formas para reducir el riesgo de corrosión. La mejora en las propiedades de permeabilidad en los hormigones de alta resistencia permite reducir de forma importante la penetración de los cloruros en estructuras marinas y en aquellas expuestas a sales descongelantes. Por otro lado, también presentan una alta resistividad eléctrica, por lo que se disminuye de forma importante la velocidad con la que la corrosión puede ser iniciada.

Procesos de hielo-deshielo y efecto de sales anticongelantes.

En capítulos anteriores ya se ha comentado el efecto negativo que los materiales puzolánicos (cenizas y humo de sílice) producen en presencia de aireantes, entorpeciendo la acción de éstos de forma que en hormigones con estas adiciones los niveles de aire ocluido que se obtienen resultan inferiores. De forma análoga, algunos autores afirman también una disminución de la efectividad de los aireantes, cuando se utilizan simultáneamente con aditivos superplastificantes. Dado que dichas adiciones y aditivos químicos se utilizan normalmente en la fabricación de hormigones de alta resistencia, pueden aparecer problemas frente a fenómenos de hielo-deshielo y agentes anticongelantes.

Existen dos tipos de ensayos diferentes para este tipo de fenómeno:

- Procedimiento A: Hielo y deshielo en agua.

- Procedimiento B: Hielo en aire y deshielo en agua.

En ambos métodos el equipo debe ser capaz de completar un ciclo en el intervalo de dos a cinco horas. Las probetas se almacenan en agua desde el momento de desmoldado hasta el inicio del ensayo (este periodo debe ser normalmente de 14 días). Durante el ensayo se efectúan medidas dinámicas para determinar el módulo de elasticidad dinámico. Después de 300 ciclos de hielo-deshielo el factor durabilidad se calcula como la relación del módulo de elasticidad dinámico a los 300 ciclos al que se midió inicialmente, en tanto por ciento.

El hormigón debe tener un factor de durabilidad superior a 60 y una pérdida de peso media inferior al 7%, para poder considerarlo durable frente a fenómenos de alternancia hielo-deshielo.

Son varios los autores que protestan sobre la severidad del ensayo. En primer lugar no se permite un secado previo de las probetas, y en segundo lugar el número, amplitud y velocidad de los ciclos son mucho más duros de los que ocurren realmente en la naturaleza.

Tras consultar la bibliografía utilizada se puede llegar a una conclusión, acerca del efecto sobre la durabilidad que tiene la presencia de humo de sílice y superplastificantes en los hormigones de alta resistencia. Por un lado, el efecto del superplastificante sobre el aireante, impide que éste desarrolle un sistema de huecos de aire acondicionado, resultando hormigones con un factor de aire ocluido superior al obtenido sin la presencia del superplastificante. Para asegurar que un hormigón resulte durable, el valor de factor de espaciamiento debe ser menor o igual a 0,2 mm. Sin embargo, al utilizarse este tipo de aditivos en la fabricación de hormigones de alta resistencia, el factor de espaciamiento es superior; pero el hormigón sigue siendo durable.

Como conclusión, y según los datos aportados por las investigaciones realizadas, se puede decir que el superplastificante produce efectos negativos en hormigones, ya que aumenta el factor de espaciamiento de las burbujas, lo cual influye directamente en un descenso del factor de durabilidad; pero en el caso de hormigones de alta resistencia, aunque la presencia del aditivo aumenta el factor de espaciamiento, esto no influye

sobre el factor de durabilidad medido, al menos dentro de unos ciertos límites.

Resistencia a la abrasión

Un parámetro muy importante para obtener un hormigón con una buena resistencia a la abrasión es la calidad del árido empleado. Esta resistencia varía según el estado del hormigón, seco o húmedo. Además, se ha demostrado que al pasar de una resistencia de 50 a 100 MPa. la profundidad de huella se reduce a la mitad. Por otro lado, la profundidad de huella media en hormigones de alta resistencia es inferior a la registrada en hormigones convencionales. De este modo, una de las aplicaciones del humo de sílice como adición mineral dentro del hormigón, es la reparación de estructuras sometidas a una fuerte abrasión erosión.

Resistencia a agentes químicos.

La degradación de una estructura de hormigón se produce generalmente como resultado de una reacción química. Para propiciar dicha reacción es necesario que las sustancias agresivas sean transportadas del medio al sustrato bien que el agente esté presente en el hormigón y le sea permitida la movilidad suficiente para ponerse en contacto con el soporte de reacción. Si el transporte en alguna de las dos facetas citadas está impedido o es muy reducido, el proceso de degradación del hormigón no se producirá o quedará diferido a muy largo plazo.

El comportamiento de los hormigones de alta resistencia frente a la acción de agentes químicos suele ser más satisfactorio que el de otros tipos de hormigones. La modificación que en la estructura de la matriz cementicia de estos hormigones genera la adición de sustancias con elevado índice de puzolanidad, como es el caso del humo de sílice, mejora el comportamiento del material frente al ataque de soluciones de sulfatos, medios ácidos, y ante posibles reacciones álcali-árido.

Uno de los fenómenos más comunes que aparece en la superficie de hormigones expuestos a alteraciones de humedad-sequedad, consiste en la aparición de eflorescencias, provocado especialmente por la lixiviación del hidróxido cálcico que carbonata en la superficie del material. Generalmente, dichas eflorescencias constituyen un problema estético,

pero, en ocasiones, un desarrollo progresivo de este fenómeno puede incrementar la porosidad de la masa del hormigón y afectar, como consecuencia, a sus características de resistencia y durabilidad.

Reacción Álcali-Árido

Una de las formas de ataque al hormigón se produce en ocasiones como consecuencia de la reacción de los álcalis del cemento disueltos en los poros de la pasta con sílice de los áridos reactivos. El gel álcali-sílice formado absorbe agua y da lugar a un hinchamiento que genera tensiones internas en la masa de hormigón y puede causar su deterioro.

Las puzolanas reactivas pueden ser usadas en el control de dichos fenómenos de expansión. Ensayos realizados sobre pastas de cemento con adiciones de humo de sílice demuestran la capacidad de este mineral para reducir rápidamente las concentraciones de álcalis en el agua contenida en los poros de la pasta, impidiendo de este modo su reacción con la sílice reactiva que pudiera estar presente en los áridos.

Comportamiento frente a altas temperaturas

El comportamiento frente a altas temperaturas del hormigón de alta resistencia es notablemente diferente al del hormigón convencional. Por un lado, las curvas tensión-deformación del primero de ellos a elevadas temperaturas difieren mucho en su forma respecto al segundo. Generalmente, la rotura del hormigón de alta resistencia es más frágil y muestra una fuerte caída de resistencia alrededor de los 150°C (aproximadamente un 30%), mientras que el hormigón convencional mantiene su resistencia hasta aproximadamente 350°C. Este apartado será objeto de estudio más adelante.

Ventajas e Inconvenientes.

Las características especiales que presenta el HAR frente al HC, casi siempre son ventajosas, en algunos casos aplicables a la obra civil, y en otros, más concretos a los puentes. Sin embargo, también existen aspectos negativos que deben ser considerados tanto en la fase de proyecto como en la de ejecución:

Entre las ventajas de los HAR podemos citar las siguientes:

- El incremento de la resistencia a compresión ofrecida por este material mejora el comportamiento frente a esfuerzos de flexocompresión en elementos como losas, pilares, así como en puentes atirantados y arcos. Este factor también permite una reducción de las secciones.
- Reducción de las deformaciones ya que el HAR presenta un módulo de elasticidad mayor y un mejor comportamiento por efectos de la fluencia.
- Reducción del peso propio, influyendo este factor tanto en la cimentación como en los materiales empleados en ella.
- Mejor comportamiento a tracción, derivando en una mayor colaboración con la armadura así como una reducción de ésta.
- Reducción del ancho de fisura.
- Reducción de las pérdidas generadas por el pretensado.
- Mayor compacidad y menor permeabilidad, lo que supone una mayor durabilidad, propiedad muy recomendable para cualquier elemento expuesto a agresivas acciones medioambientales.
- Atendiendo a la ejecución, debe destacarse un abaratamiento de los elementos auxiliares, además del incremento de luz entre pilares.

Aunque estas ventajas resultan notablemente más positivas que negativos los inconvenientes, se debe ser consciente de la existencia de éstos. Algunos de los más significativos que pueden citarse son los siguientes:

- Los componentes del hormigón deben ser muy buenos materiales, especialmente los áridos. Respecto al humo de sílice, si el cemento y los áridos son de la calidad apropiada y la dosificación se encuentra muy bien estudiada, hasta valores de resistencia a compresión de 60 ó 70 MPa no es necesario su uso.

- Las dimensiones mínimas de las secciones por condiciones de servicio no permiten en todas las ocasiones aprovechar la mayor resistencia a compresión del material.
- Presenta una mayor fragilidad, lo que ha de tenerse en cuenta para el dimensionamiento de las secciones con la ductilidad adecuada.
- La baja relación agua/cemento hace necesario el empleo de superfluidificantes y superplastificantes, debiendo tenerse en cuenta que, para un mismo valor de descenso del cono de Abrams, su trabajabilidad es peor que la de un hormigón convencional.
- Ha de llevar a cabo un seguimiento y control de obra algo más intenso.

El aprovechamiento de las ventajas que presenta este material, junto con la atención a los inconvenientes que puede presentar para alguna de sus aplicaciones, permitirá un óptimo empleo del mismo.

Capítulo 5. Comportamiento del hormigón frente al fuego.

Introducción.

El hormigón proporciona una protección completa frente al fuego. A partir de diferentes estudios y ensayos se han demostrado las excelentes propiedades de resistencia al fuego que presenta este material, protegiendo vidas, bienes materiales, y el medio ambiente en caso de incendio. El hormigón cumple eficazmente con todos los objetivos exigidos por la legislación europea relativos a la protección, beneficiando a cualquier persona relacionada con el entorno del edificio, ya sean usuarios, propietarios, e incluso aseguradoras, prescriptores y bomberos. Tanto en edificaciones residenciales, túneles así como en naves industriales, el hormigón convencional 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 tanto los constructores de edificios, las aseguradoras así como los prescriptores están convirtiendo al hormigón en su material preferido en edificaciones, exigiendo cada más su empleo frente al de otros materiales de construcción. Si se establece el empleo de este compuesto, se puede estar seguro que se ha elegido la mejor opción, por varios motivos:

- No aumenta la carga de fuego.
- Proporciona recorridos de evacuación protegidos contra el fuego.
- Detiene la propagación del fuego entre compartimentos.
- Retrasa cualquiera fallo estructural, impidiendo en la mayoría de los casos que se produzca un colapso total.

En comparación con los otros materiales de construcción usuales, el hormigón presenta de forma sencilla 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 excelentes de protección y seguridad en caso de incendio, debido a varios factores:

- El hormigón no arde y no aumenta la carga de fuego.
- Protege eficazmente, proporcionando unos recorridos de emergencia seguros y una protección a los bomberos.
- Tiene una elevada resistencia al fuego y detiene la propagación del mismo.
- No produce humo ni gases tóxicos, contribuyendo a disminuir el riesgo de los ocupantes del edificio.
- Reduce la magnitud del incendio, y con ello también el riesgo de contaminación ambiental.
- El hormigón puede soportar condiciones extremas de fuego, lo que lo convierte en un material excelente para almacenes con una carga elevada.
- No se ve afectado por el agua utilizada para extinguir incendios.
- Los daños generados por un incendio son fáciles de reparar, por lo que ayuda a que se reanuden con rapidez las actividades.
- El hormigón presenta una gran solidez frente al fuego, facilitando la extinción de los incendios y reduciendo el riesgo de colapso estructural.
- En túneles, los pavimentos de hormigón resisten las condiciones extremas que se producen en caso de incendio.

En la mayoría de los edificios se debe estar preparado en caso de un posible incendio, para impedir sus efectos, tanto sobre las vidas

humanas como sobre los bienes materiales y medios de vida. El objetivo es asegurar que los edificios y las estructuras son capaces de proteger tanto a las personas como a los medios materiales. Aunque los reglamentos de seguridad frente a incendios están redactados teniendo en cuenta ambos factores, es razonable que se suele dar más importancia a la seguridad de las personas. Sin embargo, las aseguradoras y/o los propietarios pueden estar interesados en la seguridad frente al fuego por otros motivos:

- Conservación de la actividad económica.
- Almacenamiento de datos.
- Protección del medio ambiente.
- Mantenimiento de las infraestructuras críticas.

Todos estos factores son tenidos en cuenta en la legislación europea, así como en las reglamentaciones nacionales de seguridad frente al fuego.

Las medidas de protección contra incendios deben responder a una serie de objetivos:

Medidas de protección contra incendios
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 hay que añadirle que las estructuras 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.

Tabla 5.1 Enfoque global de la seguridad frente al fuego (Neck, 2002)

Estos tres objetivos se pueden conseguir utilizando el hormigón para la construcción de edificaciones. Debido a su incombustibilidad y a la elevada resistencia que presenta frente al fuego, el hormigón

proporciona una gran seguridad tanto a personas, propiedades así como al medio ambiente.

En la siguiente tabla se comparan las propiedades intrínsecas de resistencia al fuego del hormigón frente a las de otros materiales (madera y acero), donde se puede observar la superioridad de este compuesto en una serie de aspectos.

	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 5.2 Propiedades intrínsecas de resistencia al fuego.

Comportamiento del hormigón frente al fuego

Existen dos factores clave para explicar el comportamiento satisfactorio del hormigón frente al fuego:

- En primer lugar, sus propiedades básicas como material de construcción.
- En segundo lugar, su funcionalidad en una estructura.

El hormigón es un material incombustible, es decir, no tiene la capacidad de arder; además posee una baja transmisión de 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 un hormigón normal, ligero, aireado, fabricado como bloques... Atendiendo a estos hechos, ningún otro material es un ejemplo tan completo de seguridad en su comportamiento en caso de incendio.

A diferencia de otros materiales de construcción, no es posible prender fuego al hormigón. Es resistente a los materiales ardiendo, que pueden alcanzar temperaturas muy elevadas, pudiendo provocar e incluso reiniciar un incendio, además las llamas generadas por las sustancias en combustión no pueden inflamarlo. De este modo, y debido a que no arde, el hormigón no desprende ninguna clase de humo, gases o vapores tóxicos al verse afectado por el fuego. Tampoco gotean partículas fundidas, que puedan originar 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 se puede encontrar una demostración importante de las propiedades que presenta el hormigón frente al fuego. Todos los materiales de construcción han sido clasificados atendiendo a la reacción y a la resistencia que presentan ante el fuego, determinando si un material puede o no ser empleado y si necesita que se le aplique cualquier tipo de protección adicional. Dicha clasificación pertenece a la norma europea EN 13501-1: 2002: Clasificación en función del comportamiento frente al fuego de los productos de construcción y elementos para la edificación, la cual cataloga los materiales en siete clases, de acuerdo con su reacción al fuego.

La clase más elevada, como se puede observar en siguiente la tabla, es la denominada A1 (materiales no combustibles); la Comisión Europea facilita una lista que vincula a todos los materiales que cumplen con estos requisitos, donde se incluyen los diferentes tipos de hormigón y los componentes minerales del mismo. El hormigón cumple con dichos requisitos porque, en efecto, sus componentes minerales son incombustibles (es decir, no se inflaman a las temperaturas que normalmente se alcanzan en un incendio).

Clasificación europea de reacción al fuego de los materiales
A1. No combustible. Sin contribución <u>en grado máximo</u> al fuego.
A2. No combustible. Sin contribución <u>en grado menor</u> al fuego.
B. Combustible. Contribución <u>muy limitada</u> al fuego.
C. Combustible. Contribución <u>limitada</u> al fuego.
D. Combustible. Contribución <u>media</u> al fuego.
E. Combustible. Contribución <u>alta</u> al fuego.
F. Sin clasificar.

Tabla 5.3 Clasificación europea de reacción al fuego de los materiales

El hormigón es un material que presenta un elevado grado de resistencia frente al fuego y, en casi todas sus aplicaciones, puede describirse como a prueba de incendios si se diseña adecuadamente. Ya se ha comentado anteriormente que el hormigón tiene la característica de proteger muy eficazmente contra el fuego. Este hecho se debe a que sus componentes minerales tienen una gran capacidad calorífica y su estructura porosa se traduce en una baja conductividad térmica. Realmente, es esta baja velocidad de transmisión de calor la que concede al hormigón una protección eficiente 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 es por este motivo, por lo que las zonas interiores no alcanzan las mismas temperaturas elevadas que se producen en una superficie expuesta a la acción de las llamas. Atendiendo a este tema, se han realizado numerosos ensayos con los que se demuestra la baja conductividad térmica del hormigón. Por ejemplo, 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, demostrando a partir de este hecho, 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 elevadas temperaturas de un incendio puede producirse un cierto número de cambios físicos y químicos. Estos cambios se muestran en la siguiente tabla, donde se relacionan los niveles de temperatura dentro del hormigón (no las temperaturas de las llamas) con los cambios en sus propiedades.

Temperatura (°C)	Cambios en las propiedades del hormigón
250 – 420	Se produce una pérdida de recubrimiento con partes del hormigón separándose de la superficie.
300	Debido a la exposición al fuego, comienza una pérdida de firmeza, pero en realidad sólo en los primeros centímetros de hormigón, ya que internamente la temperatura estará por debajo de ésta.
550 – 600	Los materiales con base de cemento experimentan un descenso de su capacidad de apoyo
600	A partir de esta temperatura el hormigón no mantiene su capacidad estructural total.
900	Las temperaturas del aire en incendios rara vez exceden este nivel pero las de la llama pueden alcanzar temperaturas de 1200 °C e incluso superiores.

Tabla 5.4 Hormigón sometido al fuego: procesos físicos (Khoury, 2000)

Las altas temperaturas que se generan en un incendio provocan una serie de desperfectos en el hormigón; uno de ellos es el desconchado, el cual es muy común que se produzca. Por ello, en edificios normales (oficinas, hospitales, viviendas...) e incendios normales, los códigos de diseño como el Eurocódigo 2 permiten que se produzcan desconchados. 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 (este tema, se desarrollará más adelante). Se ha

demostrado mediante la realización de ensayos que aunque se produzcan descondados en la superficie del hormigón, este tipo de incendios no afectan de forma importante a la resistencia de la estructura.

El hormigón protege contra los efectos perjudiciales generados por la acción de las llamas en un incendio, y ha demostrado ser un elemento constructivo tan fiable que se utiliza con normalidad para proporcionar una compartimentación estable, ya sea en edificios industriales de gran tamaño, como en edificios de viviendas. Al dividir estas grandes edificaciones en compartimentos, el riesgo de pérdida total de los mismos, debidos a un incendio, prácticamente se elimina: los forjados del hormigón y los muros disminuyen la superficie afectada por el incendio, 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. Por otro lado y debido a que sus propiedades de protección frente al fuego son inherentes al mismo, es innecesario tanto disponer materiales adicionales de protección contra incendios así como realizar operaciones de mantenimiento de los mismos.



Fig. 5.1 El empleo de muros prefabricados proporciona una compartimentación resistente al fuego.

Una de las mayores ventajas que presenta una estructura realizada a partir de hormigón armado es que normalmente se puede reparar después de que se produzca un incendio, disminuyendo cualquier inconveniente, así como los costes finales. Las reducidas cargas de los forjados y las temperaturas relativamente bajas que se producen en la

mayoría de los incendios en los edificios se traduce en que la capacidad portante del hormigón se conserva casi totalmente, tanto durante como después de un incendio. Por estos motivos, 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



Fig. 5.2 Incendio de un edificio en Francfort

ello es preferible a una demolición y posterior reconstrucción. Existen algunos ejemplos que ratifican lo comentado:

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. 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, Kürkchübasche, 1975).



Fig. 5.3 Ejemplo de elementos de hormigón mostrando desconchados

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. 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.



Fig. 5.4 Reparación de elementos con gunita (hormigón proyectado)

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.

Proyecto de seguridad frente al fuego con hormigón

Para proporcionar seguridad frente al fuego, es necesario tanto la realización de un proyecto así como la elección de materiales adecuados. En este apartado se aclaran las principales consideraciones de diseño con respecto al mismo.

Requisitos que deben cumplir las edificaciones frente al fuego.

Hace años, los requisitos de seguridad frente a los incendios eran establecidos por los gobiernos nacionales, pero actualmente están basados en directivas, normas y recomendaciones europeas. Existen

cuatro objetivos principales que deben cumplirse al proyectar un edificio con el fin de que sea seguro frente al fuego:

- 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.

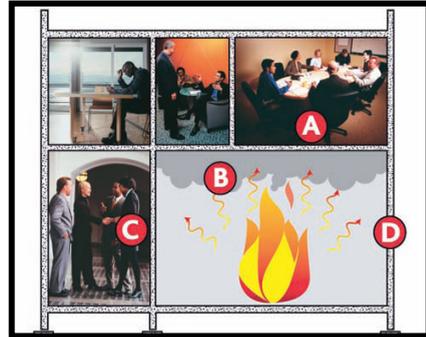


Fig. .5 Objetivos que debe cumplir una estructura

Objetivo	Requisito	Empleo del hormigón
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)
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.
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
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
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 5.5 Requisitos de seguridad frente al fuego y su relación con el hormigón

El hormigón puede satisfacer dichos objetivos de forma fácil, económica y con un alto grado de fiabilidad. En la siguiente tabla se incluyen algunos ejemplos de cómo pueden cumplirse los requisitos

anteriormente mencionados construyendo con hormigón, además también incluyen las funciones de protección total de las estructuras de hormigón.

Estos requisitos constituyen la base de los métodos de proyecto de estructuras frente al fuego incluidos en los Eurocódigos, por lo que han de ser tenidos en cuenta a la hora de proyectar cualquier tipo de edificación.

En cualquier construcción proyectada de acuerdo con el eurocódigo 2 se deben cumplir una serie de criterios de protección frente al fuego, los cuales se explican en la siguiente tabla:

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.		

Tabla 5.6 Criterios principales de protección contra incendios (Eurocódigo 2, Parte 1-2)

Las letras que designan estos criterios se utilizan conjuntamente con números que indican la resistencia en minutos frente a un fuego normalizado ISO. De este modo, un muro portante 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.

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 siguiente esquema, el Eurocodigo 2 permite a los ingenieros dimensionar una estructura y comprobar su resistencia frente al fuego empleando uno de los tres métodos siguientes:

- Determinación de las dimensiones mínimas de la sección transversal en ambas direcciones y de los recubrimientos de hormigón mediante tablas.
- 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.
- Dimensionamiento mediante métodos generales de cálculo en función de las tensiones provocadas por la temperatura y del comportamiento del elemento al ser calentado.

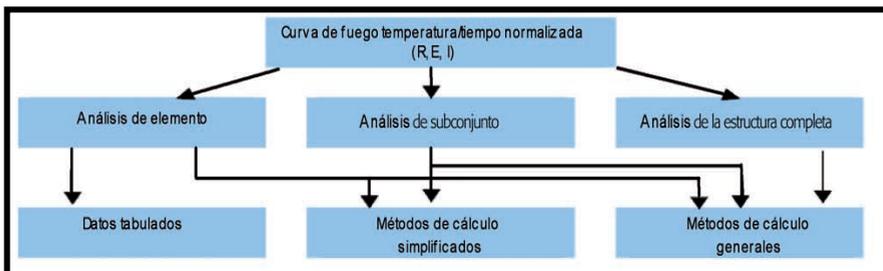


Fig. 5.6 Procedimiento de proyecto de resistencia al fuego de las estructuras

Además de las cláusulas genéricas sobre proyecto frente al fuego, que son de obligado cumplimiento 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 recomendable que los proyectistas consulten los DNAS para cerciorarse 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.

Protección de las personas

Cada vez que se produce un incendio, supone una amenaza para las vidas de las personas. Este hecho intensifica que se creen mejoras en la seguridad frente al fuego, y obliga a proyectar edificios que sean capaces de proteger a los humanos y a las propiedades del mismo de los peligros generados por 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 segunda sección de este documento se explica el comportamiento del hormigón frente al fuego, así como sus propiedades se comportan eficazmente 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. Esto permite que las personas puedan sobrevivir y recorrer el camino de evacuación, así como a los bomberos realizar su trabajo sin peligros adicionales y, lo que es más importante, reduce el impacto ambiental causado por los productos de la combustión.

Ya se ha comentado con anterioridad, que en cualquier proyecto de seguridad frente al fuego, las funciones de un elemento estructural se pueden designar atendiendo a su capacidad portante, separación y/o aislamiento (R, E, I) asignándoles un valor numérico (en minutos, de 15 a

360), que es la duración para la que se espera que el elemento portante cumpla sus funciones. En caso de incendio, la estructura debe cumplir como mínimo el nivel exigido por la legislación vigente, pero además, ha de ser estable durante el máximo tiempo posible. Esto tiene una gran importancia 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 transmisión de calor del hormigón se traducen en que éste no pueda



Fig. 5.7 El edificio Windsor ardiendo

arder y en que su resistencia no se vea afectada significativamente 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 desastroso 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 explica en el siguiente ejemplo.

Incendio del 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 cuando ocurren este tipo de fenómenos.

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”. Cada una de ellas contaba con 8 vigas de gran canto (3,75 m, es decir, la altura de suelo a techo en las restantes plantas) que se proyectaron para actuar como vigas de transferencia macizas, impidiendo el derrumbamiento provocado por los elementos estructurales que caían 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. 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. 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. 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



Fig. 5.8 La fachada por encima de la planta técnica del piso 16 quedó completamente destruida

fuego del edificio Windsor fue realizado por unos investigadores españoles del Instituto Técnico de Materiales y Construcciones (Intemac), una institución 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”. 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.

Edificios del World Trade Centre, Nueva York (2001)

La investigación realizada por el NIST (National Institute of Standards and Technology) tras este desastre, ha dado lugar a uno de los informes más influyentes e importantes nunca escritos acerca de seguridad en edificios. La serie final de informes, con una extensión superior al millar de páginas, fue publicada en 2006 después de tres años de estudios sobre incendios y edificios, así como de seguridad frente a incendios. El NIST estudió los posibles factores que generaron el derrumbamiento de los dos edificios con estructuras de acero; a partir de lo cual formuló una serie de recomendaciones sobre códigos, normas y prácticas en las áreas de proyecto estructural y seguridad para las personas:

- Una mayor integridad estructural, donde se debe incluir una prevención al colapso progresivo y adoptar una serie de métodos de ensayo aceptados a escala nacional.
- Un aumento de la resistencia al fuego de las estructuras con sistemas de protección contra incendios redundantes, de modo que se pueda:

- Realizar a tiempo el acceso y la evacuación.
 - Extinguir el incendio evitando derrumbamientos parciales.
 - Compartimentar el edificio, para que exista la posibilidad de resistir el incendio más grave sin que se produzcan derrumbamientos.
- Nuevos métodos de proyecto de resistencia de las estructuras frente al fuego: incluyendo el requisito de que en incendios incontrolados ardan sin que se produzca un colapso parcial o total.
 - Sistemas de evacuación de los edificios más complejos, con el fin de mantener la integridad y supervivencia.
 - Mejores sistemas de protección activa contra incendios equipados: con sistemas de alarma, comunicación y supresión.
 - Regulaciones más estrictas sobre aspersores y recorridos de emergencia en edificios existentes.
 - Mejores procedimientos y tecnologías de respuesta en caso de emergencia.

El hormigón es un material que puede cumplir sin demasiada dificultad las recomendaciones citadas.

Atendiendo al informe realizado por la ASCE (American Society of Civil Engineers), sobre el comportamiento del edificio del Pentágono después del impacto de un avión, desveló que la estructura de hormigón armado había tenido una influencia importante para impedir daños posteriores en el edificio. Además, dicha sociedad afirmó que la “continuidad, redundancia y resiliencia de la estructura contribuyeron al comportamiento del edificio” y recomienda que en el futuro sean incorporadas dichas características a otros edificios, especialmente en aquellos en los que se considere importante el riesgo de un colapso progresivo.

Mejoramiento de la seguridad frente al fuego en túneles de carretera.

En Europa existen más de 15.000 kilómetros de túneles de carretera y ferrocarril; son parte de la infraestructura de transporte y son especialmente importantes en regiones montañosas, así como cada vez más en las grandes ciudades, donde pueden disminuir las congestiones de tráfico y liberar espacios urbanos. El problema que presentan son los accidentes en los que se ven envueltos vehículos, los cuales pueden provocar incendios muy severos; donde se tienden a alcanzar temperaturas muy elevadas, de hasta 1.350 °C, pero más habitualmente entre 1.000 y 1.200 °C; estas temperaturas tan altas son debidas a la combustión de los carburantes y de los vehículos. En los incendios en túneles se alcanzan las temperaturas máximas más rápidamente que en incendios de edificios, debido a dos factores:

- Hidrocarburos de la gasolina y el gasoil.
- Presencia de espacios confinados.

Este hecho se puede apreciar en el siguiente gráfico.

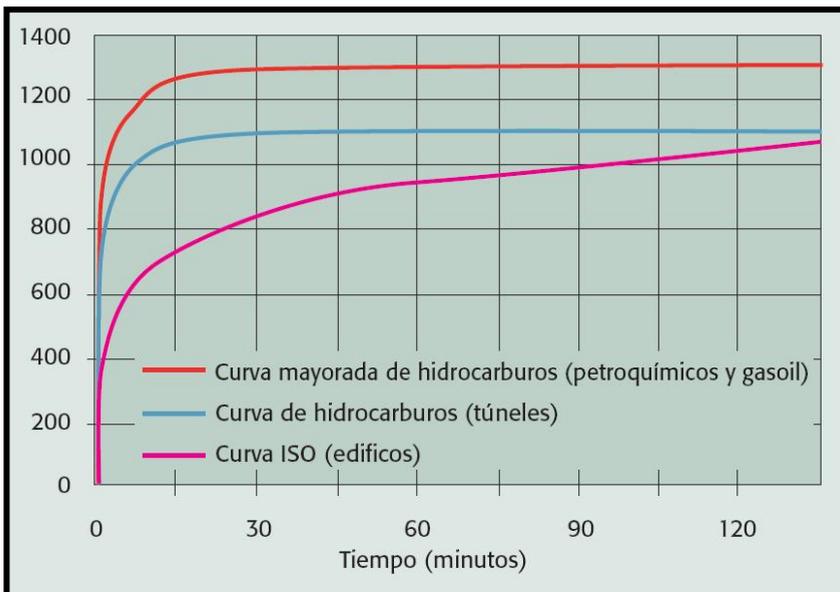


Fig. 5.9 Temperatura que se puede alcanzar en los incendios en túneles

Existe más probabilidad de que se produzca un incendio en un túnel de carretera que en uno de ferrocarril; por desgracia, estos incendios se suelen traducir en pérdidas de vidas humanas, además la expectativa de vida humana se ha cifrado en dos minutos, debido a que los gases producidos son altamente tóxicos. Por otro lado, los incendios que se originan en túneles de gran longitud situados en zonas remotas pueden estar activos durante un gran periodo de tiempo; como ocurrió en el incendio en el túnel del MontBlanc en 1999 el cual se mantuvo durante 53 horas. Es cierto que los accidentes de mayor importancia, como los del túnel del Canal de la Mancha (1996), MontBlanc (1999) y San Gotardo (2001) han hecho que se conozcan las catastróficas consecuencias que producen los incendios en este tipo de construcciones, y puesto de manifiesto las limitaciones que presentan los materiales con los que se han construido, así como soluciones estructurales para evitar el colapso. Como resultado, las regulaciones realizadas se han enfocado en mejorar las condiciones de evacuación y rescate de las personas que se ven envueltas en dichos accidentes, concentrándose actualmente los prescriptores en la seguridad, solidez y estabilidad.

En cambio, no se ha prestado la atención necesaria a los materiales de construcción de carreteras y cómo contribuyen a la carga de fuego; de este modo, es imprescindible enfocar desde otro punto de vista tanto el proyecto así como la construcción de los túneles. En caso de producirse un incendio de carretera, un pavimento incombustible y no tóxico, como es el del hormigón, contribuye a la seguridad tanto a la de los ocupantes de los vehículos, así como a la de los equipos de rescate. El hormigón cumple con estos requisitos, ya que:

- Es un material incombustible.
- No aumenta la carga de fuego.
- No se reblandece, por lo que no perjudica la tarea de los servicios de rescate.
- No se deforma.

- No gotea ni desprende gases tóxicos, aunque el incendio sea muy severo.

El hormigón puede utilizarse como revestimiento del túnel por sí solo, o bien siendo combinado con una barrera térmica; además, puede ser empleado en el pavimento, lo cual es muy útil ya que puede ser un sustitutivo de las mezclas bituminosas. Comparando ambos materiales, se pueden apreciar una serie de ventajas.

- Una mejora de la seguridad; ya se ha visto en apartados anteriores que el hormigón ni arde ni emite gases nocivos para las personas. Sin embargo, las mezclas bituminosas se inflaman entre 400 y 500 °C y al cabo de unos minutos generan vapores sofocantes y cancerígenos, humo, hollín y sustancias contaminantes. Por ejemplo, en el incendio que se produjo en el túnel del Mont Blanc a finales del siglo pasado, se quemaron 1.200 metros de pavimento bituminoso, con un efecto equivalente al de 85 automóviles adicionales ardiendo.
- Una mayor durabilidad tanto del pavimento, las instalaciones así como de la estructura. Este hecho se debe a que el hormigón no cambia su forma al calentarse, mientras que las mezclas bituminosas se inflaman, perdiendo su forma física, por lo que son un obstáculo para efectuar la evacuación y rescate en caso de incendio.
- El hormigón tiene unos periodos sin operaciones de conservación más largos comparándolos con los de un pavimento de mezcla bituminosa.
- Genera una mayor luminosidad; el hormigón presenta 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.

Una vez conocidas estas ventajas, se han realizado numerosas guías sobre reducción de riesgos en túneles; por ejemplo, en Alemania, la compañía de seguros internacional Munich Re, indicó que en túneles se debe disponer una calzada de material incombustible, como el hormigón, en lugar de mezclas bituminosas. En algunas reglamentaciones también se ha reconocido también el papel que puede jugar el hormigón en la seguridad frente al fuego de los túneles, el cual puede resistir temperaturas muy elevadas. Por ejemplo, en un decreto que se publicó en Austria a principio del nuevo siglo se exige que en todos los nuevos túneles de carretera con una longitud superior a un kilómetro el pavimento sea de hormigón. Eslovaquia también emplea pavimentos de hormigón en todos los nuevos túneles, al igual que se ha prescrito en España (Ministerio de Fomento, 2006).



Fig. 5.10 Los pavimentos de hormigón pueden resistir las temperaturas muy elevadas que se producen en los incendios de los túneles

No hay que olvidar que los incendios que se producen en el interior de los túneles son seguramente los más severos. A causa de las elevadas temperaturas que se generan, es razonable que haya algunos desconchados en la superficie del hormigón. Se han llevado a cabo numerosos estudios e investigaciones para desarrollar materiales de

revestimiento disminuyan los efectos de desconchado de las superficies de hormigón al verse sometidas a incendios de esta magnitud. Existe una clara evidencia de que si se incorporan en la mezcla de hormigón una cantidad específica de fibras de polipropileno se puede solucionar este problema, dando lugar a un hormigón que puede “respirar” en caso de incendio, siendo menos propenso a desconchase.

Uno de los motivos por los que el hormigón es ideal para este tipo de construcciones es que impide la contaminación del medio ambiente. Este material no origina humo o gases tóxicos en un incendio; además puede ayudar a impedir tanto la propagación de incendios así como las emisiones de humo perjudiciales desde el punto de vista medioambiental. Si se crean compartimentos de hormigón ó muros de separación se consigue que únicamente un volumen delimitado de mercancías pueda arder, por lo que se 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 para el medio ambiente, o de agua de los equipos de extinción que se hayan contaminado.

Los requisitos europeos sobre seguridad frente al fuego comentados en apartados anteriores, relativos a la seguridad de las personas mencionan específicamente los edificios residenciales ya que los riesgos que pueden darse en este tipo de construcciones son muy importantes; las casas y los edificios de apartamentos pueden estar densamente poblados y pueden tener elevadas cargas de fuego, como muebles e instalaciones. Tampoco debe olvidarse que los riesgos de las personas durmiendo son superiores que los de las que están despiertas. Todos estos factores hacen que el proyecto de una vivienda se tenga una consideración especial en lo relacionado a la seguridad frente a incendios. La mayoría de muertes que se producen en un incendio residencial no son provocadas por el colapso de la estructura, sino más bien por la inhalación de humos o gases que generan los materiales en combustión, lo cual impide a los ocupantes escapar rápidamente. (Neck, 2002)

Comparación de la seguridad frente al fuego en edificios residenciales de madera y de hormigón.

A partir de esta comparación, se derivan siete riesgos específicos del empleo de un material de construcción combustible, como la madera, en una estructura o un revestimiento de edificación (Schenider y Oswald, 2005):

- Aumento en la carga de fuego.
- Aumento de humo y de los productos de pirolisis.
- Mayores cantidades de monóxido de carbono.
- Ignición de elementos estructurales.
- Ignición dentro de los huecos de las construcciones.
- Peligro de combustión sin llama y de rescoldos imperceptibles (bolsas de brasas).
- Mayor ocurrencia de deflagraciones.

En este informe también se analizaron las estadísticas de muertes por incendios en varios países y se observó una clara relación entre el número de víctimas de los incendios y los materiales de construcción empleados en los edificios. El estudio realizado por los investigadores sobre los detalles típicos de las construcciones con madera mostró que el fallo estructural en un incendio podía suceder tanto por la combustión así como por el colapso de los elementos estructurales (los conectores metálicos de la estructura de madera al estar expuestos al fuego se reblandecen perdiendo su capacidad de soportar cargas). Por otro lado, también se desveló que la propagación del fuego entre habitaciones y/o pisos contiguos se aceleraba significativamente en aquellos edificios donde se habían utilizado materiales o revestimientos de madera como parte del muro exterior. El informe concluye destacando que las construcciones con estructuras de madera presentan una gran cantidad de puntos débiles en términos de resistencia al fuego, y recomienda que aseguren las estructuras de madera instalando sistemas de extinción automática de

incendios o mediante el empleo de materiales de construcción no inflamables para revestir aquellas superficies que sean inflamables, tal y como se indica en las recomendaciones para la construcción de estructuras de madera (Schenider y Oswald, 2005).

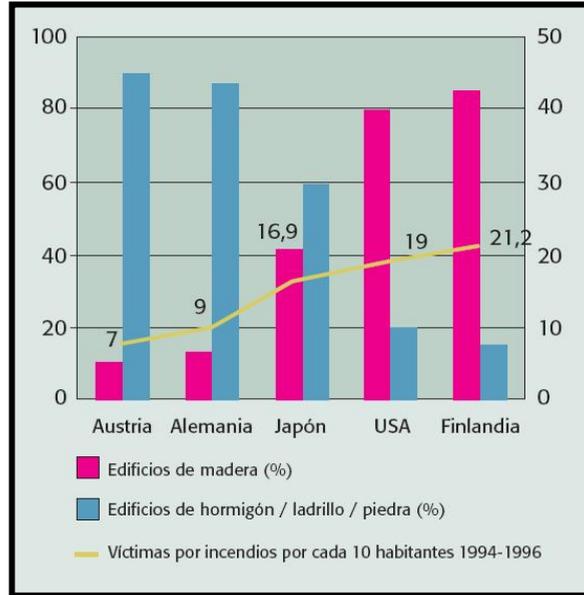


Fig. 5.11 Muertes por incendio en comparación con el tipo de construcción en cinco países (1994-1996) (TUW de Viena, Austria, Schneider y Oswald, 2005)

Evaluación independiente del daño provocado por incendios

En Suecia, se 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, el cual se basó en las estadísticas de la Asociación de Seguros de Suecia. El estudio se limitó a los incendios más importantes en edificios multifamiliares en los que el valor de la estructura asegurada superaba los 150 millones de euros. En dicho informe se incluyeron aproximadamente 125 incendios, los cuales suponían el 10% del total de los incendios contabilizados en edificios multifamiliares, y un 56 % de los más importantes. Los resultados mostraron que:

- La indemnización media por incendio en las casas de madera es del orden de 5 veces mayor que en incendios en edificios de hormigón/albañilería.
- Un incendio importante tiene mucha más probabilidad (once veces más) de que se genere en una casa construida a partir de madera que en una construida con hormigón/albañilería.
- El 50% de las casas de madera incendiadas tuvieron que ser demolidas debido al colapso estructural que sufrieron, mientras que en edificaciones de hormigón sólo el 9%.
- Únicamente en 3 de los 55 incendios de las casas de hormigón el fuego se propagó a los apartamentos colindantes.
- De los 55 incendios, 45 fueron iniciados en los desvanes y en la cubierta; normalmente el fuego comienza en los apartamentos situados en la planta de más altura, y se propaga al desván y a la cubierta, los cuales suelen estar contruidos mediante madera.

Este tipo de investigaciones y estudios han demostrado que existen una serie de riesgos cuando se construyen estructuras de madera, y hacen referencia a los beneficios en cuanto a seguridad frente al fuego que presentan las construcciones de hormigón y albañilería. Ya se ha mostrado en secciones anteriores que éstos últimos son la mejor elección para tener unos edificios residenciales seguros, por la combinación de dos motivos:

- La incombustibilidad que presenta el hormigón.
- Las propiedades del hormigón son muy eficaces a la hora de proteger frente al fuego.

En el siguiente ejemplo se muestran algunos problemas que presentan los edificios residenciales fabricados a partir de este material, la madera:

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



Fig. 5.12 El incendio de Colindale de los edificios residenciales con estructura de madera en construcción duró 5 horas y precisó de 100 bomberos y 20 bombas para controlarlo.

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. El incendio duró 5 horas y fueron necesarios 100 bomberos y 20 bombas para que pudiera ser controlado. 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 PM_{10} (partículas sólidas o líquidas de polvo, cenizas, hollín, partículas metálicas, cemento ó polen, dispersas en la atmósfera, y cuyo diámetro varía entre 2,5 y 10 μm), 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, 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”. En el momento de redactar este

documento, al menos uno de los bloques de la urbanización iba a ser reconstruido, esta vez con hormigón.

En caso de se produzca un terremoto y afecte a algún tipo de edificación, está comprobado que el hormigón impide la propagación del fuego. De hecho, en algunos países, las consideraciones de proyecto sísmico requieren que los proyectistas presten atención al problema específico de los incendios después de un terremoto; lo cual se ha tenido en cuenta, de forma adecuada, en países tales como Nueva Zelanda, en donde las estructuras de hormigón han sido identificados con una bajo nivel de vulnerabilidad a la propagación del fuego después de un terremoto (Wellington Lifelines Group, 2002)

Protección de los bienes y del comercio.

Las estructuras y edificios de hormigón tienen la capacidad de proteger de los peligros generados por un incendio tanto a las personas, así como a los bienes, pero evidentemente es a la seguridad de las personas a las que normalmente se les da una importancia mayor a la hora de realizar el proyecto, al igual que 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 han sido tenidos en cuenta en la legislación europea sobre seguridad frente a incendios, 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 sí mismo.

Atendiendo al coste en términos monetarios de los daños provocados por un incendio, suele estar estimado entre el 0,2 y el 0,3% del producto nacional bruto anual (PNB). Efectivamente, 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.

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
R. Unido	0,16	1,31	2,2	0,32
EE.UU.	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

Tabla 5.7 Datos estadísticos internacionales sobre incendios en edificios entre 1994 y 1996 (Neck, 2002).

Un estudio realizado por una empresa (Usine Enterprise) en 2004 desveló que más de la mitad de los negocios suelen quebrar después de sufrir un incendio de gran importancia. En las empresas comerciales como almacenes, hoteles, fábricas, centros de distribución y bloques de oficinas, los incendios perturban la función y productividad de los negocios e interrumpen el servicio al cliente. Esto genera importantes problemas, y puede llegar a traducirse en pérdidas de empleos o cierres. En cambio, la escala del impacto en edificios que constituyen infraestructuras críticas puede ser incluso mucho superior; 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 este tipo de edificaciones son indeseables y potencialmente perjudiciales.

En numerosos artículos podemos encontrar la siguiente afirmación: “Con el hormigón, la protección frente al fuego es gratis”. Ésta puede resultar sorprendente, ya que los datos globales del coste de la

protección contra incendios muestran que entre el 2 y el 4% de los costes de producción se aplican usualmente a medidas de protección contra el fuego (se puede observar en la tabla anterior), pero con hormigón la protección contra este fenómeno es un beneficio intrínseco y por ello libre de costes. Efectivamente, el hormigón tiene una reserva de seguridad frente al fuego que sigue siendo eficiente incluso después de una modificación o cambio de uso. Las propiedades de seguridad contra el fuego que presenta el hormigón son inalterables al paso del tiempo, sin que ello lleve gastos de conservación.

Las propiedades inherentes de resistencia al fuego del hormigón le permiten cumplir en su totalidad los requisitos de protección contra incendios de un modo económico; de alguna manera este factor también le otorga una garantía de futuro frente a pequeños cambios que se puedan producir en la legislación de seguridad frente al fuego. En cambio, en caso de incendio, es cuando adquiere más sentido la inversión en un edificio de hormigón. Tanto en el hogar como en el trabajo, la continuidad de las actividades sociales y de negocios es una prioridad, y es en este punto 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 disminuyendo el alcance y la magnitud de las reparaciones necesarias.
- En caso de incendio, los trabajos de reparación son generalmente reducidos, no presentan dificultades a la hora de realizarlos y el coste no es muy considerable, ya que las zonas que requieren reparación suelen ser pequeñas. Además no es muy frecuente que se llegue a demoler parcial o totalmente un edificio.
- Los compartimentos de hormigón constituidos por los forjados y paredes del edificio imposibilitan que se propague el incendio, de forma que las habitaciones anexas en una fábrica, almacén, oficina, o los apartamentos contiguos dentro de un edificio residencial, podrían seguir funcionando en su forma habitual una

vez finalizada la emergencia, sin importar el estado en que se encuentre la zona afectada por el incendio.

- En instalaciones industriales y de negocios, las paredes de hormigón de separación contra incendios impiden la pérdida de bienes valiosos, maquinaria, equipos y/o mercancías, disminuyendo por un lado el impacto en las actividades económicas, y por otro el nivel de las compensaciones a solicitar a las compañías de seguros.
- La experiencia demuestra que en edificios de hormigón son muy reducidos los daños causados por el agua a consecuencia de un incendio.

Es comprensible que cualquier tipo de incendio provoque pérdidas económicas y, en la mayoría de los casos, son las aseguradoras las que tienen que cubrir los daños generados por el mismo. Por este motivo, las compañías de seguros poseen bases de datos detalladas y precisas sobre el comportamiento frente al fuego de los distintos materiales de construcción; conocen que el hormigón proporciona una excelente protección frente al fuego, lo cual se traduce en unas primas de seguros más reducidas. En los países europeos, el coste de los seguros en edificios contruidos con este material suelen ser inferiores que las de otros inmuebles hechos con distintos materiales (que frecuentemente se ven muy afectados e incluso destruidos por el fuego). Debido a su probada protección y resistencia frente al fuego, los edificios de hormigón son clasificados, en la mayor parte de los casos, en la categoría más favorable en los seguros contra incendios. Cada compañía de seguros tiene sus propias prescripciones individuales y listas de primas. Éstas son diferentes en cada país pero, debido al historial del hormigón, la mayoría de ellas ofrecen ventajas a los propietarios de los edificios elaborados con este compuesto. Para calcular una prima de seguro se deben tener en cuenta una serie de 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).

En los siguientes párrafos se comentan algunos ejemplos relacionados con lo anteriormente expuesto:

Incendio de unas naves industriales, Burdeos (1997).

Este incendio, causado por un cortocircuito en el techo, se propagó muy rápidamente, afectando a 2000 m² en tan solo 10 minutos. Los bomberos necesitaron tres horas para dominarlo, y en este tiempo, ardió



Fig. 5.13 Los paneles sándwich ligeros se derrumbaron en este incendio propagándose a los edificios adyacentes

la mitad de la superficie del almacén, aproximadamente unos 4500 m². La causa de esta propagación tan rápida fue la ignición del material aislante combustible de los paneles sándwich de la fachada del edificio; los bomberos no consiguieron evitar que el fuego se extendiera a lo largo de los 130 metros de fachada. Evidentemente, la

división del edificio en compartimentos mediante muros de hormigón y el uso de paneles de hormigón en la fachada de la nave industrial hubiera limitado la propagación de este incendio.

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. 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. En la imagen se puede apreciar cómo la propagación del fuego fue contenida por los paneles de hormigón.

A pesar de la legislación europea que requiere la protección de



las personas, los bienes y el medio ambiente, en la gran mayoría de los incendios, la prioridad de las brigadas de bomberos es la protección de las vidas humanas por lo que los protocolos relativos a la entrada de un edificio en llamas 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 negarse a entrar en un edificio si todos los ocupantes han sido evacuados; pero siempre intentan acercarse a los edificios tanto como sea posible, con el fin de combatir el incendio eficazmente. Las fachadas de hormigón conceden 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 contiguas y evaluar cualquier tipo de riesgo para el medio ambiente causado por los productos de combustión. Estos planteamientos refuerzan la necesidad que tienen las personas de poder abandonar de forma segura un edificio dentro del periodo especificado de resistencia al fuego.

Una serie de estudios realizados en Francia desvelan que de 13.000 incendios anuales, aproximadamente el 5% ocurren en edificios industriales; un incendio de gran magnitud puede provocar una pérdida de unos 2 millones de euros (Cimbêton, 2006). En este tipo de edificaciones, las mercancías almacenadas pueden ser muy combustibles, además de estar presentes en grandes cantidades, lo que conlleva un riesgo muy importante de colapso en caso de incendio, a no ser que se dispongan de zonas compartimentadas para separar las mercancías y disminuir en consecuencia la carga de fuego. Consideremos el siguiente ejemplo: un propietario de almacén desea minimizar los daños a las mercancías en caso de que se produzca un incendio; sin embargo, conoce que los bomberos pueden insistir en combatir el fuego desde fuera del edificio, a una distancia segura. En este caso, el hormigón puede proporcionar algunas ventajas apreciables:

- En función de la clase de mercancía y del tamaño del compartimento, la carga de fuego puede ser muy alta. Una disposición organizada de muros interiores de hormigón, reduciría el riesgo de propagación del fuego de un espacio a otro, reduciendo así el nivel de daño generado.
- En edificios de una sola planta, con luces amplias, y un único compartimento, existe un riesgo importante de que se colapse prematura y repentinamente 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.
- Las fachadas resistentes al fuego construidas con hormigón (clasificadas como REI 120) imposibilitan la propagación del fuego y protegen a los bomberos. Este tipo de fachadas permiten a los bomberos aproximarse un 50% más cerca porque actúan como un escudo de protección frente al calor.
- Los muros exteriores de hormigón son tan efectivos para evitar la propagación del fuego entre edificios colindantes que las regulaciones en algunos países, como en Francia, permiten disminuir las distancias entre ellos en relación con las requeridas con otros materiales de construcción de muros.

- Una cubierta de hormigón es incombustible, es decir, de clase A-1 de protección frente al fuego y no gotea partículas fundidas.

Mercado internacional de flores, Rungis, París (2003).



Fig. 5.15 Vista exterior del almacén de flores en Rungis, que reanudó sus actividades seis meses después del incendio.

La superficie completa del almacén, aproximadamente de 7.200, resistieron, en gran parte; las paredes y techo elaborados con hormigón soportaron correctamente el efecto del fuego, el cual generó una gran cantidad de calor y de gases en el momento que 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 la capital de Francia fue afectada por el humo generado al quemarse una superficie de 1.600 m² ocupada por mercancías y equipos. Pese a que se derrumbaron 100 m² del almacén, el fuego se consiguió aislar sin que se extendiera demasiado; y medio año después, tras realizar la correspondiente evaluación de daños, fue posible reparar el edificio y reanudar las actividades.



Fig. 5.16 El interior destruido del almacén, que fue reparado rápidamente

El hormigón y la ingeniería de protección frente al fuego.

La ingeniería de fuego (IF) es un método de calcular las medidas de protección frente al fuego, basado en procedimientos establecidos por el comportamiento más que tablas de datos prescriptivos. Hasta ahora, ha sido utilizada fundamentalmente en estructuras grandes y complejas, como aeropuertos y/o hospitales, con el fin de disminuir los requisitos de las medidas de protección frente al fuego. No existe una única definición de IF, pero ISO (International Organization for Standardization) 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).

Las técnicas de diseño empleadas en la ingeniería de fuego tienen en cuenta una serie de factores para establecer el valor de cálculo de la carga de fuego, a partir del cual se puede tanto evaluar los elementos estructurales individuales así como establecer la probabilidad conjunta de que un incendio provoque daños estructurales:

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

Asimismo, en el método de cálculo se tienen en cuenta todas las medidas activas para contener el incendio dentro del edificio, las cuales se suman para conseguir el último factor en el cálculo de la carga de fuego, lo que incluye:

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

No existen reglas comunes para los métodos de la ingeniería de fuego; los programas de ordenador con los que se trabaja en estos procedimientos se encuentran aún en fase de desarrollo y presentan diferencias significativas en cuanto a enfoques, experiencia y niveles de aceptación por parte de las autoridades. La IF debe ser utilizada con precaución; se debe recurrir a un experto en caso de que sea necesario y evaluar todas 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 de 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; una combinación de estas medidas tiene un efecto multiplicador, 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 (Fig. 5.17)

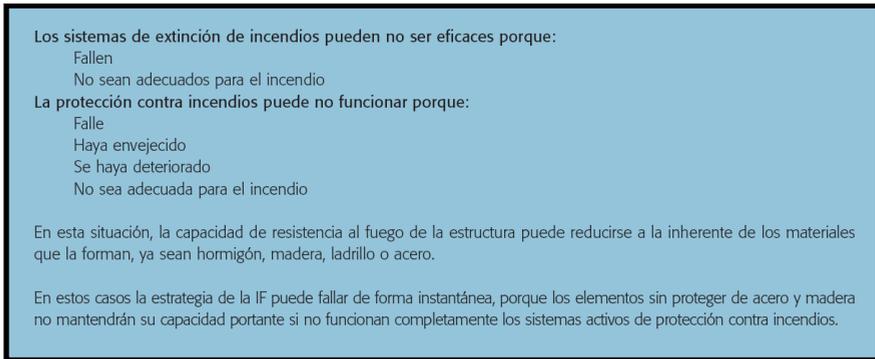


Fig. 5.17 Por qué la IF puede no funcionar

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.

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. 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.

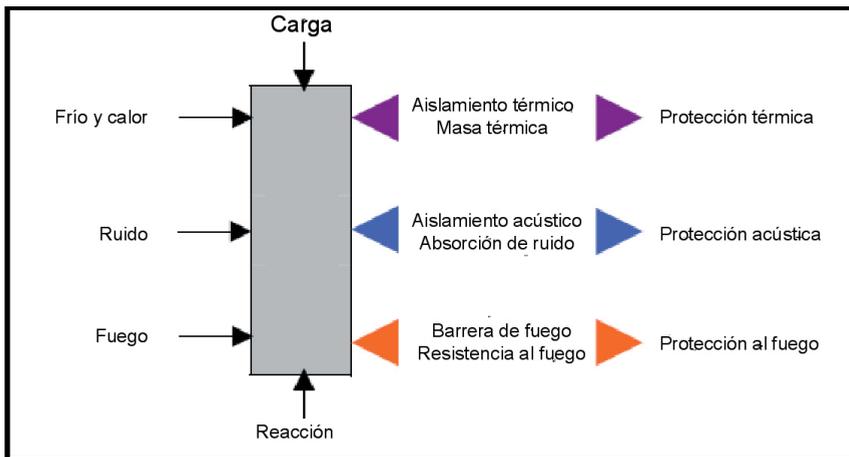


Fig. 5.18 Beneficios de valor añadido del hormigón (Neck, 1999)

Efectos de un incendio en una estructura

Un incendio constituye una amenaza para la vida por la asfixia, el envenenamiento y las temperaturas elevadas, pero de generarse en un edificio el peligro aumenta por la propia estructura del mismo. En un

recinto exterior, con aire fresco, es casi imposible superar los 700°C. En un recinto cerrado la temperatura sube un 30% más debido a la reflexión y radiación de las paredes.

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

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

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

Efectos sobre el hormigón armado

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

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

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

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

Daños a la adherencia



Fig. 5. 19 Efecto del calor sobre una estructura

La existencia de coqueas o debilitamientos en la sección del hormigón, permite que las altas temperaturas atraviesen el hormigón y lleguen a las armaduras muy rápidamente. El acero es un buen conductor por lo que se calienta toda la barra de acero pero no el hormigón. El acero tiende a dilatar y el hormigón no, esto produce compresiones y fisuras. Después se produce el enfriamiento y la rotura.

La adherencia se daña precisamente por dicho salto térmico. En el caso de hormigón

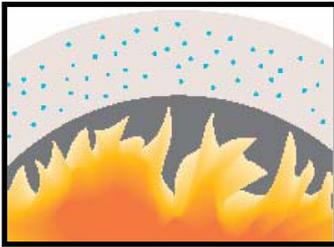
pretensado esto se agudiza ya que trabaja por adherencia.

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

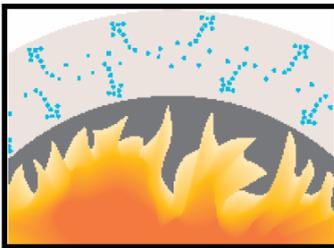
La rotura del hormigón por adherencia se produce con el enfriamiento, es decir, cuando ya no hay humo. Por tanto las grietas aparecidas así son blancas, porque la superficie interior no está ahumada.

Efecto spalling

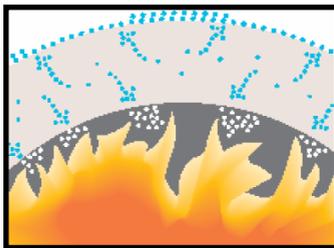
El proceso de desprendimiento, también conocido como *spalling*, tiene lugar rápidamente, a los 100-150°C, como resultado del impacto térmico y el cambio de estado del agua intersticial.



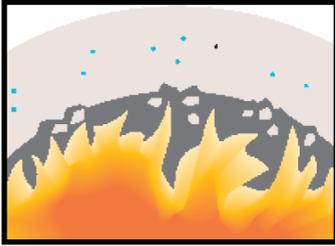
1. El vapor de agua es un componente estable e integral del hormigón con carácter previo a su calentamiento



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



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



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



5. El desprendimiento se hace más grave a medida que el fuego avanza, dejando expuestas las armaduras.

A medida que el agua se convierte en vapor y debido a la densa estructura del hormigón, el vapor no puede escapar eficientemente a través de su matriz, y la presión aumenta. Cuando la presión en el hormigón es superior a su resistencia, comienza el proceso de desprendimiento o *spalling*. Estas coqueas así producidas dejan al descubierto el hormigón “fresco”, que queda expuesto a un calor intenso, lo que reproduce el proceso de desprendimiento a mayor velocidad.

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

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



Fig. 5.20 "Fall of" de una estructura de hormigón tras un incendio

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

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

El efecto *spalling* depende en gran medida de la proporción de agua/cemento en el hormigón. Se admite que con contenidos de humedad

inferiores al 3% no hay riesgo. Lo que se cumple con clase de exposición I.

El hormigón de alta resistencia es más propenso a desprenderse explosivamente y a experimentar múltiples desconchados que el hormigón de resistencia normal ya que existe una mayor presión en los poros durante el calentamiento por ser más denso y menos poroso. En este tipo de hormigones se recomienda disponer cierto porcentaje de fibras de polipropileno (ya se profundizará más adelante sobre este tema) muy finas, de forma que esas fibras se fundan con el aumento de la temperatura permitiendo de este modo vías de expansión del vapor.

Consideraciones finales

Comprobamos la importancia de garantizar el espesor del hormigón de recubrimiento. Además de esto, podemos limitar la temperatura del hormigón (y del acero) para retardar o evitar que alcance su temperatura crítica mediante métodos de protección pasiva.

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

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

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

de una estructura, inmediatamente después de un periodo especificado de estabilidad o de un incendio de larga duración.

Protección contra incendios

Se llama protección contra incendios al conjunto de medidas que se disponen en los edificios para protegerlos contra la acción del fuego.

Generalmente, con ellas se trata de conseguir tres fines:

- Salvar vidas humanas
- Minimizar las pérdidas económicas producidas por el fuego.
- Conseguir que las actividades del edificio puedan reanudarse en el plazo de tiempo más corto posible.

La salvación de vidas humanas suele ser el único fin de la normativa de los diversos estados y los otros dos los imponen las compañías de seguros rebajando las pólizas cuanto más apropiados sean los medios.

Las medidas fundamentales contra incendios pueden clasificarse en dos tipos:

Medidas pasivas: Se trata de las medidas que afectan al proyecto o a la construcción del edificio, en primer lugar facilitando la evacuación de los usuarios presentes en caso de incendio, mediante caminos (pasillos y escaleras) de suficiente amplitud, y en segundo lugar retardando y confinando la acción del fuego para que no se extienda muy deprisa o se pare antes de invadir otras zonas.

Medidas activas: Fundamentalmente manifiestas en las instalaciones de extinción de incendios.

Medios pasivos

Para conseguir una fácil y rápida evacuación de los ocupantes del edificio, las diversas normativas determinan el ancho de los pasillos, escaleras y puertas de evacuación, las distancias máximas a recorrer hasta llegar a un lugar seguro, así como disposiciones constructivas (apertura de las puertas en el sentido de la evacuación, escaleras con pasamanos,...). También se establecen recorridos de evacuación protegidos (pasillos y escaleras), de modo que no solamente tienen paredes, suelo y techo resistentes a la acción del fuego, sino que están decorados con materiales incombustibles. Las disposiciones llegan a determinar que un tramo de escaleras tendrá un mínimo de tres escalones, para evitar caídas. Para retardar el avance del fuego se divide el edificio en sectores de incendio de determinados tamaños, sectores limitados por paredes, techo y suelo de una cierta resistencia al fuego. En la evacuación, pasar de un sector a otro, es llegar a un lugar más seguro.



Fig. 5.21 Detector de humo

Se sabe que Nerón, cuando reconstruyó Roma tras el incendio, obligó a que las medianeras de las casas fueran de piedra, para evitar que en el futuro se repitiese un desastre semejante. Es la primera noticia que se tiene del establecimiento de algo semejante a lo que ahora se conoce como “sectores de incendio”.

Medios activos

Se dividen en varios tipos.

- Detección:

Mediante detectores automáticos (de humos, de llamas o de calor, según las materias contenidas en el local) o manuales (timbres que cualquiera puede pulsar si ve un conato de incendio).

- Alerta y Señalización:

Se da aviso a los ocupantes mediante timbres o megafonía y se señalan con letreros en color verde (a veces luminosos) las vías de evacuación. Hay letreros de color encarnado señalando las salidas que no sirven como recorrido de evacuación. También debe de haber un sistema de iluminación mínimo, alimentado por baterías, que permita llegar hasta la salida en caso de fallo de los sistemas de iluminación normales del edificio.



Fig. 5.22 Señal indicando recorrido de salida

Los sistemas automáticos de Alerta se encargan también de avisar, por medios electrónicos, a los bomberos. En los demás casos debe encargarse una persona por teléfono.

- Extinción:

Mediante agentes extintores (agua, polvo, espuma, nieve carbónica), contenidos en extintores o conducidos por tuberías que los llevan hasta unos dispositivos (bocas de incendio, hidrantes, rociadores) que pueden funcionar manual o automáticamente.

- Presurización de escaleras:

Por otra parte, y en la edificación de mediana a gran altura, es ampliamente utilizado el método de presurización de las cajas de escaleras a fin de mantener una presión estática muy superior a la existente en los pasillos de los pisos. Este artificio es necesario para que los humos a alta temperatura no se desplacen hacia el interior de las escaleras, lugar destinado a la expedita evacuación de los ocupantes del edificio, además de evitar un posible efecto de tobera debido a la menor densidad propia de los humos, lo que provocaría una aceleración en la

propagación del incendio y su difícil manejo. Este método de presurización se realiza mediante ventiladores industriales de tipo axial, de gran caudal, que generan una circulación desde la parte inferior de la edificación hasta un respiradero superior. Cabe recordar que para que este método surta efecto, las puertas cortafuego deben mantenerse cerradas siendo para ello lo más apropiado las puertas pivotantes.

Normativas

En cada país suele existir una norma que regula las disposiciones de protección, tanto activas como pasivas. A veces, los gobiernos locales, promulgan normas adicionales que adaptan la normativa nacional a las particularidades de su zona.

En España es de aplicación el Documento Básico DB SI "Seguridad en caso de incendio", del Código Técnico de la Edificación en edificios residenciales, comerciales, administrativos... y el Reglamento de Seguridad contra incendios en establecimientos industriales es de obligada aplicación en industrias (RD 2267/2004). Anterior al DB SI, estaba en vigor la Norma Básica de la Edificación- Condiciones de Protección de Incendios (NBE-CPI-96) derogada el 29 de septiembre de 2006.



Fig. 5.23 Extintor de polvo ABC

Métodos aplicados contra la acción del fuego.

En este apartado se desarrollarán las distintas aplicaciones, con las que se pueden conseguir un mejor comportamiento del hormigón frente al fuego, o bien, una forma de protegerlo. Entre ellas destacan diferentes tipos de fibras, aislantes térmicos...

Tipos de fibras

En el mercado actual existe una amplia variedad de fibras que se emplean para mejorar las propiedades de los distintos materiales utilizados en diversos campos de la industria. Mediante el uso de fibras se consiguen mejorar las cualidades de los hormigones, principalmente su comportamiento estructural, su ductilidad y su durabilidad.

Los diferentes tipos de fibras se pueden clasificar atendiendo a diferentes factores:

- Naturaleza de los materiales.
 - Orgánicas.
 - Inorgánicas.
- Método de fabricación.
 - Sintéticas.
 - Naturales.
- Resistencia.
 - Estructurales.
 - No estructurales.

En nuestro caso, nos centraremos en las fibras clasificadas según su resistencia:

Fibras estructurales

Podemos considerar fibras estructurales aquellas que son más resistentes, tienen un módulo de elasticidad de Young superior a 25 Gpa y mayores resistencias a la tracción que el acero. En el siguiente gráfico se comparan el módulo de elasticidad de Young, la resistencia a tracción y la deformación de algunas de las principales fibras estructurales con los de los tradicionales refuerzos de acero.

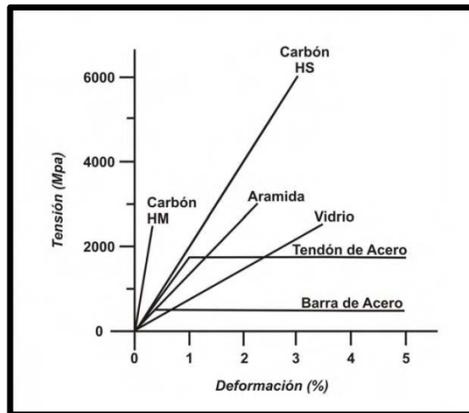


Fig. 5.24 Comparación de la resistencia de varios tipos de fibras

Las fibras más resistentes son las de Carbono y Aramida. La fibra de Basalto considerada en el presente trabajo, ocupa una posición intermedia entre la fibra de Vidrio y la de Aramida, muy próxima a ésta. Las fibras de Acero tienen un módulo de elasticidad elevado (200 Gpa), únicamente superado por las fibras PAN de Carbono de alto módulo (HM); sin embargo su resistencia a la tracción es muy inferior (1,2Gpa) frente a otras fibras como las de Carbono (hasta 4,8Gpa), Aramida, Basalto y Vidrio (hasta 4,7 Gpa).

Fibra sintética de carbono

Se fabrican a partir de dos tipos de materiales: polímeros textiles como el rayón o el poliacrilonitrilo (PAN) y alquitranes cuya procedencia puede ser de las refinerías de petróleo o del carbón. Este tipo de fibras puede alcanzar módulos de elasticidad Young de hasta 1000 Gpa.

Las propiedades que confiere al hormigón son: elevada resistencia a tracción y a flexión, mayor resistencia a la fisuración, gran durabilidad, menor densidad, estabilidad química, resistencia a la corrosión, a los ácidos y a los álcalis, resistencia a altas



Fig. 5.25 Fibra sintética de carbono

temperaturas y resistencia a las vibraciones, seísmos y explosiones.

La utilización en el campo de la Ingeniería civil está limitada actualmente, por su elevado coste, a construcciones emblemáticas (puentes y edificios). En un futuro próximo se emplearán como refuerzo de revestimientos para hacerlos más resistentes, durables y resistentes a los seísmos. También en reparaciones y refuerzos puntuales de revestimientos deteriorados.

La utilización de fibras de carbono, en una proporción de 0,2%-0,4% en volumen en sostenimientos y revestimientos permite, por su conductividad eléctrica, convertir a estos en "inteligentes". Las variaciones de resistividad al paso de una débil corriente eléctrica, permite conocer el grado de fisuración del hormigón, aumentando su resistividad con el incremento de la fisuración y de la fracturación de éste.

Fibra sintética de aramida

Las fibras de aramida comenzaron a fabricarse a partir de copolímeros a través de diferentes procesos. Hay distintos tipos de fibra Aramida como según su composición: Technora [co-poli-(parafenileno-oxidifenileno-tereftalamida)], Twaron/Kevlar [poli-(parafenileno-tereftalamida)], (PPTA), TEIJINCONEX [poli-(metafenileno-isoftalamida)]

Las propiedades que confiere al hormigón son: elevada resistencia a tracción, gran tenacidad, comportamiento elasto plástico, dúctil, eliminación de fisuras, resistente a flexión, resistente a la corrosión y a la oxidación.



Fig. 5.26 Fibra de aramida

Su campo de aplicación es similar a las fibras de carbono. Por el momento, su utilización en el campo de la ingeniería civil está limitada, por su coste elevado, a la fabricación de cables de anclaje, elementos de pretensado y geomallas. En un futuro próximo, con la reducción de sus costes de producción, estas fibras, solas o en combinación con otro tipo de

fibras, se utilizarán como refuerzo de hormigones más tenaces y dúctiles, compatibles con deformaciones superiores al 4%.

Fibra inorgánica de basalto

La fibra natural de basalto se fabrica de la roca basalto (lava volcánica solidificada), por fusión en un horno calentado por gas a 1580° C. La roca fundida se bate mediante un proceso de centrifugación. Se producen fibras de 60 a 100 mm de longitud con un diámetro entre 7 y 13 micras.

Las propiedades que aporta a los hormigones son: alta resistencia a tracción, mayor módulo de elasticidad, elevada tenacidad, alta durabilidad, resistencia a elevadas temperaturas (982°C), resistencia a los ataques químicos y a los ácidos, resistente a las vibraciones, seísmos y mejor acabado superficial.

En hormigones de revestimiento como único refuerzo o como complemento a las armaduras de refuerzo, en hormigones en masa o armados (dovelas), en hormigones a los que se les exija una gran durabilidad, en hormigones resistentes al fuego, a las vibraciones, a los seísmos y a las explosiones.



Fig. 5.27 Fibra inorgánica de basalto

Fibra inorgánica sintética de vidrio

Se fabrican por extrusión del vidrio fundido al hacerlo pasar por una especie de tamices. En forma pura es un molímero (SiO_2)_n. En su forma más frecuente presenta una estructura tetraédrica, con los átomos de oxígeno situados en los vértices del tetraedro y el átomo de silicio situado en el centro del tetraedro.

Por su estructura amorfa, las propiedades de la fibra son las mismas en la dirección de ésta que en la dirección perpendicular.

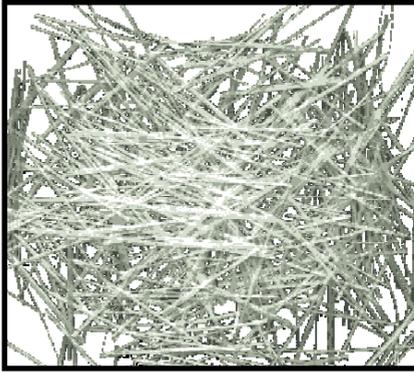


Fig. 5.28 Fibra de vidrio

hormigones de revestimiento para incrementar su resistencia al fuego, su durabilidad y su resistencia a los efectos sísmicos. También se está empezando a emplear en revestimientos “inteligentes”, utilizando la conductividad eléctrica de las fibras para determinar el grado de fisuración en función de la variación de su resistividad.

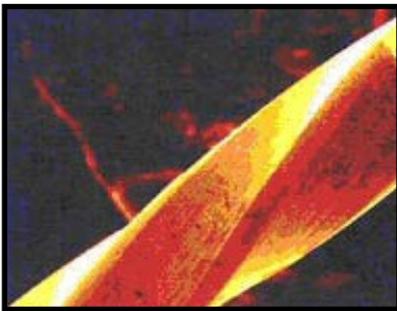
Las propiedades que añade al hormigón son: incrementa notablemente la resistencia a flexotracción (25%), aumenta la tenacidad y ductilidad, evita la fisuración posterior del fraguado, mejora la durabilidad, mejora el acabado superficial.

Se usan en la fabricación de elementos prefabricados de hormigón (GRP, GRE, GRC) y en

Nuevas fibras metálicas

Nos referiremos ahora a una nueva generación de fibras metálicas diseñadas para conseguir unas propiedades óptimas, mejorando la geometría, el tamaño, sus propiedades mecánicas y su compatibilidad con la matriz de cemento.

Una de las fibras desarrolladas es la denominada Torex, actualmente llamada Helix. Esta fibra está fabricada con acero de muy



alta calidad y diseñada con una forma y tamaño optimizados, de forma que se consigue una gran trabazón entre ella y la matriz de cemento.

En el siguiente gráfico se representan las curvas tensión-deformación para un hormigón reforzado con una fibra normal (a) y con una fibra Torex (b); en el segundo caso se ha desarrollado una zona (II) en la que el hormigón desarrolla una tensión creciente hasta el punto

reforzado con una fibra normal (a) y con una fibra Torex (b); en el segundo caso se ha desarrollado una zona (II) en la que el hormigón desarrolla una tensión creciente hasta el punto

de rotura con un máximo σ_{pc} y con una deformación ϵ_{pc} ; el hormigón manifiesta un comportamiento “strain hardening” y desarrolla una energía de deformación representada por el área sombreada de la zona (II), que representa la medida de su tenacidad.

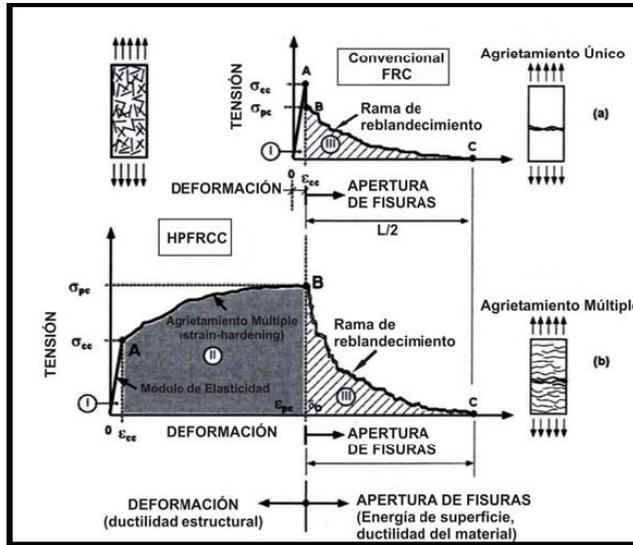


Fig. 5.30 Curva tensión deformación. a) Hormigones convencionales con fibra Torex y b) Hormigón de alta resistencia con fibra de Torex.

Este tipo de fibra, básicamente triangular y torsionada, proporciona al hormigón las siguientes propiedades: incrementa la trabazón entre las fibras y la matriz de cemento, eleva sensiblemente la resistencia a tracción, a flexión, la ductilidad y la tenacidad. Tiene un comportamiento “deformación-tensión” (strain-hardening). Capacidad de absorción de energía de impacto. Evita las fisuraciones en el proceso de endurecimiento. Resistente a la abrasión. No resistente a la corrosión.

Especialmente indicado en hormigones sometidos a fuertes presiones y deformaciones (fluencia, squeezing, swelling severos)

Fibra sintética de alcohol con polivinilo (pva)

Es una fibra sintética fabricada a partir del alcohol de polivinilo, $(C_2H_4O)_n$, después de un proceso de endurecimiento con formol.



Fig. 5.31 Fibras PVA

Confiere las siguientes propiedades al hormigón: proporciona una unión molecular entre fibra y cemento mucho más fuerte que cualquier unión mecánica. Se consiguen hormigones de alta resistencia a compresión (96,5 Mpa). Comportamiento deformación-tensión (strain-hardening). Alta resistencia a tracción y tenacidad. Gran ductilidad, permitiendo importantes deformaciones. Elimina o reduce las

fisuraciones en el proceso de endurecimiento. Incremento muy notable de la durabilidad. Resistente a los ácidos y álcalis y a los ataques químicos. Resistente a la abrasión y a la corrosión. Proporciona muy buena resistencia pasiva al fuego (con el calor las fibras se descomponen en vapor de agua y en CO₂).

Fibras no estructurales

Hay otro tipo de fibras menos resistentes que las fibras estructurales, pero que proporcionan a los hormigones unas propiedades muy interesantes como: resistencia a la corrosión, a los álcalis y a los ácidos, incremento de su ductilidad, reducción de la fisuración de fraguado.... Se consideran fibras no estructurales aquellas que tienen un módulo de elasticidad Young ≤ 25 Gpa. A este grupo pertenecen todas las fibras sintéticas termo-plásticas orgánicas fabricadas fundamentalmente a partir del polipropileno.

Fibras de polipropileno

Las fibras macro-sintéticas se fabrican con polipropileno 100% puro; algún tipo de fibra, como la ENDURO 600, se refuerza con polietileno.

Existen en el mercado diferentes tipos de macro-fibras; su densidad varía entre 0,91-0,92, pudiendo llegar hasta 1,14. Tienen una forma sinusoidal que mejora su trabazón con la matriz de cemento.



Fig. 5.32 Fibra Forta-Ferro



Fig. 5.33 Fibra Ultra-Shot

Las propiedades que aportan al hormigón son: mayor ligereza, mejor adherencia, incrementa la ductilidad del hormigón, resistente a la corrosión, al ataque químico de álcalis y ácidos. Incremento importante de la durabilidad. Resistencia pasiva al fuego con dosificaciones de 2kg/m^3 . Elimina o reduce las fisuraciones en el proceso de endurecimiento del hormigón con dosificaciones de 5 kg/m^3 - 8 Kg/m^3 . Incremento, proporcional a la cantidad de fibras utilizadas, de la tenacidad, resistencia residual, resistencia al impacto y resistencia a la flexión. Mejor calidad de acabados superficiales. Alta capacidad de absorción de energía, superior a 1000 Julios, con una elongación máxima de 25 mm, con dosificaciones de 7 kg/m^3 . Resistente a la fracturación (strain-hardening) con dosificaciones de fibra $> 5\text{ kg/m}^3$.

Fibras de polipropileno impregnadas con resina

Este tipo de fibra se fabrica a partir del polipropileno y/o polietileno de muy alta calidad, que finalmente se impregna con una capa de resina. Se ha incorporado muy recientemente al mercado, bajo patente americana con el nombre comercial Barchip. La fibra tiene un perfil corrugado que favorece muy notablemente su trabazón con el hormigón.

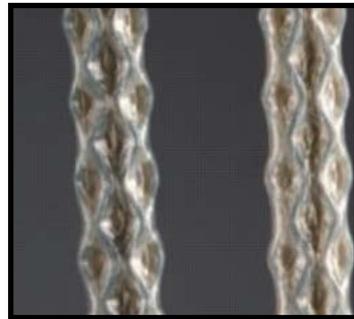


Fig. 5.34 Fibra Estructural Barchip Shogun

Aporta las siguientes ventajas: hormigón más ligero, elimina o reduce la fisuración en el proceso de endurecimiento del hormigón con dosificaciones de fibra de 3Kg/m^3 a 5Kg/m^3 . Tenacidad a flexión similar

al acero. Mayor durabilidad. Mayor ductilidad. Resistencia pasiva al fuego con dosificación de $1\text{Kg}/\text{m}^3$. Todas las demás propiedades aportadas al hormigón con la utilización de las macrofibras sintéticas de polipropileno.

El campo de utilización de este tipo de fibra es el mismo que el indicado para las macrofibras sintéticas de polipropileno.

Fibras micro-sintéticas (pp)

Son fibras más cortas (entre 6 mm y 64 mm); el diámetro de la fibra también es menor que el de las macrosintéticas (34-56 micras). Esta fibra tiene un módulo de elasticidad Young y una resistencia a tracción menor que la fibra macro-sintética. Las fibras de polipropileno se fabrican con las variedades de monofilamentos y multifilamentos.

Hay diferentes tipos de fibras micro-sintéticas: fibras de resistencia pasiva al fuego y fibras contra la microfisuración.

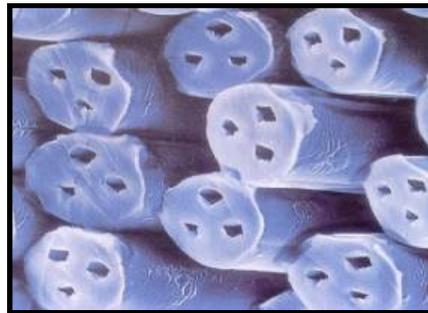


Fig. 5.35 Fibras contra la microfisuración Fig.5.36 Fibras de resistencia pasiva al fuego

Proporcionan las siguientes ventajas: se reduce la segregación, incremento de la hidratación. Se reduce la micro-fisuración (retracción). Aumenta la resistencia a la abrasión y al impacto. Menos permeable. Se reduce la corrosión. Se incrementa su tenacidad. Se mejora su acabado superficial. Mayor durabilidad. En la actualidad, ya se emplea en hormigones de revestimiento.

Aislante Térmico

Se puede entender como aislante térmico, aquel material, que usado en la construcción tiene una alta resistencia térmica, estableciendo una

barrera al paso el calor entre dos medios que naturalmente tenderían a igualarse en temperatura.

El mejor aislante térmico es el vacío, pero debido a la gran dificultad para conseguir y mantener condiciones de vacío, éste se utiliza en muy pocas ocasiones. En la práctica se utiliza aire, que gracias a su baja conductividad térmica y un bajo coeficiente de absorción de la radiación, constituye un elemento muy resistente al paso del calor. Sin embargo, el fenómeno de convección que se origina en las cámaras de aire aumenta sensiblemente su capacidad de transferencia térmica. Por este hecho se utilizan como aislamiento térmico materiales porosos y fibrosos, capaces y de inmovilizar el aire seco y capaz de confinarlo en el interior de celdillas más o menos estancas. Aunque en la mayoría de los casos el gas encerrado es el aire común, en aislantes de celda cerrada (formados por burbujas no comunicadas entre sí, como en el caso del poliuretano proyectado), el gas utilizado como *agente espumante* es el que queda finalmente encerrado. También es posible utilizar otras combinaciones de gases distintas, pero su empleo está muy poco extendido. Entre los aislantes térmicos utilizados para la protección del hormigón en caso de incendio podemos encontrar:

Lana mineral

La lana mineral es un material de fibras inorgánicas constituido por un entrelazado de filamentos de materiales pétreos que forman un fieltro que contiene y mantiene el aire en estado inmóvil. Dicha estructura permite conseguir productos muy ligeros con alto nivel de protección y aislación térmica y contra el fuego.

Es un producto natural compuesto básicamente con arena silíceo para la lana de vidrio, y con roca basáltica para la lana de roca.



Fig. 5.37 Lana Mineral

La lana mineral tiene un amplio uso y es un producto reconocido como buen aislante térmico y acústico. Proporciona una importante ganancia de aislamiento acústico de los elementos constructivos a los que se incorpora, obteniendo una reducción sonora notable de hasta 70 decibelios. Es un material que permite soluciones diversas, de fácil colocación y que cumplen perfectamente los principios de resistencias mecánicas.

Para lograr este objetivo se necesitan revestimientos protectores ligeros y de larga vida útil. Por lo cual, este material se emplea tanto en construcciones nuevas como en rehabilitaciones. La lana mineral puede encontrarse en cubiertas, forjados, fachadas, suelos, falsos techos, tabiques divisorios, conductos de aire acondicionado, protección de estructuras, puertas, mamparas, cerramientos exteriores...

Vidrio celular

El vidrio celular, también conocido como *vidrio expandido*, es un material de construcción creado a partir de polvo cocido. Es utilizado principalmente como aislante térmico o como protección contra el fuego, y también en falsos techos de lugares muy húmedos o con necesidad de mantener buenas condiciones de asepsia.

Fabricación

El material se obtiene tras fusionar polvo vítreo, normalmente proveniente del reciclaje de vidrio blanco. Mediante procesos termoquímicos, el polvo de vidrio se esponja, creando burbujas en vacío parcial, consiguiendo un material de muy baja conductividad térmica (en torno a $0,048 \text{ W/m}^\circ\text{C}$).

La pasta resultante tras el proceso de cocido se corta en piezas comerciales cuyas dimensiones, dependiendo de su uso, oscilan entre los 30-50cm de anchura y 50-100cm de longitud, con grosores de pieza entre 1,3 y 4cm.

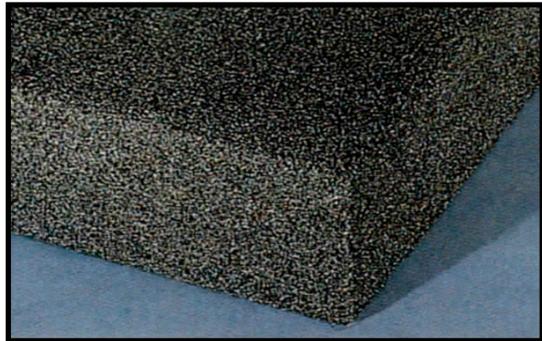


Fig. 5.38 Vidrio celular

Características

El material es similar en aspecto y peso a la piedra pómez volcánica, pero con una textura más porosa.

Las placas de vidrio celular son rígidas y muy ligeras: la densidad usual para placas de aislamiento térmico es de 157-170 kg/m³, mientras que el utilizado como falso techo, más resistente, presenta una densidad de 450 kg/m³. Debido a que las burbujas o células que encierra el material no están comunicadas entre sí, el material es impermeable al agua y al vapor de agua, siendo buen aislante térmico; además es incombustible y ofrece gran resistencia al fuego. Otra característica de este material es que, al estar compuesto exclusivamente por vidrio, es aséptico e imputrescible, motivo por el cual se utiliza en falsos techos de laboratorios, hospitales o centros de salud.

El vidrio celular común es de color negro, aunque se puede colorear, comercializándose en una limitada gama de colores. Hay que prestar atención a la presencia de álcalis, como en todos los compuestos de vidrio, usualmente presentes en cementos y algunos tipos de yeso, por lo que la compatibilidad de estas placas con este tipo de materiales (especialmente morteros) debe estudiarse con detenimiento.

Vermiculita

La vermiculita es un mineral formado por silicatos de hierro o magnesio, del grupo de las micas, originada principalmente en la alteración hidrotermal de la biotita.



Fig. 5.39 Vermiculita

Al elevar rápidamente la temperatura de la vermiculita se genera una expansión conocida como exfoliación, resultando un producto utilizado como agregado liviano para

construcción con propiedades aislantes térmicas y acústicas, además de ser químicamente inerte.

Además, se utiliza como sustrato en cultivos hidropónicos, como árido para elaborar hormigones de baja densidad, como aislante térmico y acústico, en extintores, como elemento filtrante, como protección de materiales o equipamientos frágiles, para aumentar la viscosidad de aceites lubricantes, como absorbente de la humedad.

Origen y características

La vermiculita no es un nombre comercial, sino un término genérico para un mineral de la familia de la mica compuesto básicamente por silicatos de aluminio, magnesio y de hierro. Su forma natural es la de una mica de color pardo y estructura laminar, conteniendo agua inter laminada.

Su característica principal es que al calentarla a una temperatura determinada, su capacidad de expansión o exfoliación produce que aumente de ocho a veinte veces su volumen original.

Esta exfoliación se debe a la presencia de agua en el mineral crudo. Cuando se calienta con rapidez por encima de 870°C. a medida que el agua se evapora se va transformando cada partícula laminar del mineral en un fuelle a modo de gusano y crea un gran número de pequeñas láminas con reflejos metálicos, de color pardo, con baja densidad aparente y elevada porosidad.

Propiedades

- Ligereza: las densidades aparentes de la vermiculita oscilan entre 60 y 140 kg/m³, según granulometrías.
- Aislamiento térmico, la vermiculita expandida mantiene su capacidad de aislamiento entre 200 y 1200°C.
- Su conductividad térmica es de 0,053 kcal/h/m°C. para una temperatura media de 20°C. Su capacidad calorífica es muy baja (0,2).

Las paredes brillantes de las laminillas de mica de vermiculita forman una multitud de pantallas que reflejan y dispersan la energía calorífica transmitida por radiación, y convierten dicho material en el aislante ideal para altas temperaturas.

- Aislamiento acústico, al incidir las ondas sonoras sobre las laminillas multidireccionales de la vermiculita expandida son reflejadas en multitud de direcciones y absorbidas por la estructura microscópica de burbujas de aire del mineral. Por estas razones la vermiculita es un excelente aislante acústico para una amplísima gama de frecuencias.
- Resistencia al fuego, el punto de fusión de la vermiculita es 1370°C. y la temperatura de reblandecimiento es 1250°C. Es un material incombustible y químicamente muy estable a altas temperaturas lo que lo convierte en un material idóneo para la protección contra el fuego.
- Inalterabilidad, la vermiculita es insensible a los agentes atmosféricos y al paso del tiempo. Es estable, químicamente neutra ($\text{pH} = 7,2$) e inerte, no es higroscópica y no produce ninguna acción sobre el hierro o el acero.

Capítulo 6. Comportamiento del hormigón de alta resistencia frente al fuego

Introducción

Durante los últimos años, la industria de la construcción ha mostrado un gran interés en el uso del hormigón de alta resistencia. Esto es debido a las mejoras que puede ofrecer en el rendimiento de la estructura, tales como de alta resistencia y durabilidad, en comparación con los hormigones convencionales. El hormigón de alta resistencia, que fue utilizado ampliamente en aplicaciones tales como puentes, estructuras *off-shore* y proyectos de infraestructura, se ha extendido a los pilares de edificaciones. A menudo, los pilares de HAR constituyen el principal elemento para soportar la carga, por lo que disponer unas correctas medidas de protección frente al fuego, es uno de los requisitos de seguridad importantes en el diseño de edificios.

En general, los elementos elaborados con hormigón, principalmente con hormigón convencional, tienen un buen comportamiento frente al fuego. Sin embargo, los resultados de numerosos estudios realizados por Phan, Diederichs y Kodur han demostrado que existen diferencias entre el comportamiento del hormigón de alta resistencia y el tradicional cuando son expuestos a elevadas temperaturas. Ya se ha comentado con anterioridad que los HAR tienen la desventaja de sufrir desprendimientos (*spalling*) en presencia de altas temperaturas, como en caso de incendio.

Las normativas de construcción, tales como el Código Nacional de Construcción de Canadá (NBCC), por lo general especifican los requisitos de resistencia al fuego de los elementos estructurales. En América del Norte, estructuras de hormigón deben ser diseñados de acuerdo con la norma ACI en EE.UU. y la CSA A23.3-M94 estándar en Canadá. La última edición de la norma CSA contiene especificaciones detalladas sobre el diseño de los elementos estructurales de HAR, sin embargo, no existen pautas para el diseño de resistencia al fuego de los elementos estructurales HAR ya sea en la norma CSA o las normas ACI.

Los estudios de esta investigación fueron realizados por Kodur, McGrath, Cheng y Wang en el Consejo de Investigación Nacional de Canadá (NRCC), en colaboración con la industria del hormigón y las organizaciones de investigación internacional. El objetivo principal de este estudio es entender el comportamiento de los pilares de hormigón de alta resistencia y cuantificar la influencia de la acción del fuego sobre éstos, por lo que se realizaron diversos estudios experimentales y numéricos; con el fin de mitigar el *spalling* y mejorar su resistencia frente al fuego.

Toda la literatura consultada coincide en que la reacción al fuego del hormigón de alta resistencia es diferente a la de los hormigones tradicionales, y no muestran un rendimiento tan bueno. Además, el *spalling* del hormigón ha sido una de las principales preocupaciones debido a la baja porosidad que presenta el HAR, por lo que investigadores como Diederichs, Hertz y Kodur han realizado numerosas observaciones en el laboratorio con pruebas de fuego real.

Teorizaron que el *spalling* es causado por la acumulación de presión en los poros durante el calentamiento, siendo el hormigón de alta resistencia más susceptible que el hormigón tradicional, debido a su baja porosidad. Durante la exposición al fuego, el vapor de agua genera una gran presión, que no puede escapar debido a la alta densidad del HAR. A partir de 300°C, la presión alcanza un valor aproximado a 8 MPa; dichas presiones internas suelen ser demasiado elevadas para ser resistida por la mezcla de HAR que tiene una resistencia a tracción de 5 MPa aproximadamente (Diederichs, U.; Jumppanen, U.M., Schneider, U.). La información extraída de los estudios realizados muestra que predecir el comportamiento ante el fuego, en general, y el *spalling*, en particular, es muy difícil ya que se ve afectado por una serie de factores.

La gran mayoría de los estudios realizados con anterioridad se han centrado en entender el comportamiento del *spalling* y en los factores que le influyen en el hormigón de alta resistencia. Basándose en las investigaciones de Phan, Hertz y Kodur, se dedujo que este fenómeno puede minimizarse adoptando medidas como la adición de fibras de polipropileno o proporcionando protecciones externas al hormigón frente al fuego.

La resistencia al fuego de cualquier elemento estructural depende de su geometría, los materiales utilizados, la intensidad de carga y el tipo de exposición frente al fuego. Por otro lado, no solo influye la magnitud del *spalling*, en caso de que exista, sino también del ritmo de pérdida de resistencia del hormigón. Sin embargo, es más eficaz optimizar el diseño de la mezcla, que incluir protecciones externas frente al fuego, ya que se mejora la relación coste-eficacia, así como la estética del sistema estructural.

El objetivo de la mayoría de los análisis anteriores era mitigar los daños generados por el *spalling* en el HAR. Sin embargo, la finalidad de esta investigación es evaluar la resistencia al fuego de los pilares de hormigón de alta resistencia, la cual no sólo depende del *spalling*, sino también del comportamiento de éstos frente al fuego. Los datos obtenidos tras la realización de los correspondientes ensayos se utilizaron para elaborar ciertas pautas de diseño con el fin de disminuir el *spalling* y mejorar la resistencia al fuego de los pilares de HAR.

Ensayos de resistencia al fuego sobre el HAR

Estudios experimentales

El programa experimental consistió en la realización de las pruebas de resistencia al fuego a numerosas probetas de hormigón armado. Entre las variables utilizadas para la elaboración de los ensayos se incluyen: dimensiones de los pilares, resistencia del hormigón, tipo de árido utilizado, refuerzos y tipos de fibras, intensidad de carga y su excentricidad... Tanto los pilares de hormigón de alta resistencia, así como de hormigón convencional fueron incluidos en este estudio; todos ellos con una longitud de 3.810 mm y diseñados de acuerdo con la normativa vigente en este Canadá (CSA). A los 28 días, la resistencia a compresión de las probetas varió desde 34 MPa (resistencia típica de los hormigones convencionales) hasta 110 MPa (típica de los hormigones de alta resistencia); la mayoría de los pilares tenían una resistencia entre 80-100 MPa. Por otro lado, y con el objetivo de medir la temperatura en diferentes puntos de la sección transversal, fueron instalados medidores a la mitad de cada uno de los pilares.

Los pilares fueron ensayados en un horno construido especialmente para este fin; fue diseñado para producir las condiciones que soporta un pilar durante un incendio: temperaturas elevadas, cargas estructurales y transferencias de calor. Durante el ensayo de resistencia al fuego, los pilares fueron expuestos, en carga, a un calor controlado cuyo valor medio se asemejaba a lo posible a la curva estándar de temperatura ASTM E119-2000. La temperatura del horno, el hormigón, y las armaduras, así como las deformaciones axiales y rotaciones, se registraron hasta el colapso del pilar.

Durante la realización de las pruebas, se prestó especial atención a la progresión del *spalling*, así como a la propagación de grietas en los pilares, incluyendo todos estos datos en un registro. Además, después de estar expuestos a elevadas temperaturas, se efectuaron una serie de análisis para conocer la naturaleza y magnitud del *spalling*, así como el estado de las armaduras. El alcance del *spalling* es diferente para cada tipo de pilar, ya que depende de varios factores.

En los siguientes apartados se muestran los resultados de dos ensayos estudiados por Kodur con ayuda de otros investigadores como Cheng, Wang, McGrath... donde se compara y se ilustra el comportamiento tanto de un pilar de hormigón convencional y otro de hormigón de alta resistencia cuando son sometidos a elevadas temperaturas. [3,12,13,16]

Comportamiento de los pilares de HAR

Los siguientes gráficos muestran los resultados de resistencia frente al fuego obtenidos para un hormigón convencional y un hormigón de alta resistencia. Excepto por la resistencia del hormigón, los pilares de HC y de HAR tenían características parecidas y fueron sometidos a niveles de carga proporcionales. Los pilares tenían sección cuadrada (305 mm x 305 mm) y una longitud de 3.810 mm; a 28 días dieron una resistencia de 34 MPa y 83 Mpa respectivamente. También se puede apreciar las variaciones de temperatura en la sección del pilar, tanto en el HC como en el HAR, en función del tiempo de exposición. Dichas temperaturas, medidas durante los ensayos al fuego, se muestran para distintas profundidades a lo largo de la línea central y a mitad de la altura del pilar. En el gráfico se aprecia que las temperaturas en el hormigón convencional son generalmente más bajas que los niveles correspondientes

al hormigón de alta resistencia cuando son expuestos a elevadas temperaturas. Esta variación es debido a las diferencias que presentan ambos hormigones entre sus propiedades mecánicas y térmicas, así como a la alta compactidad (baja porosidad) que caracteriza al HAR. La baja porosidad en este tipo de hormigones afecta a la velocidad de incremento de la temperatura, aumentándola, hasta que se generan grietas, o comienza el proceso de *spalling*. Tras tres horas de exposición al fuego, se producen importantes grietas en los hormigones de alta resistencia.

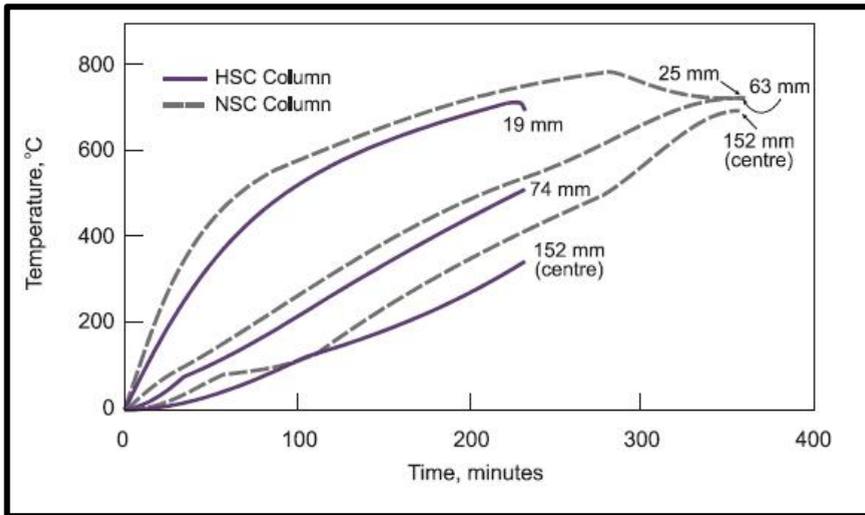


Fig. 6.1 Distribución de la temperatura a varias profundidades de un pilar de hormigón resistencia normal (NSC) y de un hormigón de alta resistencia (HSC)

En el gráfico 6.2 se comparan las variaciones de las deformaciones axiales tanto para el HC, así como para el HAR. Se aprecia que el comportamiento del hormigón de alta resistencia es diferente respecto al hormigón convencional. Las deformaciones iniciales de los pilares se deben principalmente a la expansión térmica del acero y el hormigón; en hormigones con mayores resistencias a compresión, dicha deformación es más leve debido a:

- Menor expansión que presenta el HAR.

- Un aumento más lento de la temperatura en las etapas iniciales causado por el elevado grado de compacidad que presentan estos hormigones.

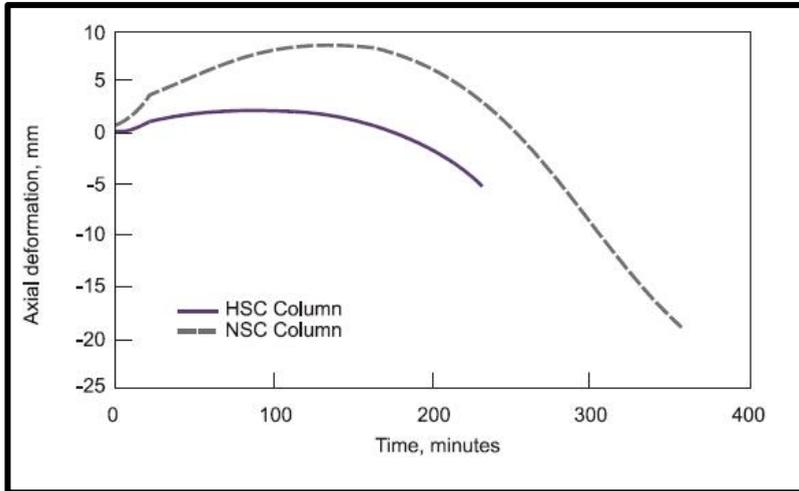


Fig. 6.2 Deformación axial de los pilares de NSC y HSC

Cuando las armaduras llegan a su estado límite a causa de las elevadas temperaturas, los pilares empiezan a sufrir procesos de retracciones, además de un incremento de carga progresivo. Por otro lado, la resistencia del hormigón también disminuye con el paso del tiempo y el aumento de temperatura, hasta que el pilar no puede soportar más carga, y colapsa. En esta etapa, el comportamiento del pilar depende de la resistencia del hormigón, ya que las armaduras ya no cumplen su función por la temperatura alcanzada. Los pilares elaborados con hormigón convencional se ven sometidos a retracciones significativas que conducen a una rotura dúctil de los mismos. En cambio, los fabricados a partir de hormigón de alta resistencia no presentan tantas retracciones; esto se puede atribuir al hecho de que este tipo de hormigones se vuelven quebradizos cuando son sometidos a elevadas temperaturas, y a que la tensión soportada ante cualquier tipo de esfuerzo es menor que la alcanzada para HC, dándose especialmente en la parte descendente de la curva tensión-deformación del HAR a altas temperaturas.

Al observar ambos hormigones durante y después de las pruebas de resistencia al fuego, se apreció que no hubo desprendimiento en el pilar fabricado con hormigón de resistencia normal, mientras que en las esquinas del pilar de HAR sí que se apreció este fenómeno, hasta llegar al colapso del mismo. El *spalling*, el cual genera una pérdida de la masa de hormigón durante un incendio, expone a las capas más profundas de hormigón a temperaturas de elevadas, lo que aumenta la tasa de transmisión de calor a las capas internas de la estructura, incluyendo las armaduras. Dichos elementos de refuerzo fueron totalmente expuestos al fuego durante las últimas etapas del ensayo en el pilar de HAR. Este desprendimiento se debe a la baja permeabilidad que presenta este material, hecho que ya ha sido observado en estudios previos de los elementos estructurales de HAR bajo condiciones reales de fuego realizados por Kodur, Phan, Danielsen, Diederichs... La Figura 6.3 ilustra el *spalling* existente en pilares de ambos tipos de hormigones después de las pruebas de resistencia al fuego, siendo mayor en el pilar de mayor resistencia. Sin embargo, cabe señalar que éste no fue significativo en el pilar de HAR, debido principalmente a una mejor configuración del estribo (explicado con más detalle en el siguiente apartado) que ayuda a minimizar el efecto del *spalling* (Kodur, McGrath).

En estas pruebas, el tiempo para llegar al colapso es definido por la resistencia al fuego del pilar. En el pilar de HC, la resistencia al fuego es de aproximadamente 366 minutos, mientras que, para el pilar de HAR, es aproximadamente 225 minutos. La disminución de la resistencia al fuego del segundo, en comparación con el primero, se puede atribuir a la degradación más rápida de las propiedades térmicas y mecánicas del hormigón de alta resistencia, debido a su menor porosidad.

Estudios experimentales

Los principales objetivos de los estudios experimentales fueron generar datos de resistencia al fuego para un uso inmediato en la industria de la construcción, y proporcionar información para el desarrollo de métodos generales para el cálculo de la resistencia al fuego de columnas HAR. Autores como Kodur, Wang, Cheng y Sultan han desarrollado modelos matemáticos para predecir el comportamiento del fuego en pilares de este material

Los modelos pueden tener en cuenta la influencia de los diferentes parámetros que determinen el comportamiento frente al fuego en pilares de hormigón de alta resistencia y puedan rastrear la respuesta de éstos desde el inicio del ensayo hasta su colapso. La validez del modelo se ha establecido mediante la comparación de resultado de numerosos ensayos. El modelo está siendo utilizado para llevar a cabo estudios paramétricos para generar datos sobre la resistencia al fuego de pilares de HAR. Los resultados de los estudios preliminares indican que la resistencia al fuego y el grado de desprendimiento en este tipo de elementos varía en función de un número de parámetros, incluyendo su tamaño, la resistencia del hormigón, la intensidad de la carga, la configuración del estribo, tipo de árido y de la intensidad del fuego.



Fig. 6.3 Comparación entre el spalling de un pilar de HAR (izq.) y un pilar de HC (dcha.)

Factores que influyen en el comportamiento frente al fuego.

Los resultados extraídos de las investigaciones realizadas por el n muestran que el comportamiento al fuego del hormigón de alta resistencia, en general, y el *spalling* en particular, es bastante complejo y depende de varios factores, como ya se ha mencionado con anterioridad. En base a los análisis del modelo de predicción, los datos obtenidos en las pruebas y las observaciones realizadas durante y después de los ensayos, se confeccionó una lista sobre los factores que influyen en el comportamiento frente al fuego de los pilares de HAR.

Resistencia del hormigón

Los resultados de las pruebas realizadas muestran la alta resistencia al fuego (tres horas o más) que se puede obtener de los pilares de HAR, incluso cuando son sometidos a su límite de carga. Sin embargo, si se comparan con los obtenidos para pilares de HC, muestran un peor comportamiento. De este modo, los elementos estructurales realizados con hormigón de alta resistencia deben ser reforzados con niveles más estrictos, si se quieren conseguir los mismos resultados para ambos pilares. Las imágenes de la Fig. 6.3 muestran el grado de *spalling* sufrido por dos pilares tras ser sometidos a la acción del fuego, apreciándose que es mucho más significativo en aquel elaborado con hormigón de alta resistencia.

Si bien es difícil especificar el rango de resistencia exacta, basándose en la información disponible dedujeron, que aquellos hormigones con resistencias superiores a 70 MPa son más susceptibles al *spalling* y muestran peores resultados en ensayos frente al fuego.

Contenido de humedad.

El contenido de humedad en el hormigón, expresado en términos de humedad relativa (HR), influye en el grado de *spalling*. Niveles muy altos de HR conducen a una mayor degradación en los hormigones cuando son expuestos al fuego. Los ensayos realizados en pilares de HAR, aplicándoles la carga respectiva, muestran que aquellos con una humedad relativa superior al 80% sufren un *spalling* más significativo. El tiempo necesario para alcanzar un nivel aceptable de HR (inferior al

75%) en los elementos estructurales de HAR es mayor que el requerido para los elementos estructurales de HC porque los primeros presentan una permeabilidad menor. En algunos casos, como en estructuras *offshore*, el nivel de humedad relativa puede permanecer elevado a lo largo de su vida útil y debe ser tenido en cuenta a la hora del diseño.

Densidad del hormigón

El efecto de la densidad del hormigón fue estudiado por Kodur mediante ensayos frente al fuego de bloques de HAR con densidades diferentes:

- Densidad normal (confeccionado con áridos de densidad normal).
- Densidad ligera (confeccionado con áridos ligeros).

El *spalling* afectó mucho más a aquellas probetas con una densidad menor, donde se utilizaron áridos ligeros. Esto es debido principalmente al que este tipo de árido contiene más humedad libre, lo que crea mayor presión de vapor en la exposición al fuego.

Intensidad del fuego

Danielsen, Bilodeau, Malhotra y Hoff han demostrado que el *spalling* en hormigones de alta resistencia es mucho más severo en caso de incendios donde exista una gran intensidad de calor, o se produzcan incrementos de temperatura elevados y rápidos. Teniendo en cuenta estos dos factores, es deducible que los incendios de hidrocarburos representen una gran amenaza a este respecto. De hecho, cuando se utiliza HAR en instalaciones donde estos compuestos están presentes, como industrias petrolíferas marinas y túneles en autopistas, se debe tener en cuenta a la hora de diseñar la dosificación del hormigón.

Dimensiones de los elementos

Toda la bibliografía consultada coincide en que el riesgo de que se produzca el fenómeno de *spalling* aumenta proporcionalmente con el tamaño de la pieza. Esto se debe al hecho de que el tamaño de la muestra está directamente relacionado con el transporte de humedad y calor que se genera a través de la estructura, así como al hecho de que grandes estructuras almacenan más energía y soportan mayores cargas. Por lo tanto, hay que tener especial consideración con el tamaño de la

probeta cuando sean evaluados frente a la acción del fuego, ya que se suelen ser de una escala menor a la real, lo cual puede dar resultados ficticios. Sin embargo cuando se incorporan medidas para mitigar el spalling (se explica en el siguiente apartado), el riesgo de que se produzca disminuye y además aumenta la resistencia al fuego conforme aumenta la dimensión de la pieza.

Refuerzos laterales.



Fig. 6.4 Disposición convencional de los estribos (izq.) y disposición modificada (dcha.) para pilares de hormigón armado

Los estudios realizados por Ali, Nadjai, Glackin y Silcock sobre resistencia al fuego muestran claramente que el cálculo de estribos y el sistema de encofrado de los pilares tienen una gran influencia en el comportamiento de los pilares de hormigón de alta resistencia. Se puede aumentar la resistencia al fuego de esta clase de hormigones mejorando la configuración de estribos (colocando los lazos de los estribos a 135° del centro del pilar e incrementando el refuerzo lateral) y reduciendo el espacio entre ellos (a 0,75 veces el espacio necesario para hormigones convencionales). Se puede apreciar en la siguiente imagen la disposición modificada que se utilizó en los pilares de hormigón de alta resistencia, mejorando alguna de sus propiedades:

- Resistencia al fuego.
- Reduce el daño generado por el *spalling*.

Además para demostrar esta teoría, se incluyen las fotografías de dos pilares de HAR, cada uno de ellos con un tipo diferente de distribución de estribos, después de haber sido expuestos a la acción del fuego. El comportamiento fue mejor en aquellos pilares donde se utilizó la

disposición modificada de los estribos. Si se comparan ambas fotografías, se puede apreciar que el pilar donde se distribuyeron los estribos convencionalmente perdió parte de la sección al ser sometidas a carga, sin embargo, el otro caso muestra la típica apariencia de pirámide presente en los típicos ensayos a compresión.



Fig. 6.5 Pilar de HAR con una disposición normal de estribos (izq.) y otro con una disposición modificada (dcha.)

Refuerzos con fibras

Los estudios realizados por Kodur, Hertz Bilodeau, Malhotra y Hoff muestran que la adición de fibras de polipropileno minimiza las consecuencias generadas por el *spalling* en pilares de hormigón de alta resistencia que han sido sometidos a elevadas temperaturas. Una de las teorías más aceptadas sobre este tema es que debido a la fusión de las fibras (se funde aproximadamente a una temperatura de 170°C) se crean caminos por donde puede escapar la presión producida por el vapor, evitando de este modo las “explosiones” que ocasiona dicho

fenómeno. La cantidad de fibra necesaria para minimizar el *spalling* es de aproximadamente 0,1 a 0,15% del volumen. La combinación con fibras de acero aumenta la resistencia a tracción reduciendo los desprendimientos del material.

Tipo e intensidad de carga.

El tipo de carga aplicada así como su intensidad, tienen una influencia significativa en el *spalling* y en el comportamiento al fuego del elemento estructural afectado. La resistencia al fuego de un pilar aumenta si se reduce dicha carga, y viceversa, por lo que una pérdida de resistencia con un aumento de temperatura afectará más al HAR que al HC (el hormigón de alta resistencia soporta cargas superiores al convencional). En consecuencia, un pilar de HAR en carga es más susceptible que sufra los efectos del *spalling* que otro que no sea sometido a ninguna, sobre todo en aquellos con una disposición de estribos típica y en los que la carga aplicada supera a la carga de servicio. Todo esto ocurre porque a la carga soportada por el miembro estructural se le debe añadir la generada por la presión producida por el vapor. Además, si la carga está aplicada con cierta excentricidad provocará tensiones de tracción adicionales.

Tipo de árido

Comparando los dos tipos de áridos más utilizados en la elaboración del hormigón, autores como Kodur, Cheng, Wang, McGrath... demostraron que los áridos de origen calizo proporcionan mayor resistencia al fuego y al *spalling* que aquellos de origen silíceo. Esto es debido a que el calor específico de los áridos calizos es sustancialmente mayor, siendo beneficioso para prevenir el *spalling*. Este aumento del calor específico probablemente es causado por la disociación de la dolomita en la mezcla. En general, la resistencia al fuego de los pilares de hormigón de alta resistencia confeccionados con áridos calizos es un 10% mayor que si se hubieran utilizado áridos silíceos

Directrices para mejorar la resistencia al fuego.

El hormigón de alta resistencia es un material de alto rendimiento que ofrece una serie de ventajas. En los últimos años, se han realizado importantes investigaciones para estudiar el comportamiento al fuego de los pilares de hormigón de alta resistencia y cuantificar los factores que

influyen en el *spalling* y en la resistencia a elevadas temperaturas. Sin embargo, hasta la fecha no existían ningún tipo de código y/o normas para diseñar la resistencia al fuego de los elementos estructurales del hormigón de alta resistencia.

Adoptando las apropiadas medidas, el *spalling* en los hormigones de alta resistencia puede minimizarse así como mejorar la resistencia a elevadas temperaturas, incluso para resistencias de hasta 110 MPa. Basándose en los estudios realizados por el NRCC y otras fuentes (Danielsen, Bilodeau, Malhotra, Hoff y Hertz) se detallaron una serie de recomendaciones para mejorar la resistencia al fuego.

- El tamaño de los elementos estructurales influyen en la resistencia frente al fuego y las disposiciones en las normas vigentes especifican las dimensiones mínimas de la sección transversal de los pilares de HC. Las dimensiones mínimas recomendadas para conseguir cierta resistencia al fuego en los pilares de HAR (ya sean cuadrados o circulares) son:

Una hora	30 cm
Una hora – Una hora y media	35 cm
Dos horas	40 cm
3 horas o más	45 cm

Estas dimensiones son relativamente mayores a las requeridas para pilares elaborados con hormigón convencional.

- La resistencia al fuego y el efecto del *spalling* están influenciados por la disposición de estribos utilizada en el pilar. La distribución de estribos “doblados” (formando un ángulo de 135° con respecto al núcleo del elemento) ayuda a minimizar el *spalling* y mejorar la resistencia al fuego.
- La adición de fibras de polipropileno (entre un 0,1 - 0,15% en volumen) a la mezcla reduce la degradación generada por el *spalling*.
- La adición de fibras de acero aumenta la resistencia a tracción y reduce también los efectos del *spalling*.

- El uso de áridos de origen calizo, en lugar de áridos silíceos, reduce el *spalling* y aumenta la resistencia a elevadas temperaturas.
- El *spalling* en HAR es mucho más severo en incendios donde exista una gran intensidad de calor, o se produzcan incrementos de temperatura elevados y rápidos, como incendios de hidrocarburos. En estas situaciones es muy recomendable utilizar fibras de polipropileno.
- Utilización del suficiente recubrimiento mínimo del hormigón sobre la armadura como se especifica en la norma.

Capítulo 7. Evolución de la microestructura del hormigón de alta resistencia frente al fuego

Introducción

Anteriormente se ha comentado y verificado que el fuego es considerado como uno de los riesgos potenciales más serios en la mayor parte de los edificios y estructuras. La amplia difusión del uso del hormigón como material estructural durante las últimas décadas, ha llevado a la necesidad de averiguar con profundidad el efecto del fuego en los hormigones.

El hormigón, en comparación con el resto de materiales de construcción (acero, madera...), presenta un mejor comportamiento y una mayor resistencia frente al fuego. Sin embargo, la creciente utilización de los hormigones de alta resistencia ha planteado nuevas dudas acerca de su comportamiento en ambientes de elevada temperatura.

El hecho de que un hormigón permanezca expuesto durante un tiempo suficientemente prolongado a elevadas temperaturas genera una importante pérdida de su resistencia mecánica; en aquellos hormigones que no están convenientemente protegidos bajan bruscamente al alcanzar temperaturas superiores a los 300 °C. Estos cambios se deben a las transformaciones microestructurales originadas en la pasta y en los áridos y a las expansiones producidas debido a los cambios térmicos.

La mayor parte de los estudios realizados por autores como Bazant, Kaplan, Fu, Chung y Malhotra sobre el comportamiento del hormigón a elevadas temperaturas se han centrado en conocer las alteraciones sobre sus propiedades mecánicas (resistencia a compresión, límite elástico, fluencia...). Otros, se han centrado en averiguar los cambios producidos en sus propiedades físicas (conductividad térmica, expansión, porosidad...). En cambio, son más escasas las referencias en relación a los cambios químicos que se producen en los propios componentes del hormigón (Pasta) o el estudio simultáneo de las alteraciones físico-químicas de los materiales, que puedan ayudar a entender los cambios producidos en las propiedades mecánicas.

Aunque existen numerosas investigaciones acerca de la resistencia al fuego de los hormigones tradicionales, en el caso de los hormigones de alta resistencia el conocimiento es bastante menor, ya que es un material más novedoso y de menor aplicación. En este tipo de hormigones preocupa su elevado riesgo de sufrir explosiones (spalling), debido a la elevada densidad de los mismos, que dificulta su capacidad para evacuar el vapor generado por el calentamiento, el cual se acumula en su interior produciendo elevadas presiones.

En el siguiente apartado se desarrollará una investigación realizada por el Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (CSIC), el cual se centra en estudiar las transformaciones microestructurales que tienen lugar en hormigones de alta resistencia al exponerlos a la acción del fuego a partir de cambios que tienen lugar en su estructura porosa, la permeabilidad a gases o la pérdida de masa.

Metodología Experimental

Materiales

Se ensayaron siete tipos diferentes de hormigones de alta resistencia, algunos de ellos con resistencias superiores a 100 MPa, empleando para su confección cemento Pórtland tipo I. La composición de los hormigones está recopilada en la siguiente tabla, además se incluyen los contenidos de cemento adicionales utilizados para cada clase de hormigón.

Se puede apreciar en la tabla que al hormigón C60 SF se le ha incorporado una adición de humo de sílice y ceniza volante (15%), además de añadirle un agente aireante. El C90 solamente lleva la adición de humo de sílice (9%). Los tres últimos tipos de hormigones, que corresponden a los que mayor resistencia a compresión obtuvieron, tienen en su composición tanto humo de sílice como fibras metálicas. El RPC AF y el RPC tienen la misma composición, variando únicamente que el primero de ellos también posee fibras de polipropileno.

Hormigón	Cemento (kg/m ³)	Adición (%)	Tipo de árido	Tamaño máx. del árido (mm)	Relación a/c	Aireante
C 60	450	-	Calcáreo	20	0.36	No
C 60 SF	367	10% Cenizas Volantes + 5% Humo de Sílice	Granito	16	0.354	Si
C 70	490	-	Silíceo	16	0.32	No
C 90	561	9% Humo de Sílice	Silíceo	16	0.29	No
CRC	940	Humo de Sílice	Cuarzo	4 + fibras metálicas	0.16	No
RPC AF	> 700	Humo de Sílice	Cuarzo	0.25 + fibras metálicas y polipropileno	< 0.2	No
RPC	> 700	Humo de Sílice	Cuarzo	0.25 + fibras metálicas	< 0.2	No

Tabla 7.1 Composición de los hormigones ensayados

Los diferentes tipos de hormigones se ensayaron a partir de discos de hormigón de dimensiones 110 x 50 mm obtenidos a partir de cortar las probetas realizadas con anterioridad de 110 x 200 mm.

Calentamiento de las probetas.

El proceso de calentamiento de las probetas se desarrolló en varias etapas, siguiendo las recomendaciones Rilem 129-MHT:

- Proceso de calentamiento: incremento de la temperatura a 2°C por minuto hasta alcanzar la temperatura de ensayo.
- Una hora de reposo a la temperatura de ensayo.
- Proceso de enfriamiento: a una velocidad inferior a 2°C por minuto, hasta temperatura ambiente.

La exposición de los hormigones a altas temperaturas se realizó tanto en probetas donde no se aplicó ninguna carga, así como en aquellas donde se aplicó un 20% de la resistencia a compresión de cada hormigón.

Las temperaturas de ensayo fueron las siguientes:

- 20°C (temperatura ambiente).
- 200-700°C, en intervalos de 100°C, para así conocer el comportamiento progresivo del hormigón cuando está expuesto al fuego.

También se realizó un seguimiento de la pérdida de peso del material, a 105°C, a esta temperatura se registró la evolución de la pérdida de masa hasta alcanzar el equilibrio para cada hormigón o que la pérdida de peso fuera inferior al 0,01% en peso del hormigón.

Técnicas de caracterización de la microestructura

Los ensayos de caracterización microestructural de los hormigones se llevaron a cabo en dos niveles diferentes.

- Sobre probetas que no habían sido expuestas al calor, tomándose los valores encontrados como los de referencia para cada tipo de hormigón.

- En probetas expuestas a la acción del fuego, a cada temperatura de ensayo, una vez retornadas a la temperatura ambiente, por lo que los resultados obtenidos se consideran residuales.

Los ensayos realizados en esta investigación fueron los que se describen a continuación:

- *Ensayos de permeabilidad al aire*, para los que emplearon el equipo y el método Cembureau.
- *Porosimetra y distribución de tamaño de poro*. Los ensayos se realizaron utilizando porosimetría de adsorción de nitrógeno y mercurio.
- *Microscopía*: de barrido electrónico y de neutrones retrodispersados.
- *Balances de pérdida de masa*:
 - Termo-gravimetría.
 - Calentando a 105°C hasta alcanzar el equilibrio.
 - Pérdida de peso después de calentar a cada temperatura de ensayo.
- *Cambios en la composición química*, seguidos mediante difracción de rayos X, DRX.

Tanto los ensayos de permeabilidad, así como los de porosimetría de mercurio fueron efectuados por triplicado en muestras procedentes de tres probetas diferentes, con el objetivo de conocer la desviación para estos parámetros.

En dicho trabajo se consideraron solamente los cambios microestructurales relativos a la permeabilidad, porosimetría de mercurio y balance de pérdida de masa en probetas calentadas a 0% de carga. Los ensayos empleando microscopía electrónica han servido además para

confirmar los cambios observados por otras técnicas e interpretar los mecanismos de transformación.

Resultados

Evolución de la porosidad de los hormigones de alta resistencia por la acción de la temperatura.

La porosidad inicial de los hormigones ensayados en esta investigación varía en función de la densidad de cada uno, la cual suele ser proporcional a su resistencia; es decir, los hormigones que presenten una mayor resistencia, tendrán una porosidad inferior. En el siguiente gráfico se ha representado la porosidad para distintos rangos de poros.

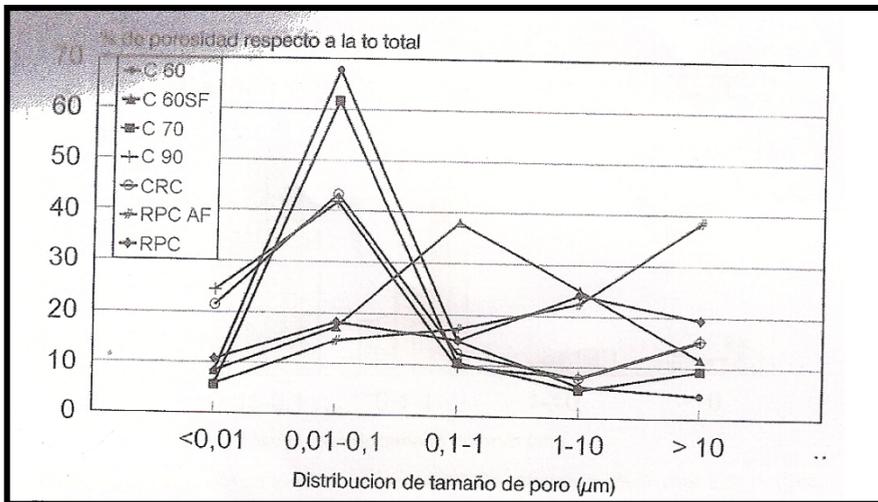


Fig. 7.1 Distribución de tamaño de poro en los hormigones ensayados, antes del calentamiento

Observando este gráfico destaca que los hormigones de alta resistencia C60 y C70 tienen la mayor parte de su porosidad acumulada en el rango entre 0.01 a 0.1 μm . Igualmente ocurre con el C90 y CRC pero la cantidad de los poros es bastante menor. El C60 SF distribuye su porosidad entre 0.01 y 0.1 μm . En cambio, la porosidad capilar de los RPC es prácticamente despreciable; los poros capilares son importantes ya que facilitan la conectividad en la matriz del hormigón.

Los cambios en la porosidad generados por el calentamiento de los hormigones se pueden apreciar en la siguiente imagen, que muestra los valores medios de la porosidad total en función de la temperatura de exposición, donde se detecta aumentos de este parámetro cuanto mayor es el calor. La porosidad llega a duplicarse cuando la temperatura de exposición del hormigón ha superado los 600°C.

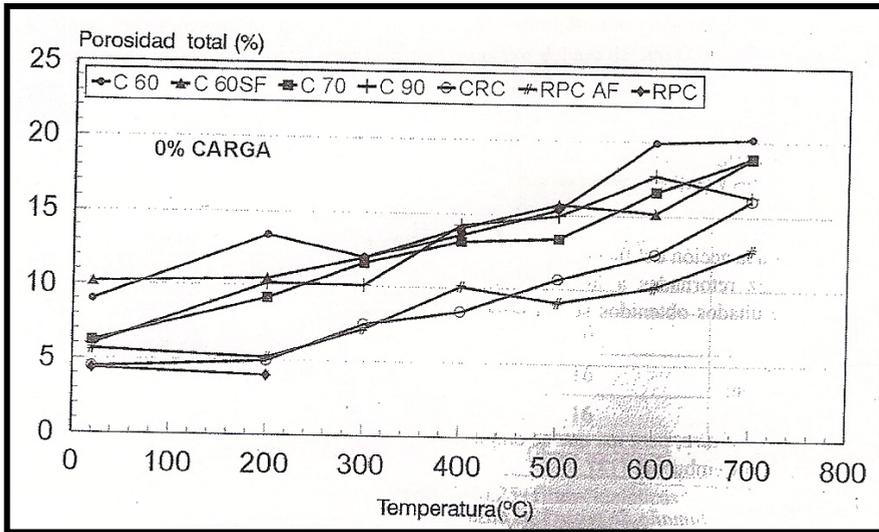


Fig. 7.2 Valores medios de la porosidad total (%). Evolución con la temperatura. De calentamiento a 0% de carga a compresión de los hormigones.

El aumento del número de poros causado por la exposición de los hormigones de alta resistencia a elevadas temperaturas, lleva asociado también cambios en la distribución de su tamaño. Podemos apreciar que en todos los hormigones se produce una disminución del número de poros inferiores a $0.01 \mu\text{m}$ al aumentar la temperatura. De manera simultánea también aumenta el número de poros entre 0.01 y $0.1 \mu\text{m}$. En cambio, el aumento de la porosidad en esta área no es constante, y partir de 300 o 400°C, desciende la concentración de poros, debido a que se origina un aumento de la porosidad en rangos de poro de mayor tamaño. Los tamaños de poros $> 0.1 \mu\text{m}$ aumentan proporcionalmente con la temperatura de exposición. En el siguiente gráfico se pueden observar los cambios producidos en la porosidad del hormigón de alta resistencia C70.

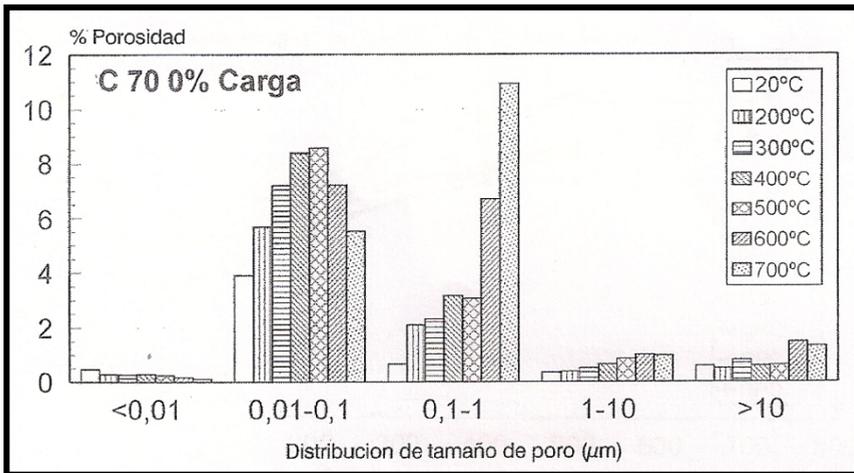


Fig. 7.3 Cambios en la distribución del tamaño de poro para HAR C70 calentado al 0% de carga a compresión

Cambios inducidos por el calentamiento en la permeabilidad de los hormigones.

Las modificaciones microestructurales generadas en los hormigones de alta resistencia cuando son sometidos a elevadas temperaturas, también se detectan por los cambios originados en el ensayo de permeabilidad al aire. Como se aprecia en los siguientes gráficos, el flujo de aire aumenta a medida que lo hace la temperatura de exposición, donde se comparan el hormigón C60 con el CRC, teniendo este último una mayor resistencia a compresión. La temperatura de ensayo a 300°C aparece como crítica para el flujo de aire medido en ambos tipos de hormigones, aunque al principio el flujo era muy distinto entre ellos:

- $k_{C60} = 45.6 \cdot 10^{-18} \pm 4.7 \text{ m}^2$.
- $K_{CRC} = 2.18 \cdot 10^{-18} \pm 0.6 \text{ m}^2$.

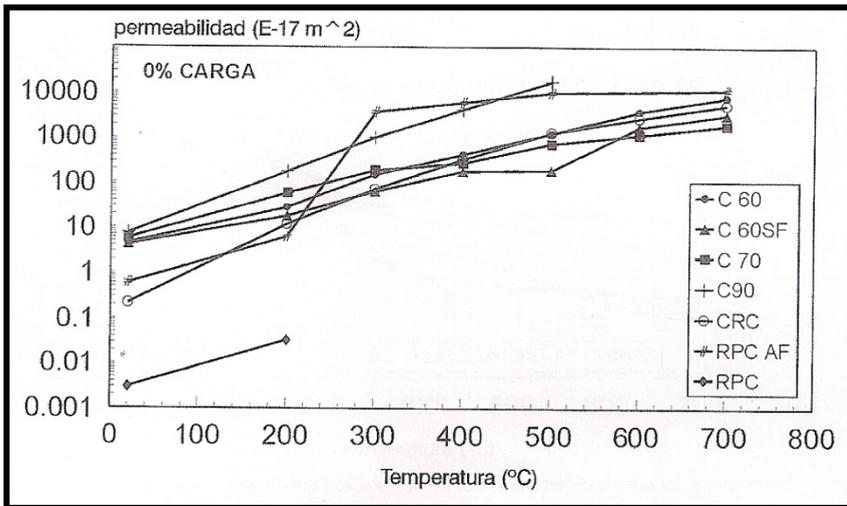


Fig. 7.4 Coeficientes de permeabilidad media, k , en función de la temperatura

En el gráfico anterior (Fig. 7.4), se incluyen todos los resultados de los coeficientes de permeabilidad k obtenidos para cada tipo de hormigón de alta resistencia en función de la temperatura de exposición. Se detectó un aumento del coeficiente de permeabilidad conforme aumenta el calor relacionado con el nivel de degradación del material. El aumento de la permeabilidad varía en función tipo de hormigón, pero a partir de 300°C similar para cada uno de ellos, excepto para el C90 que es más elevado y para el RPC AF que a partir de 200°C aumenta drásticamente.

Pérdidas de masa en los hormigones por la acción del calor.

Cuando se somete cualquier tipo de hormigón a una temperatura superior a la temperatura ambiente se producen unas pérdidas de peso en el material, causado por las transformaciones químicas que ocurren en los componentes del hormigón por el efecto del calor. Las pérdidas de peso ocurridas a 105°C están asociadas con la evaporación del agua libre o absorbida en las paredes de los poros del hormigón. El proceso de pérdida de peso para cada hormigón depende generalmente del tipo de material y en particular de su porosidad. En el siguiente gráfico se representan los cambios de peso que se han originado, hasta que alcanzasen la estabilidad, en cada tipo de hormigón tras ser expuestos a elevadas temperaturas. Se puede apreciar que en aquellos hormigones con mayor resistencia la eliminación de agua ha sido más lenta.

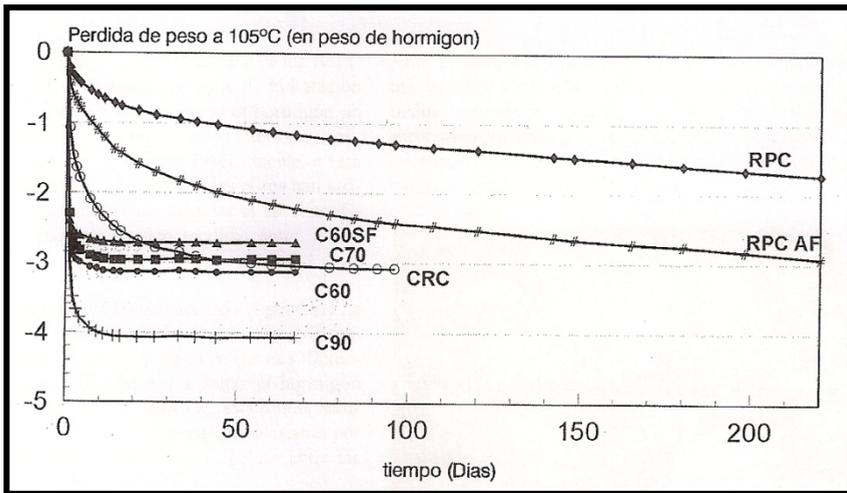


Fig. 7.5 % de evolución de pérdida de peso a 105°C. Contenido en agua libre

El registro llevado a cabo sobre las pérdidas de peso en los hormigones, siguiendo el régimen de calentamiento explicado en la fase experimental, permite definir los cambios contemplados en este parámetro a cada temperatura de ensayo; en la siguiente imagen se representan las pérdidas de peso medidas para cada tipo de hormigón de alta resistencia. Las mayores pérdidas se producen a temperaturas inferiores a 300°C.

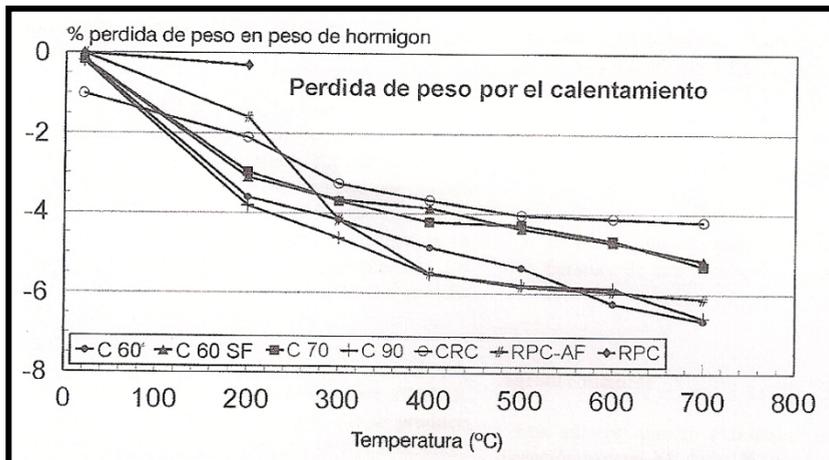


Fig. 7.6 Pérdidas de peso registradas en los hormigones tras la exposición a elevadas temperaturas.

Procesos de transformación de los hormigones a elevadas temperaturas

Cuando un hormigón está expuesto a temperaturas superiores a las del ambiente, se producen una serie de cambios en la microestructura de sus componentes, tanto químicos como físicos, que varían en función de la temperatura de exposición y del tipo de material. Las transformaciones que ocurren en un hormigón tienen lugar en varias fases.

- *Etapa 1: Temperatura ambiente – 100°C.* Las primeras variaciones detectadas son las pérdidas de agua líquida en equilibrio con el vapor de agua en los poros. Al subir la temperatura hasta los 100°C, todo el agua pasa a la fase vapor y debe ser liberada discurriendo a través de los poros hacia el exterior. La estructura porosa del hormigón es crítica en esta primera etapa, ya que debe favorecer la evacuación de gases con el fin de evitar la acumulación de tensiones de vapor en el interior del mismo. Esta capacidad de liberación de vapor de agua varía según el tipo de hormigón que se encuentre expuesto al fuego, los hormigones tradicionales liberan más fácilmente la humedad que los hormigones de alta resistencia. Se han dado casos de estos últimos que han estado expuestos a temperaturas de 200 °C y aún no han liberado todo el agua libre inicialmente en los poros, traduciéndose en una acumulación de presiones en el interior del hormigón; esto se debe a que su estructura porosa es más baja que la de los hormigones tradicionales.
- *Etapa 2: 100 – 300 °C.* Esta etapa se caracteriza por un aumento notable de la estructura porosa y de la permeabilidad de los hormigones, como consecuencia de las transformaciones ocurridas en las fases sólidas, y en particular en el gel CSH que empieza a descomponerse por encima de los 100 °C. El gel pierde las moléculas de agua de hidratación liberando nuevamente vapor de agua, que si el hormigón no puede eliminar con facilidad, se acumulará en su interior aumentando la presión de vapor en los poros. Precisamente, a esta acumulación de presiones en el interior de los poros han atribuido algunos investigadores las disminuciones en el coeficiente de permeabilidad que pueden medirse entre 100 y 200°C.

A temperaturas entre 200 y 300 °C la gran mayoría del gel CSH ha perdido parte de sus moléculas de hidratación y su estructura rígida comienza a debilitarse. Generalmente en hormigones de alta resistencia, si la presión de gas es suficientemente elevada puede llegar incluso a “saltar” el hormigón (riesgo de explosión) o iniciar la fisuración, esta última es causada por las expansiones de los materiales provocadas por los cambio térmicos, entre pasta, áridos incluso entre las fibras, si las hay.

- *Etapa 3: 300 - 600 °C.* En esta etapa la degradación de la pasta debido a la deshidratación es ya muy elevada y las fisuraciones empiezan a convertirse en masivas tanto entre los anhdros y en la pasta propia, extendiéndose incluso a través de los áridos. Precisamente a estas microfisuraciones son atribuibles los cambios en la microporosidad. A partir de 600 °C la estructura del hormigón ya está muy degradada.

Comportamiento de los hormigones de alta resistencia frente al fuego

La resistencia de los hormigones de alta resistencia frente al fuego es variable y está íntimamente ligada a la composición y microestructura de cada tipo de hormigón. Efectivamente, su elevada compacidad hace a estos tipos de hormigones menos resistentes ya que pueden acumularse suficientes tensiones de vapor de agua en su interior que facilitan la microfisuración, por lo que podemos deducir que cuanto mayor sea la resistencia del hormigón, su resistencia frente al fuego será menor.

El mecanismo de degradación por el que transcurre el proceso no parece ser el mismo para hormigones tradicionales que para hormigones de alta resistencia, de hecho no siempre que se produce una pérdida de masa en estos últimos por el calentamiento, lleva asociado un aumento proporcional de la porosidad, aunque si se microfisuran. Precisamente, para solucionar este impedimento se pueden emplear fibras de polipropileno, que se funden a una temperatura intermedia entre 100 y 200 °C (160 °C). En cambio, el aumento de la porosidad no se produce una vez que las fibras se funden, sino que ocurre a temperaturas superiores, aproximadamente 300 °C, cuando la fibra se halla totalmente

descompuesta. Parte de la pérdida de masa que se observa entre estos intervalos de temperatura se debe a la descomposición de la fibra.

Un aspecto que se debe considerar sobre el comportamiento de los hormigones de alta resistencia es la elevada cantidad de anhídros, cemento no hidratado, que pueden llegar a acumular. Las interfaces entre los granos de cemento anhídrico u otros componentes parcialmente hidratados, como las adiciones (humo de sílice y cenizas volantes), así como las interfaces con los áridos son zonas que precisan menor energía (calor) para iniciar la deshidratación, son por tanto puntos más débiles donde suele comenzar el proceso de microfisuración. De este modo, podemos afirmar que el tipo y tamaño de áridos, así como la composición y tamaño de grano de cemento tienen gran influencia en la resistencia al fuego de estos hormigones.

Por otro lado, el empleo de fibras metálicas en los hormigones de alta resistencia ayuda a que éstos aguanten temperaturas de exposición más elevadas evitando la disgregación del material, aunque aumente sensiblemente la microfisuración, al menos hasta 500 °C, temperatura a la que se oxidan las fibras. Las pequeñas dimensiones de las fibras no alteran significativamente las transmisiones de calor en estos hormigones.

Conclusiones

Durante estas décadas se han realizado ensayos donde se ha estudiado la evolución de la microestructura de los hormigones de alta resistencia a elevadas temperaturas, los cuales han permitido obtener las siguientes conclusiones:

- Un hormigón cualquiera sufre más deterioro frente al fuego cuanto menor es su porosidad; de este modo, los hormigones de alta resistencia se comportan peor frente al fuego que los hormigones tradicionales.
- La exposición de los hormigones a elevadas temperaturas produce un continuo aumento de la porosidad en los hormigones de alta resistencia. En casos de hormigones de muy alta resistencia, y sólo en ocasiones, este efecto puede no apreciarse.

-
- Los poros de gel son los que primero se alteran a temperaturas superiores a 100 °C incrementando el tamaño de poros en la región de poros capilares.
 - La conectividad de los poros es un factor crítico, determinado por el tamaño de poros en la región capilar, sobre todo entre 0,01 y 1 μm .
 - La permeabilidad residual aumenta con la temperatura de exposición para los hormigones de alta resistencia.

Capítulo 8. Mejora del comportamiento del hormigón de alta resistencia a elevadas temperaturas

Mejora de la resistencia al fuego utilizando fibras de polipropileno y fibras de acero.

Podemos mencionar que la durabilidad del hormigón, en general, ha sido la clave en el comportamiento a largo plazo de las estructuras. El uso de hormigón de alta resistencia permite reducir la dimensión de los elementos estructurales requerida para soportar una determinada carga, la cual, en algunas ocasiones, puede disminuir la cantidad total de cemento y árido usados, aun considerando que el consumo de cemento de hormigones de alta resistencia tiende a ser superior que para el hormigón tradicional. Asimismo, y según Aitcin, el ciclo de vida de una estructura de hormigón de HAR aumenta debido a la mayor durabilidad intrínseca. Por estos motivos, el hormigón de alta resistencia está reemplazando paulatinamente al hormigón de resistencia normal, principalmente en estructuras expuestas a ambientes severos.

Sin embargo, algunos investigadores como Phan y Kodur han descubierto, como ya se ha comentado con anterioridad, que el HAR se comporta peor a elevadas temperaturas comparado con el hormigón tradicional, ya que cuando es expuesto al calor, el aumento de la presión interna del agua sometida a elevados grados de temperatura genera tensiones locales elevadas, lo cual puede producir una rotura explosiva (*spalling*).

Los hormigones de alta resistencia son más susceptibles al *spalling*, en gran parte debido a su baja permeabilidad. Durante la exposición al fuego, la presión producida por el vapor de agua es extremadamente elevada y no puede escapar por la matriz del hormigón de alta resistencia, a causa de su alta densidad; alcanzando, a menudo, la presión de saturación del vapor, lo que genera tensiones de tracción en el material.

Autores como Kalifa, Chéné y Gallé, afirman que el *spalling* se produce en el hormigón debido a dos procesos simultáneos. El primero de ellos, es un proceso termo-mecánico relacionado con los gradientes de dilatación térmica generados en la estructura; el segundo, es un proceso termo-hidráulico asociado con la transferencia de masa en la red porosa (aire, vapor, agua), lo cual da lugar a un aumento de la presión y del gradiente de presión en los poros. De este modo, dicho fenómeno puede considerarse como resultado de un proceso termo-hidro-mecánico. El *spalling* ocasiona que las capas más profundas del hormigón se expongan al fuego, aumentando así la temperatura de las capas internas de la estructura.

Debido a investigaciones realizadas por Kalifa, Kützing, Bonomi, Luo, Chan...se conoce que la incorporación de fibras de polipropileno a hormigones de alta resistencia es una forma de evitar el proceso de *spalling* ante la presencia de fuego. Los cambios de comportamiento se producen porque las fibras de polipropileno se funden a altas temperaturas, por lo que se crea más espacio para ser ocupado por el gas caliente y, eventualmente, un camino para que éste escape de la matriz de hormigón. A partir de esta acción se consigue reducir la presión de poros permitiendo la salida del vapor de agua, por lo que se disminuyen las tensiones internas.

Según Kitchen, a partir de 160 °C de temperatura, las fibras de polipropileno disminuyen su volumen ya están empezando a fundirse. De modo que el calor aumenta, las fibras se degradan, comenzando a arder a temperaturas cercanas a los 360 °C. En este punto ocurre una regresión de las fibras a sus materiales constitutivos y lo único que permanece de ellas es hollín, el cual ocupa aproximadamente un 5% del tamaño inicial. Los vacíos originados permiten que el vapor de agua pueda escapar, de modo que la presión de vapor se reduce evitando la rotura explosiva al menos por un tiempo.

La fusión de las fibras de polipropileno transforma el hormigón de alta resistencia en un material más poroso; de este modo, al ser expuesto a elevadas temperaturas tendrá un comportamiento más parecido al de un hormigón tradicional. Sin embargo, aunque se evite la rotura explosiva, se debe determinar la resistencia residual después de la acción

del fuego, ya que la pérdida de fibras, la creación de poros y los efectos del calor modificarán la resistencia del material. El deterioro puede llegar a ser tan intenso que se necesiten reforzar los elementos.

Kützing ha realizado más de una investigación en la que se estudia la incorporación al hormigón de una combinación de fibras polipropileno y de acero. Mediante esta mezcla, se supone que se puede evitar el comportamiento frágil del hormigón de alta resistencia, el cual ocurre sin agrietamiento previo. La mezcla de fibras aumenta la capacidad de deformación al hormigón, por lo que se consigue mejorar su comportamiento en la fisuración. La fusión de las fibras de polipropileno evita el aumento de la presión y estimula la formación de fisuras antes del fallo, mientras que la presencia de las fibras de acero previene la rotura del recubrimiento de hormigón. De esta forma, se retrasa el aumento de la temperatura en el interior del elemento estructural.

De este modo se ha investigado los factores que contribuyen a la rotura explosiva en el hormigón de alta resistencia examinándose medidas para prevenir el fallo frágil y violento, analizando los efectos de la incorporación de fibras de polipropileno y/o acero a la mezcla.

Investigación Experimental.

Existen numerosos ensayos realizados relacionado con el comportamiento del hormigón de alta resistencia, y cómo se puede mejorar. En este caso se ha llevado a cabo un programa experimental para investigar los efectos de la exposición a altas temperaturas con el fin de determinar las propiedades residuales, tanto del hormigón de resistencia tradicional, como del hormigón de alta resistencia.

En la primera fase de dicha investigación, se realizaron ensayos para conocer la resistencia a compresión de probetas, con y sin fibras de polipropileno y/o acero, sometidas a diferentes temperaturas.

Materiales

En esta investigación se utilizaron los siguientes materiales para confeccionar el hormigón:

- Cemento de alta resistencia inicial.

- Arena, con un diámetro característico de 4,8 mm, como árido fino.
- Basalto, con un diámetro característico de 19 mm, como árido grueso.
- Fibras de polipropileno de 12 mm de largo y 18 micras de espesor (contenido 3kg/m).
- Fibras de acero de 60 mm de largo y 1 mm de diámetro (contenido 45 kg/m).

Variables experimentales y proporciones de la mezcla

Las variables experimentales consideradas fueron:

- Resistencia a compresión del hormigón.
- Máxima temperatura de exposición.
- Tipo de fibra adicionada.

Los niveles adoptados se muestran en la siguiente tabla:

Variables	Niveles		
Tipo Hormigón	HRN (20 MPa)	HAR (50 MPa)	
Tª Exposición	23°C	400°C	800°C
Mezcla de Fibras	Polipropileno	Acero	Polipropileno/Acero

Tabla 8.1 Niveles de variables dependientes

La resistencia del HAR fue limitada a 50MPa para asemejarse a los requerimientos que se utilizan en proyectos corrientes para conseguir un hormigón durable. Para permitir la combinación de todas las posibles variables se realizaron seis dosificaciones de mezclas, las cuales se resumen en su tabla correspondiente (Tabla 8.2).

	HRN	HRN-FP	HAR	HAR-FP	HAR-FA	HAR-FPA
Cemento (kg/m³)	269,61	269,61	382,00	382,00	382,00	382,00
Agua (l/m³)	188,72	188,72	168,08	168,08	168,08	168,08
Árido fino (kg/m³)	911,28	911,28	725,80	725,80	725,80	725,80
Árido grueso (kg/m³)	1180,89	1180,89	1031,40	1031,40	1031,40	1031,40
Superplastificante (ml/m³)	-	-	76,40	76,40	76,40	76,40
Fibra polipropileno (kg/m³)	-	3,0	-	3,0	-	3,0
Fibra de acero (kg/m³)	-	-	-	-	45,00	45,00

Tabla 8.2 Dosificaciones de los hormigones

- HRN: Hormigón de resistencia normal.
- HRN-FP: Hormigón de resistencia normal con fibra de polipropileno.
- HAR: Hormigón de alta resistencia.
- HAR-FP: Hormigón de alta resistencia con fibra de polipropileno.
- HAR-FA: Hormigón de alta resistencia con fibra de acero.
- HAR-FPA: Hormigón de alta resistencia con fibra de polipropileno y acero.

Método de Ensayo.

Para efectuar los ensayos de compresión se usaron probetas cilíndricas de 100mm de diámetro y 200mm de altura. Todas las probetas fueron sometidas a un proceso de curado de 7 días en un ambiente controlado a 23°C y 98% de humedad relativa. Una vez finalizado dicho proceso, se almacenaron a temperatura ambiente durante 21 días, permitiendo que alcanzasen la humedad de equilibrio con el medio ambiente reduciendo, de este modo, su contenido de humedad. Si no se aplican estas medidas, las probetas serían más susceptibles que los elementos de hormigón normal al efecto destructivo del calor debido al alto contenido de humedad. A los 28 días, las probetas fueron preparadas para la exposición al calor en hornos.

Las probetas se ensayan en hornos, debido a que el control de un fuego real es una tarea compleja, además de que los patrones de temperatura son difíciles de predecir ya que existen gran cantidad de variables y su comportamiento no puede ser determinado con facilidad. Por este motivo, se utilizan hornos eléctricos para simular los efectos generados por una exposición prolongada a altas temperaturas.

Se utilizaron tres probetas de cada clase con el objetivo de mejorar el grado de confianza de los resultados obtenidos. Cada lote fue compuesto de nueve probetas representando tres combinaciones de variables. La velocidad de incremento de calor fue de 8°C por minuto, manteniendo cada lote al nivel de temperatura máxima (400° u 800°C) durante media hora. Una vez transcurrido este intervalo, el horno se apaga dejándose enfriar hasta que sea posible abrirlo. A continuación se sacan las probetas del horno y se dejan enfriar lentamente al aire hasta que alcancen la temperatura ambiente.

Después de 24 horas de exposición, tanto las probetas de control, así como las expuestas al calor fueron preparadas para los ensayos a compresión; dichos ensayos fueron realizados con una máquina de carga universal "Shimadzu" de 200 toneladas. En el proceso se aplicaron las normas brasileñas NBR 5739. La carga máxima fue usada como parámetro de control para el programa experimental, considerando como resistencia característica residual la media de los resultados de tres probetas del mismo tipo expuestas a iguales condiciones.

Los resultados obtenidos se resumen en la siguiente tabla.

Temperatura (°C)	Resistencia residual a compresión (MPa)					
	HRN	HRN-FP	HAR	HAR-FP	HAR-FA	HAR-FPA
Probetas de control	19,89	27,20	39,81	47,38	36,16	46,72
400°C	16,65	15,28	10,96	41,05	25,61	39,10
800°C	6,61	3,01	10,86	31,74	10,35	17,87

Tabla 8.3 Resistencia residual a compresión

Análisis de Datos

La evaluación de los resultados se realizó a través de un análisis estadístico usando el programa *Statística*. Se usó un análisis ANOVA para señalar las tendencias más significativas de los datos obtenidos en el ensayo.

Análisis de los resultados para hormigón de resistencia normal.

En el siguiente gráfico se muestra la resistencia residual a compresión de las probetas ensayadas en el horno junto con la resistencia original de compresión de control. Se observa que, a temperatura ambiente, la presencia de fibras de polipropileno mejora la resistencia a compresión

del hormigón. El valor medio de la resistencia en las probetas con fibras, no expuestas al calor, fue casi un 37% superior que en las de control.

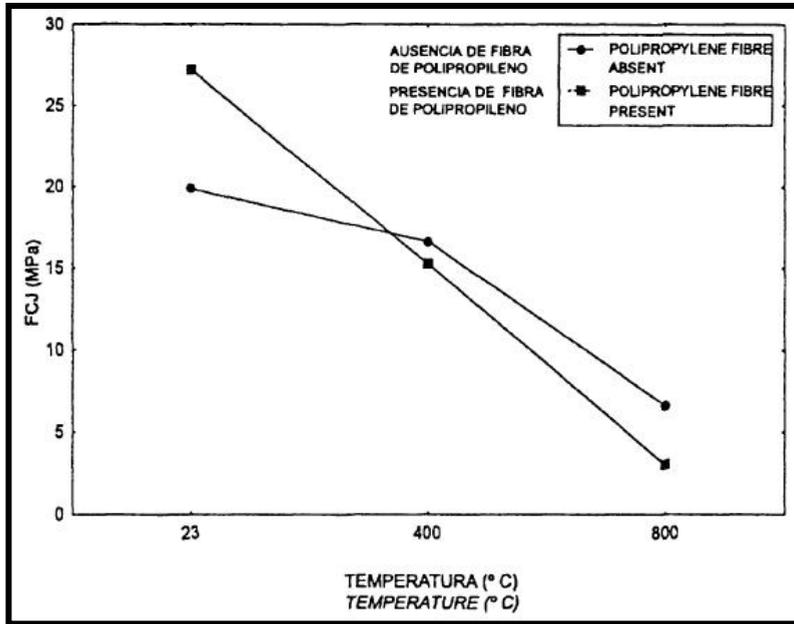


Fig. 8.1 Resistencia residual a compresión de HRN

En cambio, después de ser expuestas a elevadas temperaturas, la resistencia residual de las probetas sin fibras fue superior; debido a que el aumento de temperatura provoca que las fibras se fundan, perdiendo por un lado su efecto beneficioso y aumentando por otro la porosidad del hormigón. Puesto que el hormigón tradicional tiene una porosidad superior a la del hormigón de alta resistencia, el vapor de agua generado por el aumento de temperatura puede escaparse por los capilares, por lo que no se produce un incremento de la presión interna que pueda originar tensiones de tracción. En hormigones tradicionales la pérdida de fibras no soluciona nada, por lo que no mejora la resistencia al fuego, de hecho, reduce la resistencia a compresión del hormigón, creando un efecto negativo.

Se puede apreciar que la reducción de la resistencia causada por la presencia de fibras de polipropileno es notable a los 400°C, aumentando

ligeramente para probetas calentadas a más de 800°C. Dicho comportamiento parece mostrar que, a 400°C, una gran parte de las fibras ya se ha fundido pero una pequeña parte permanece activa, probablemente aquéllas situadas en el centro de la probeta donde la temperatura no es tan elevada.

Análisis de los resultados para hormigón de alta resistencia.

El gráfico muestra los resultados obtenidos en los ensayos a compresión de las probetas de hormigón de alta resistencia, a la izquierda uno donde podemos observar el comportamiento del hormigón con y sin fibras de polipropileno, y a la derecha además con y sin presencia de fibras metálicas.

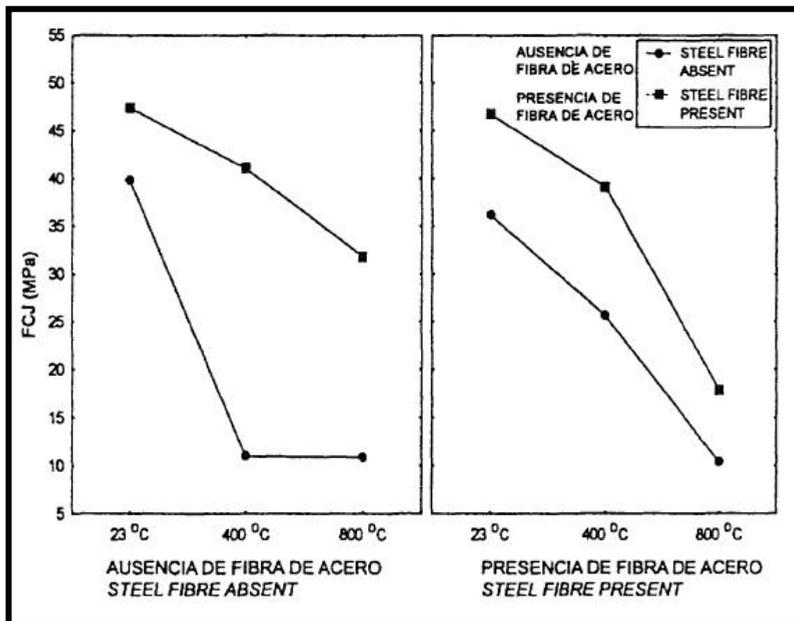


Fig. 8.2 Resistencia residual a compresión de HAR

Apreciamos que cuando sólo se utilizan fibras de polipropileno, genera un aumento de la resistencia a compresión (19%), al igual que ocurre con los hormigones tradicionales. En cambio, aquellas probetas de HAR que fueron expuestas al calor, tuvieron un comportamiento diferente a las de HRN. La resistencia del hormigón se redujo en casi un 90%,

cayendo desde 40MPa a cerca de 11MPa. Esta resistencia residual se mantuvo para probetas expuestas a 800°C, advirtiendo que ésta fue probablemente la mínima resistencia del material deteriorado por el calor.

También se puede observar que el hecho de aplicar fibras de polipropileno a la mezcla controla el daño por calentamiento. A 400°C, la reducción en la resistencia fue sólo de un 13%, pero el valor residual fue aún más cercano a la resistencia media del hormigón sin fibras. Aquellas que fueron expuestas a una temperatura superior, la reducción alcanzó un 33%, y la resistencia residual fue cercana a los 32MPa, que equivale a un 80% de la resistencia original del hormigón sin fibras de polipropileno no expuestas a elevadas temperaturas. Comparando ambos hormigones expuestos a 800°C, la resistencia del hormigón de alta resistencia con fibras de polipropileno fue un 192% superior a la resistencia del hormigón tradicional con las mismas fibras.

En aquellas probetas donde se utilizaron fibras de acero, la resistencia de las que no fueron expuestas al calor, fue levemente menor que la resistencia del hormigón sin fibras; atribuyéndose al efecto negativo que dichas fibras tienen sobre la trabajabilidad de la mezcla. Aunque el uso de superplastificante puede corregir este hecho, los datos que se obtuvieron indicaban que la introducción de fibras termina causando la incorporación de aire. Para aquellas que fueron expuestas a una temperatura de 400°C, las fibras de acero mejoran su comportamiento frente al fuego, porque mantuvieron un 65% de la resistencia original, mientras que las probetas sin fibras, a esa temperatura, ya habían sido totalmente dañadas, perdiendo un 90% de la resistencia original como se mencionó en el apartado anterior. A 800°C, en cambio, las fibras de acero no fueron efectivas, y las probetas con y sin fibras se redujeron a la misma resistencia residual. Esto se debe al hecho que, a elevadas temperaturas, las fibras de acero probablemente sufren considerables variaciones dimensionales alterando su adherencia en el hormigón e inclusive introduciendo tensiones de tracción adicionales en el material.

El efecto negativo causado por la presencia de fibras de acero a muy altas temperaturas puede también apreciarse cuando se analizan los

resultados de las probetas que poseen una combinación de fibras de acero y polipropileno. Para probetas no expuestas y para las expuestas a una temperatura de 400°C, las resistencias obtenidas con esta combinación de fibras fueron bastante parecidas que en aquellas donde sólo se utilizaron fibras de polipropileno. Sin embargo, para probetas expuestas a 800°C, la pérdida de resistencia fue mucho más intensa cuando se usaron fibras de acero. No obstante, la presencia de fibras de polipropileno nuevamente parece disminuir los efectos negativos de la exposición al fuego; hecho mostrado por la resistencia residual, cercana a 17MPa, la cual es caso 55% mayor que la resistencia residual alcanzada por hormigones sin fibras o con fibras de acero únicamente (cercanas a 11 MPa).

Discusión

Los resultados del programa experimental, indicaron que, los hormigones tradicionales tienen un comportamiento aceptable frente a la acción del fuego, mientras que hormigones más densos, entendiendo por ellos hormigones de alta resistencia, muestran una gran susceptibilidad al daño generando por la acción de este fenómeno. Este factor, hace necesario que se investigue sobre este tema, sobre todo para determinar cómo predecir y controlar el deterioro por calentamiento, ya que la pérdida de resistencia, como se ha demostrado, puede ser bastante significativa. Los resultados obtenidos en este ensayo indican que, para el hormigón tradicional, donde la porosidad ya es grande, el espacio adicional generado por la fusión de las fibras de polipropileno reduce la resistencia de las probetas expuestas a altas temperaturas, aunque aumenta la resistencia de aquellas que no fueron expuestas. Para el hormigón de alta resistencia, la incorporación de fibras de polipropileno reduce el daño por calentamiento de las probetas expuestas a 400°C y 800°C, ya que la fusión de las fibras crea un espacio extra reduciendo la presión de los poros. La incorporación de fibras de acero resultó útil para controlar el deterioro de las probetas expuestas a 400°C, pero su presencia no fue efectiva a 800°C, posiblemente causado por la pérdida de adherencia provocada por la diferencia de las velocidades de deformación entre las fibras y el hormigón circundante. Si observamos los resultados de las probetas no expuestas, apreciamos que la incorporación de fibras de acero produjo problemas de trabajabilidad o una gran

incorporación de aire, porque la resistencia fue inferior que para las probetas de control.

Conclusiones

Los datos obtenidos tras la realización de esta investigación indicó que el uso de fibras de polipropileno puede ser potencialmente útil para controlar el deterioro de hormigones de alta resistencia cuando son expuestos a altas temperaturas. Por otro lado, las fibras de acero no parecen tener un efecto positivo en la resistencia a altas temperaturas. Además, el uso de fibras de acero y polipropileno no fue positivo, ya que la presencia de las fibras de acero provocó una pérdida de resistencia a 800°C, mientras que para 0°C y 400°C el comportamiento fue parecido al de las probetas que sólo tenían incorporado fibras de polipropileno.

Resistencia al fuego del hormigón de alta resistencia con una mezcla de fibras.

Los hormigones de alta resistencia convencionales se caracterizan por no mostrar ningún tipo de advertencia (fisuras, grietas...) antes de que se produzca la fractura. Este comportamiento varía si se le añade una mezcla especial de fibras. El siguiente gráfico muestra el diagrama tensión-deformación de tres tipos diferentes de hormigón.

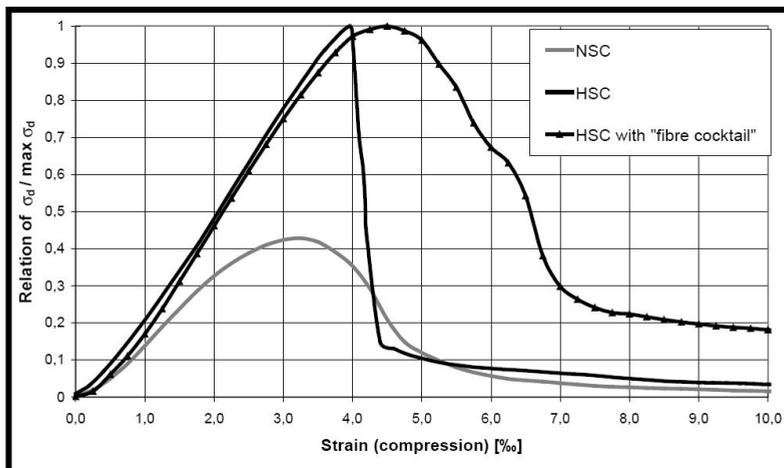


Fig. 8.3 Diagrama tensión-deformación del HRN, HAR y HAR con "coctel" de fibras

- Hormigón convencional.
- Hormigón de alta resistencia.
- Hormigón de alta resistencia con la mezcla de fibras.

En la siguiente imagen se aprecia que el tipo de rotura de ambos hormigones de alta resistencia no es igual; este hecho se debe a la mezcla especial de fibras añadida a uno de ellos. Se observa como en aquel donde se añadió el cóctel de fibras tiene un comportamiento mejor, y la rotura no es tan “explosiva”.

El llamado “coctel de fibras” contiene fibras de polipropileno y de acero. La dosificación depende de la resistencia a compresión soportada así como la deformación que puede alcanzar.

Para obtener más información acerca del comportamiento del nuevo material, también se realizaron pruebas de resistencia al fuego. En esta investigación se efectuaron cuatros ensayos de carga de fuego con la cooperación de MFPA Leipzig/Laue, por un lado dos pilares, y por otro dos losas; cada uno de ellos por separado. Cada muestra de ensayo fue hormigonada, curada y reforzada con armaduras del mismo modo.



Fig. 8.4 Rotura de probetas de HAR con fibras (izq.) y sin fibras (dcha.)

Comportamiento del HAR bajo cargas de fuego.

Una de las ventajas que presenta hormigón (convencional) en comparación con el acero estructural es su buena resistencia al fuego, como ya se ha comentado en apartados anteriores. A menudo se utiliza hormigón para proteger estructuras de acero contra el fuego. El hormigón pierde su capacidad estructural cuando se expone a elevadas temperaturas pero resiste durante más de tres horas, hasta que se produce el colapso de la estructura. El nivel elevado de porosidad que presenta el hormigón tradicional permite que escape al exterior el vapor

que se produce cuando se calienta, por lo que se libera parte de la presión generada.

Sin embargo, la microestructura del hormigón de alta resistencia con niveles de a/c de 0,3 o inferiores es tan densa, aunque no contenga mucha cantidad de agua libre, que dificulta la liberación de las presiones. Así que durante un largo periodo, a principio de los noventa, se cuestionó la resistencia al fuego del HAR.

La controversia fue resuelta, ya que el incendio del Túnel del Canal demostró que el hormigón de alta resistencia no está preparado para resistir temperaturas muy elevadas durante un largo periodo de tiempo. El hormigón de las zonas centrales del incendio fue completamente dañado.

Durante el calentamiento del material, se producen numerosas reacciones físicas y químicas provocando que la humedad se separe del gel de cemento y se vaporice. La presión del vapor genera tensiones que el elemento no puede soportar. Para una temperatura de 300°C, la presión alcanza un nivel de 8MPa, y para 350°C llega hasta los 17 MPa, por lo que es comprensible el comportamiento frente al *spalling*, ya que la resistencia a tracción del hormigón de alta resistencia es aproximadamente de 5 MPa.

Se efectuaron ensayos de resistencia al fuego de HAR con fibras metálicas, pero los resultados no fueron satisfactorios (Jensen/Aarup y König/Grimm), aunque si se reducía la profundidad de ataque del *spalling* (Kordina y Steinert). Atendiendo al uso de fibras de polipropileno, se demostró que con una dosificación aproximada de 4kg/m³ el comportamiento material mejoraba, ya que al fundirse las fibras aumentaban la porosidad y creaban canales, reduciendo la presión soportada por el hormigón (Diederichs y König et al).

Ensayos experimentales de resistencia al fuego

Las pruebas realizadas tienen el objetivo de mejorar el comportamiento frente al fuego de edificios y de túneles, de ahí que se ensayen pilares y losas de hormigón, ya que son los elementos estructurales utilizados para construir estas estructuras respectivamente.

Así que nos encontramos con dos tipos de incendios diferentes; en el siguiente gráfico se muestran la simulación de ambos. La curva llamada RABT simula la evolución de la temperatura cuando un camión cisterna explota (al igual que ocurrió en el incendio del Túnel del Canal); la curva ETK representa el calentamiento de los elementos estructurales durante un incendio "normal".

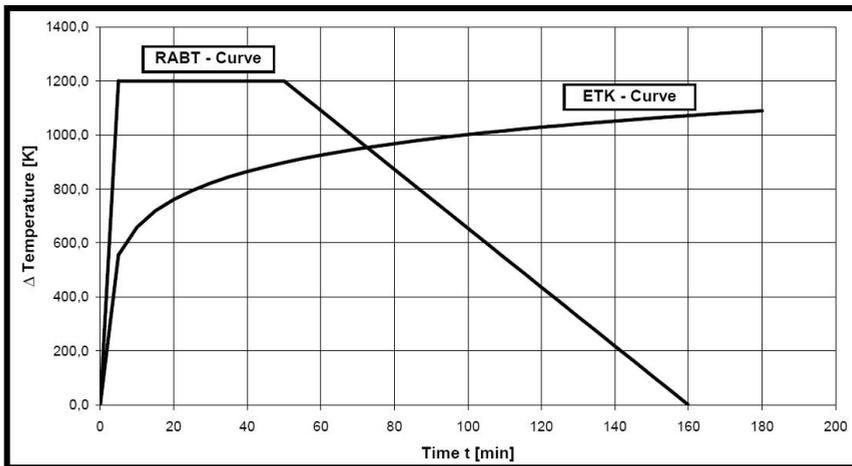


Fig. 8.5 Diferentes curvas de calentamiento

Las losas de hormigón de alta resistencia utilizadas en estos ensayos tenían las siguientes características:

- Unas dimensiones de 125 x 120 x 40 cm y 150 x 90 x 40 cm respectivamente.
- El refuerzo de armaduras fue de 5,13 cm²/m en cada dirección.
- El recubrimiento fue de 5 cm.
- Edad de las probetas: 77 días.

En este estudio se comparó un hormigón de alta resistencia ($f_{ck} = 75$ MPa) frente a otro al que se le añadió un coctel de fibras (80 kg/m³ de fibras de acero y 2 kg/m³ de fibras de polipropileno), siendo la dosificación de las fibras de polipropileno la mitad de la cantidad que normalmente se usa en HAR para protegerlos frente al fuego. Las losas de hormigón no fueron sometidas a ningún tipo de carga, y tenían un nivel de humedad antes del ensayo del 3,7%.

Los pilares tenían una sección de 24 x 24 cm², con una longitud de 115 cm. Fueron reforzadas con 4 Ø 14 mm (refuerzo mínimo) y estribos Ø 8 mm cada 16,5 cm. La dosificación del hormigón y del coctel de fibras corresponde con la utilizada en las losas. Sin embargo, fueron sometidos al 65% de la carga de rotura. La edad de las probetas fue la siguiente:

- 99 días para el pilar de HAR sin fibras.
- 126 días para el pilar de HAR con el coctel de fibras.

Resultados de los ensayos.

Losas de hormigón de alta resistencia.

Después de 1'50" minutos de exposición, los primeros indicios de spalling aparecían en las losas en las que se incorporaron el coctel de fibras. Tres minutos más tarde los desprendimientos alcanzaron una profundidad aproximada de 20 mm. Sin embargo, en la otra probeta no se empezaron a mostrar síntomas de spalling hasta los primeros cinco minutos de exposición, alcanzando la profundidad de 20 mm después de aproximadamente 14 minutos. Después de 17 minutos el spalling redujo su avance, hasta los 22 minutos donde no se observaron más cambios.



Fig. 8.6 Losa de hormigón sin fibras después del ensayo frente al fuego

Una vez realizado en el ensayo, se midieron las profundidades máximas de los desprendimientos generados por el efecto del *spalling*:

- 75 mm para la losa de hormigón sin fibras.
- 40 mm para la losa de hormigón con coctel de fibras.



Fig. 8.7 Losa de hormigón con cóctel de fibras después del ensayo frente al fuego

Pilares de hormigón de alta resistencia.

Mientras que los primeros desprendimientos del pilar de HAR convencional empezaron a los 15 minutos de exposición, la probeta de hormigón con coctel de fibras no mostró ningún cambio hasta los 26 minutos de exposición cuando comenzaban a apreciarse pequeñas microfisuras en sus bordes, volviéndose visibles pasados 11 minutos más tarde. El proceso de *spalling* se redujo después de 64 minutos de exposición, aunque se apreció un aumento notable del ancho de las grietas; el cual duró aproximadamente diez minutos. Después de esto no se pudieron apreciar más cambios, produciéndose el colapso de la probeta a los 109 minutos del inicio del ensayo.

El pilar de HAR convencional llegó al colapso tras 71 minutos de exposición; el proceso de *spalling* en los bordes de la probeta se redujo una vez transcurridos 41 minutos.

Conclusiones

Después de realizar los correspondientes ensayos de resistencia a compresión, así como a la exposición de elevadas temperaturas, podemos afirmar:

- El aumento de la capacidad de deformación que presenta el hormigón con el coctel de fibras ha permitido mejorar el comportamiento frente al *spalling*.
- La formación de microfisuras comienza antes, hecho que es influenciado por la fusión de fibras de polipropileno.
- Por otro lado, las fibras de acero permiten que se retrase el desprendimiento en los bordes de la pieza, por lo que el incremento de temperatura del interior del pilar se retrasa.

Resistencia al fuego del hormigón de alta resistencia con fibras de caucho.

El hormigón de alta resistencia es un material que se puede fabricar en la mayoría de plantas de hormigón existentes. La disponibilidad de una variedad de aditivos tales como humo de sílice o plastificantes reductores de agua permiten su amplio uso. Atendiendo a las ventajas arquitectónicas, el HAR permite reducir las secciones de los pilares, aumentando el espacio útil en los pisos inferiores.

Ya se ha comentado a lo largo de este trabajo que además de la resistencia, este tipo de hormigón presenta más diferencias en comparación con los hormigones tradicionales:

- Mayor rigidez.
- Menor permeabilidad.
- Mayor durabilidad.

Debido a estas características, algunas normativas exponen una serie de recomendaciones especiales para el uso de hormigones de alta resistencia en estructuras (Eurocódigo 2).

Por otro lado, una de las mayores diferencias que presentan ambos materiales es, como ya se ha demostrado, el comportamiento frente al

fuego. Autores como Phan, Anderberg y Lwason afirman que el *spalling* de los hormigones de alta resistencia tiende a ser mucho más explosivo cuando son sometidos a un rápido calentamiento, como en el caso de un incendio. Este comportamiento se debe principalmente a la baja permeabilidad que presentan los HAR, así como a la acumulación presión que se genera en sus poros interiores. Algunas soluciones, propuestas por Kalifa, Chéné, Bentz..., como la inclusión de fibras de polipropileno, reducen el riesgo de desprendimiento, ya que permite que escape el vapor de agua de la matriz de hormigón.

En este apartado se presentan algunos resultados de un estudio experimental sobre el hormigón de alta resistencia con fibras de caucho de neumáticos reciclados, realizado en el Laboratorio de Materiales de la Escuela de Arquitectura de Madrid. Los objetivos de esta investigación fueron:

- Reducir el riesgo de los hormigones de alta resistencia cuando se genera un incendio.
- Gestión de residuos sólidos a partir de neumáticos de camiones usados, reduciendo de este modo el impacto medioambiental.
- Reducir la rigidez del HAR sin una importante pérdida de resistencia, ampliando la compatibilidad de deformación con otros materiales de construcción

Programa experimental

En este estudio se confeccionó un hormigón de alta resistencia con humo de sílice y sin fibras, al cual se le añadieron tres fracciones diferentes de fibras de caucho (3%, 5% y 8% respectivamente), de modo que se ensayaron cuatro dosificaciones distintas de HAR. El comportamiento reológico del material se midió a través del Cono de Abrams y el consistómetro Ve-Be.

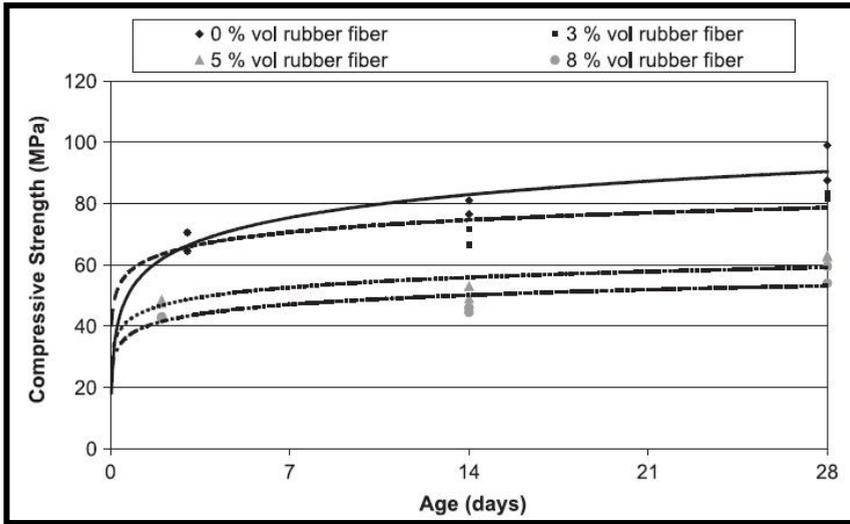


Fig. 8.8 Resistencia a compresión a varias edades de diferentes dosificaciones de HAR con fibras de caucho.

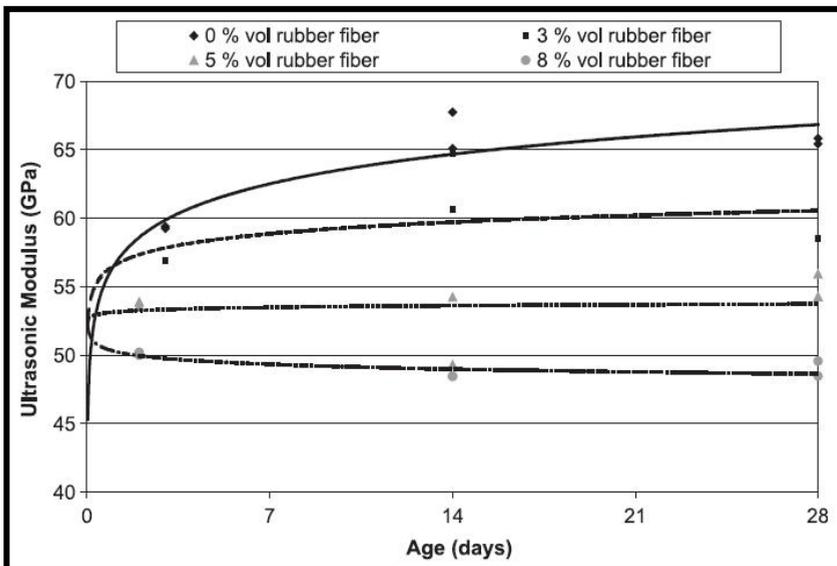


Fig. 8.9 Módulos ultrasónicos a varias edades de diferentes dosificaciones de HAR con fibras de caucho.

Por otro lado también se realizaron mediciones de la dureza, porosidad y densidad del mismo. Se elaboraron series de seis probetas cúbicas de 10 cm para cada una de las dosificaciones establecidas. Con

el objetivo de medir el proceso de endurecimiento de las muestras se efectuaron ensayos de ultrasonidos no-destructivos a distintas edades. Los ensayos de resistencia a compresión también se ejecutaron a edades diferentes para conocer el incremento de resistencia a lo largo del tiempo.

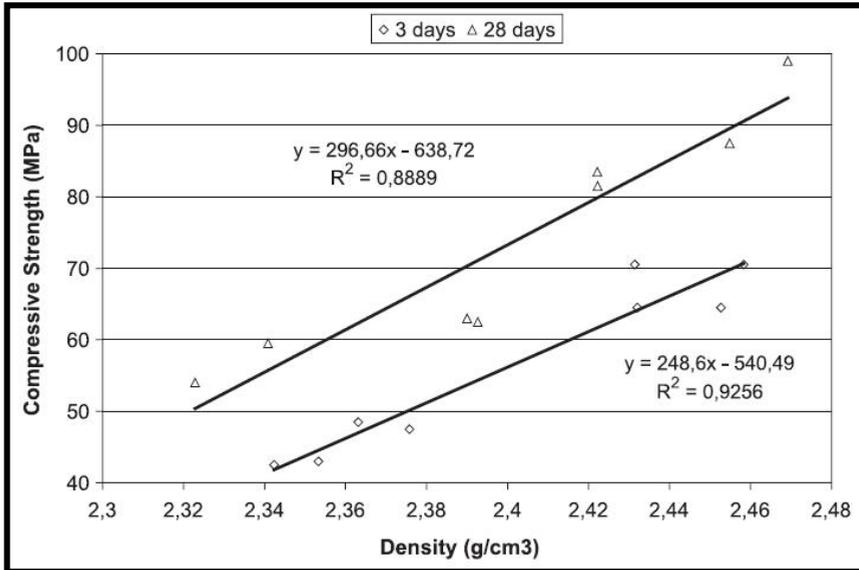


Fig. 8.10 Relación entre la resistencia a compresión y la densidad a diferentes edades

Para las pruebas de resistencia frente al fuego se utilizaron muestras prismáticas con las siguientes dimensiones: 20 x 30 x 5 cm. El equipo técnico empleado para estos ensayos estaba compuesto por:

- Horno *CHESA*, con las siguientes características:
 - 6 resistencias eléctricas
 - Temperatura máxima de 1300°C.
 - Dimensiones del agujero de fuego de 15 x 30 cm.
 - Registro de la temperatura mediante un termopar "S".
 - Controlador *CHESA*, con seis tipos diferentes de programas de temperatura.
- Dos controladores de temperatura "K" en contacto con las caras externas e internas del horno.

- Transductores de temperatura “Testo 925” para los controladores de temperatura “K”.

Las pruebas termo-gravimétricas se llevaron a cabo a partir de muestras patrón y de muestras extraídas a diferentes profundidades de las probetas ensayadas frente al fuego, con el objetivo de obtener espectros del deterioro sufrido por el HAR con fibras de caucho. A partir de este ensayo, la temperatura alcanzada a cada distancia puede ser calculada, comparando la pérdida de peso de una muestra calentada a cierta temperatura, con una muestra patrón.

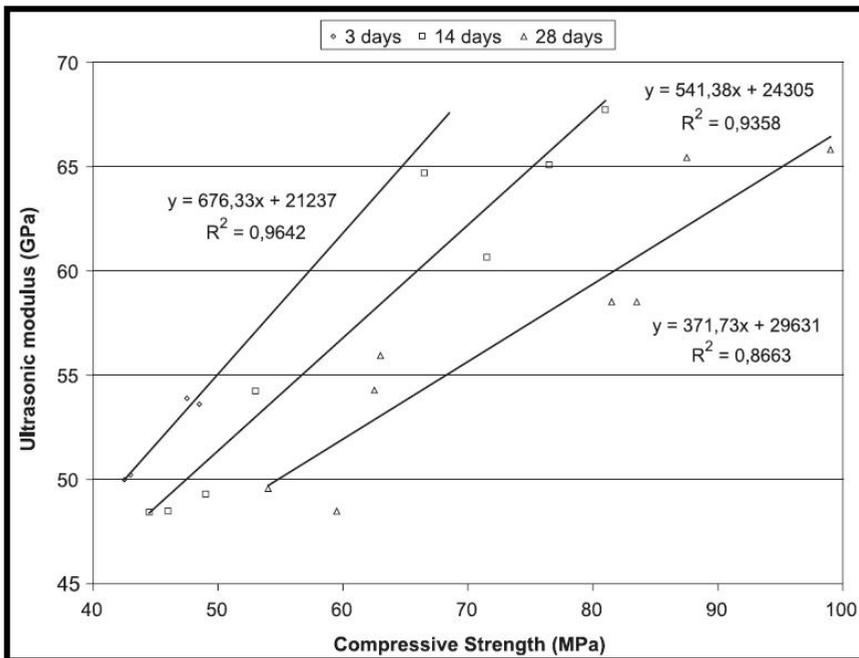


Fig. 8.11 Relación entre el módulo ultrasónico y la resistencia a compresión a diferentes edades

Materiales

Ya se comentó en el apartado anterior que en esta investigación se ensayaron probetas de hormigón de alta resistencia con contenidos diferentes de fibras de caucho procedentes de neumáticos reciclados:

- 0% de fibras de caucho.

- 3% de fibras de caucho.
- 5% de fibras de caucho.
- 8% de fibras de caucho.

A continuación se describe la composición para 1 m³ de HAR [26]:

- Cemento CEM I-52.5 R: 513 kg.
- Árido grueso silíceo (tamaño máximo de 16 mm): 1080 kg.
- Árido fino silíceo (tamaño máximo de 4 mm): 685 kg.
- Humo de sílice (5% del peso del cemento): 25.65 kg.
- Superplastificante Glenium C-355 (Bettor-MBT) (3% del peso del cemento): 15.7 kg.
- Agua: 128.25 l.
- Relación agua cemento (a/c): 0.25
- Relación árido grueso/cemento: 2.1/1
- Relación árido fino/cemento : 1.33/1

Las fibras de caucho reciclado se añadieron en las siguientes proporciones volumétricas:

- 3% de fibras: 25.2 kg/m³.
- 5% de fibras: 42 kg/m³.
- 8% de fibras: 67.2 kg/m³.

La longitud de dichas fibras está entre 0.85 y 2.15 cm, con un valor medio de 1.25 cm. Su superficie es áspera y muy dañada debido al proceso de corte; contienen un 4% de partículas de polvo que actúan como aditivo incorporador de aire. Presentan una densidad de 0.84 g/cm³ y una absorción de agua de un 25%. A partir de una temperatura de 175°C empiezan a reblandecerse, llegando a su combustión cuando se alcanzan 200°C.

La siguiente tabla presenta otras propiedades nominales de las fibras de caucho:

Young modulus	
@ 100%	1.97 MPa
@ 300%	10 MPa
@ 500%	22.36 MPa
Tension strength	28.1 MPa
Break point strain	590%
Resilience	
@ 23 °C	44%
@ 75 °C	55%

Tabla 8.4 Propiedades nominales de las fibras de caucho

Procedimiento de la mezcla y comportamiento reológico.

Las distintas composiciones de hormigón de alta resistencia fueron mezcladas en una mezcladora de eje horizontal 50-l. La baja relación de agua cemento utilizada (0.25) y el uso de humo de sílice obligaron a cambiar el proceso de mezclado, si se compara con el de un hormigón tradicional. El árido grueso, el cemento, las fibras y el humo de sílice se mezclaron en los primeros 2 minutos. A continuación, se añadió el árido fino, continuando con el proceso de mezclado durante un minuto. Finalmente, se incorporaron el agua y el superplastificante prosiguiendo con el mezclado durante 15 minutos.

Los resultados de todas las muestras en los ensayos de consistencia superaron los 10 cm, y los valores obtenidos para las pruebas Ve-Be no alcanzaron los 15 segundos. El tiempo de Ve-Be aumentó proporcionalmente a la dosificación de fibras de caucho, a pesar de este factor todas las mezclas presentaban buena trabajabilidad.

Resultados característicos físicos y químicos

Se elaboró una serie de seis probetas cúbicas (10 cm) y dos cilíndricas ($\varnothing 15 \times 30$ cm), utilizando moldes de acero. Las muestras se vibraron durante un tiempo coincidiendo con los resultados de las pruebas de Ve-Be, para evitar la posible segregación del hormigón. La cara externa de cada probeta fue humedecida depositando encima de ella un trozo de tela húmedo; fueron desmoldadas 24 horas más tarde. El proceso de curado se realizó en un contenedor con agua; las probetas fueron sacadas del mismo horas antes de realizar las correspondientes

pruebas, permitiendo de este modo su secado. Antes de dichas pruebas, también se efectuaron ensayos de ultrasonido, mediante la siguiente ecuación:

$$E_s = \rho v^2 / 1000$$

donde E_s es el módulo ultrasónico (MPa), ρ es la densidad (g/cm^3) y v es la velocidad de propagación de los ultrasonidos. Los resultados se resumen en el Fig. 8.9.

Según Wang, el módulo de los ultrasonidos es un buen índice de la rigidez del material y es útil como un valor de comparación. Se puede apreciar que en aquellas muestras donde se utilizó más cantidad de fibras de caucho, el módulo de ultrasonidos disminuye, por lo que la rigidez del material también se reduce.

Para los ensayos de resistencia a compresión se utilizaron probetas cúbicas. Con el objetivo de evitar concentraciones de tensiones en las superficies de contacto de las probetas, las cuales pueden producir el colapso de la misma a una tensión inferior que la normal, se utilizaron planchas de acero de un centímetro de espesor. Se aprecia que la resistencia a compresión disminuye conforme aumenta el contenido de fibras de caucho (Fig. 8.8); para pequeñas cantidades de fibra la reducción de resistencia es bastante pequeña. La rotura de las probetas de hormigón de alta resistencia sin fibras se produjo de una manera explosiva, mientras que aquellas donde se utilizaron fibras de caucho no mostraron este comportamiento.

En dicho gráfico se puede observar que la forma de la curva que representa la evolución de la resistencia a diferentes edades cambia cuando las fibras de caucho se añaden.

En otros dos gráficos se representan por un lado la relación entre la resistencia a compresión (Fig. 8.10) y la densidad medida a diferentes edades y por otro la relación entre el módulo de ultrasonidos y la resistencia a compresión a diferentes edades (Fig. 8.11). Ambas relaciones tienen una representación lineal.

Resistencia al fuego del HAR con fibras de caucho reciclado.

El estudio del comportamiento del HAR con fibras de caucho reciclado frente al fuego incluye el ensayo al fuego EN-UNE 1363-1 (equivalente al ISO 834). La ecuación utilizada en la curva del fuego fue:

$$T - T_0 = 345 \log_{10} (8t + 1)$$

donde T es la temperatura en el tiempo t y T_0 es la temperatura al comienzo del ensayo.

Las muestras ensayadas eran prismáticas y tenían una dimensión de 20 x 30 x 5 cm. Los ensayos se realizaron hasta que la cara expuesta al calor alcanzara los 1000°C. Los resultados experimentales de los ensayos al fuego se muestran en los siguientes gráficos (Fig. 8.12-8.15).

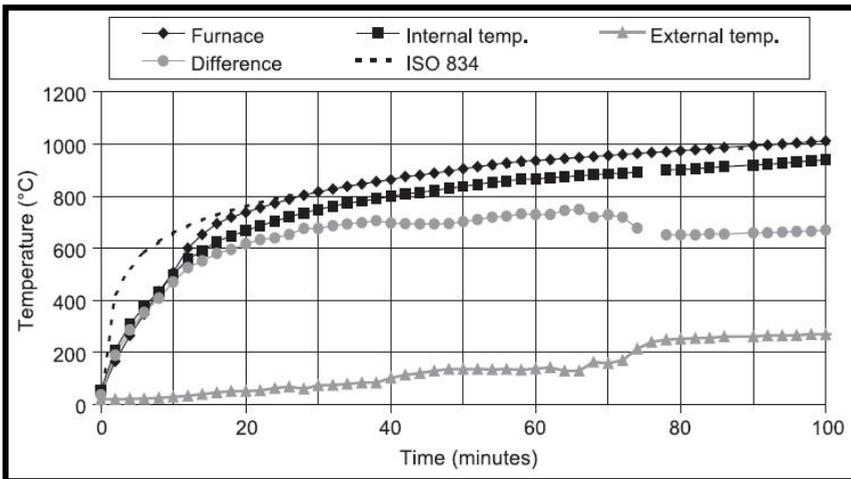


Fig. 8.12 Resultados del ensayo frente al fuego de las muestras sin fibras de caucho

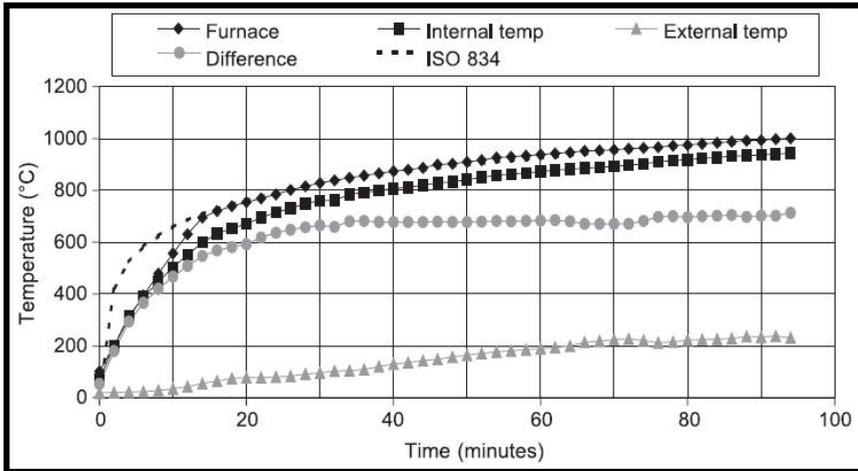


Fig. 8.13 Resultados del ensayo frente al fuego de las muestras con un 3% de fibras de caucho

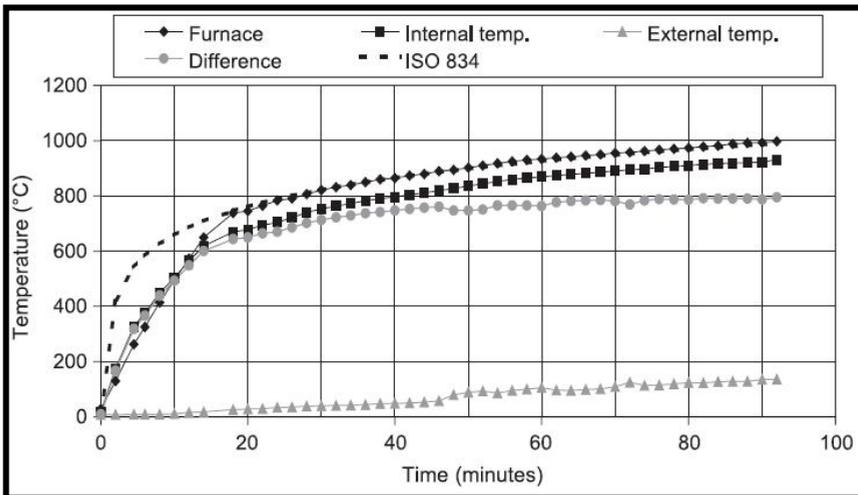


Fig. 8.14. Resultados del ensayo frente al fuego de las muestras con un 5% de fibras de caucho

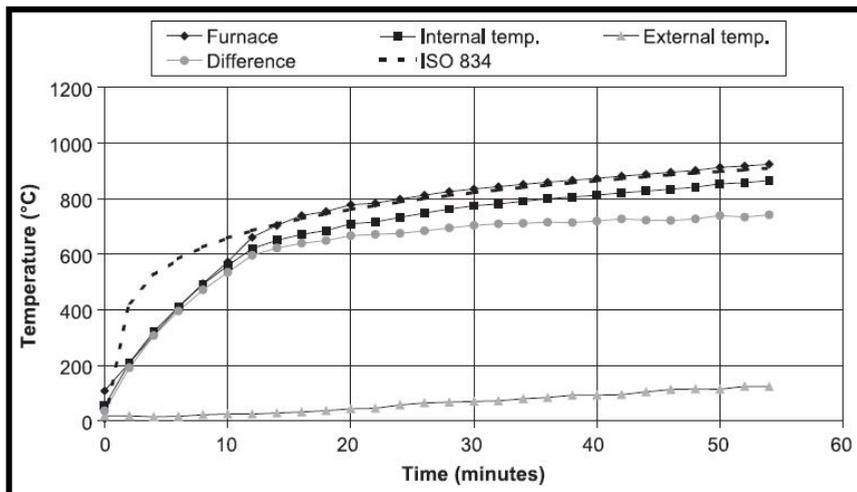


Fig. 8.15 Resultados del ensayo frente al fuego de las muestras con un 8% de fibras de caucho

Las probetas ensayadas mostraron un comportamiento muy diferente. El *spalling* en la cara expuesta al calor del hormigón de alta resistencia sin fibras de caucho es muy notable, además presenta una gran curvatura. Las muestras con fibras de caucho no mostraron un *spalling* tan destructivo y la curvatura se redujo conforme aumentó el contenido de fibras. En las siguientes imágenes se puede comprobar lo comentado en este párrafo, ya que muestran la curvatura de todas las probetas, así como el *spalling* de una probeta sin fibras y de otra con un contenido del 3%.

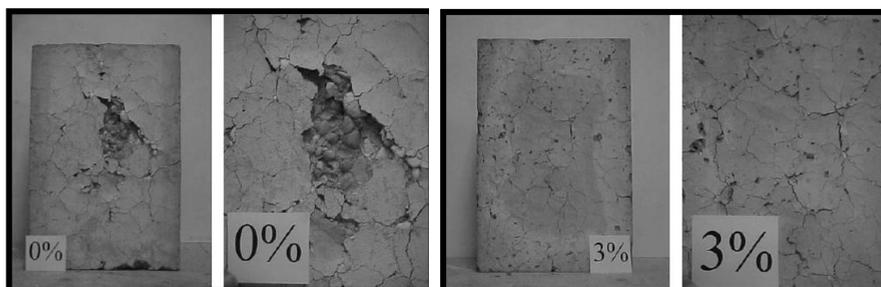


Fig. 8.16 Cara expuesta al calor de una muestra sin fibras (izq.) y de una muestra con un 3% de fibras (dcha.)

Se aprecia una cierta relación lineal entre el porcentaje de fibras de caucho reciclado con el radio de curvatura generado en las probetas prismáticas.

Las pruebas termogravimétricas se realizaron sobre las muestras ensayadas frente al fuego, a diferentes distancias de la superficie expuesta a elevadas temperaturas. Con el objetivo de comparar estos datos, también se efectuaron estas pruebas sobre muestras ensayadas a esfuerzos de compresión, se puede comprobar en el siguiente gráfico (Fig. 8.18).

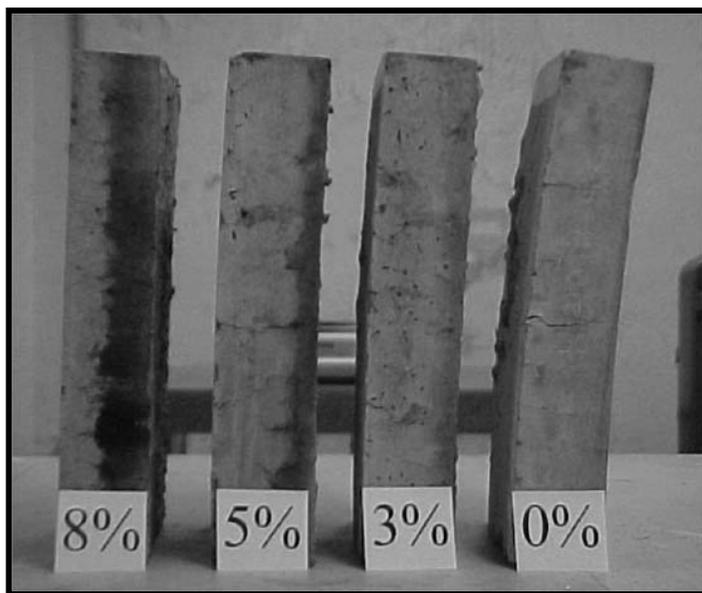


Fig. 8.17 Vista lateral de la cara expuesta al fuego de las muestras con diferentes porcentajes de fibras

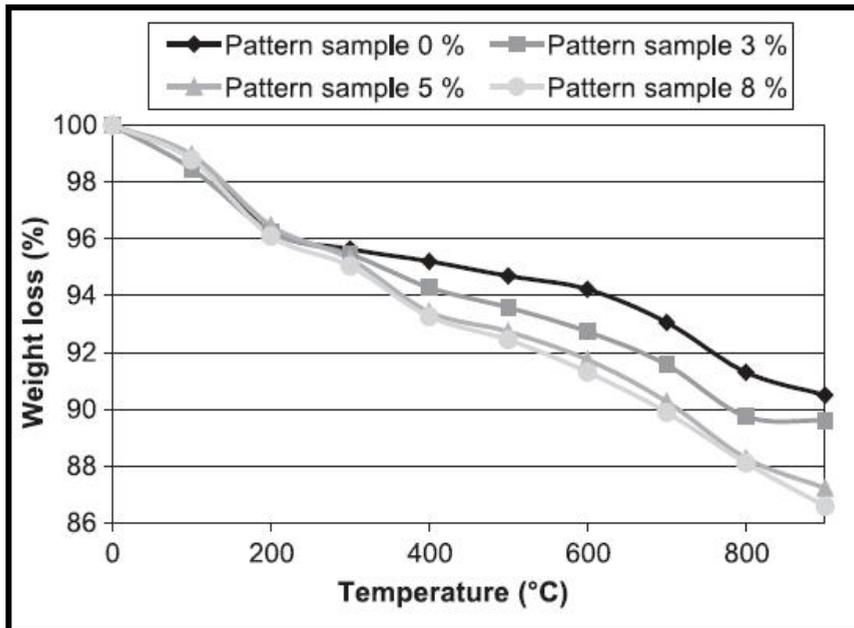


Fig. 8.18 Resultados de las pruebas termo-gravimétricas extraídas de muestras no ensayadas

Se extrajeron diversas muestras de probetas sometidas al fuego a diferentes profundidades: 1, 2, 3 y 4 cm, calentándose a temperaturas de 900°C, en intervalos de 100°C, comprobando su peso al final de cada fase. Los resultados de la pérdida de peso fueron comparados con muestras patrones con el fin de comparar la temperatura alcanzada para cada profundidad en el ensayo frente al fuego; estos datos se resumen en el siguiente gráfico (Fig. 8.19).

Se aprecia que para la una misma profundidad, la temperatura alcanzada disminuye conforme aumenta el contenido de fibras de caucho utilizado.

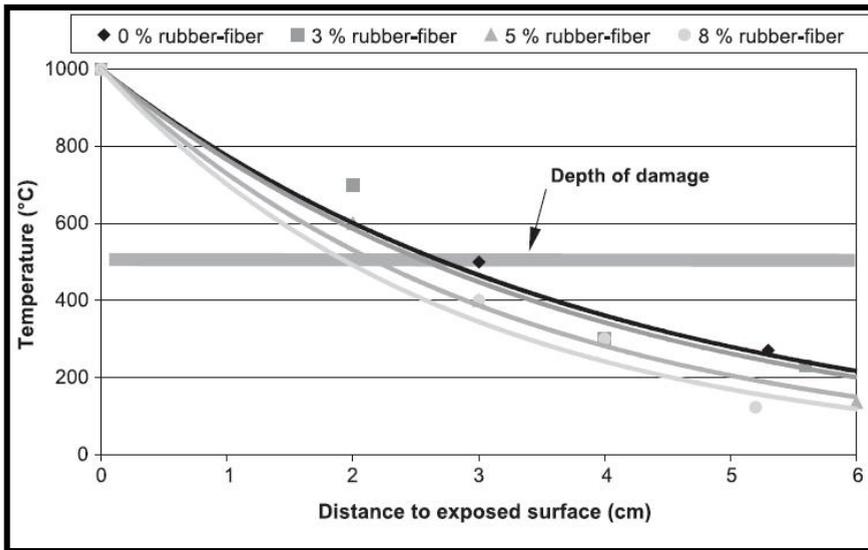


Fig. 9.19 Temperatura alcanzada a diferentes profundidades de las muestras ensayadas frente al fuego

Discusión de los resultados

La trabajabilidad de los HAR con fibras de caucho disminuye conforme aumenta el contenido de las mismas; a pesar de este factor todos los hormigones utilizados en esta investigación mostraron una buena trabajabilidad. La combinación de los ensayos del Cono de Abrams y las pruebas Ve-Be ayudó a conocer el comportamiento reológico de estos tipos de hormigones. Además este último dio información acerca del tiempo de vibración necesario para compactar el material sin peligro de segregación.

En estado endurecido, existen diferencias significativas entre las dosificaciones utilizadas en varias de sus propiedades como la densidad del hormigón, su resistencia a compresión o el módulo ultrasónico (Fig. 9.10 y 9.11). Debido a que la densidad, resistencia a compresión y rigidez de las fibras de caucho son menores que las propiedades del hormigón de alta resistencia, se puede afirmar que conforme aumenta el contenido de fibras de caucho, disminuye la densidad, resistencia a compresión y rigidez del HAR con fibras. La resistencia a compresión se

redujo en un 10% para aquella mezcla donde se utilizó un menor contenido de fibras (3%).

El uso de fibras de caucho elimina el comportamiento explosivo de los hormigones de alta resistencia sometidos a elevadas temperaturas y esfuerzos de compresión, ya que evita la aparición de fisuras, reduce el crecimiento de las mismas y consigue un comportamiento progresivo en el hormigón.

La resistencia al fuego de HAR cambia cuando se añaden fibras de caucho a la composición de la mezcla. En los gráficos (Fig. 9.12) e imágenes expuestos en este estudio se parecía que en aquellos hormigones donde no se ha utilizado este tipo de fibras, se produce un *spalling* explosivo. La curva de la cara no expuesta al calor muestra un escalón cuando ocurre este fenómeno.

Los canales creados tras la fusión de las fibras de caucho permiten que el vapor de agua escape de la probeta, reduciendo las tensiones generadas por la presión del vapor. En las fotografías expuestas anteriormente se aprecian pequeños orificios en las muestras con fibras, mientras que en aquellas donde no se utilizaron no se aprecian.

Existe una relación lineal entre el porcentaje de fibra de caucho utilizado y el radio de curvatura medido en las probetas expuestas al fuego. La curvatura es producida por el gradiente térmico y la presión del vapor, por lo que aquellas muestras con un mayor contenido de fibras presentarán una menor curvatura.

Resultados de los ensayos termo-gravimétricos indicaron una disminución de la temperatura alcanzada a una cierta distancia de la superficie expuesta cuando aumenta la cantidad de goma. Teniendo en cuenta 500 °C como la temperatura cuando la armadura de acero pierde su capacidad mecánica, podemos definir este umbral como la profundidad de daño de los hormigones de alta resistencia con fibras de caucho.

El Fig. 9.19 muestra que un pilar de HSC sin goma necesitaría un refuerzo mayor que aquellos a los que se les ha adicionado caucho con el fin de garantizar la integridad estructural.

Conclusiones

Los hormigones de alta resistencia con fibras de caucho muestran una disminución en la resistencia a compresión y rigidez, en comparación con HAR convencionales, cuando el porcentaje de las mismas aumenta. Este comportamiento puede ser rentable cuando se necesite cierta ductilidad en el material, manteniendo su alta resistencia.

Los ensayos frente al fuego han mostrado que se reduce la curvatura y el riesgo de spalling explosivo cuando se añade caucho al hormigón; la profundidad de daño también se reduce. Este hecho puede deberse a la reducción del refuerzo requerido en los elementos estructurales, o al incremento de la seguridad de los elementos estructurales de HAR contra el fuego.

Capítulo 9. Conclusiones Finales

De entre todos los materiales utilizados en construcción en la actualidad, el hormigón es el que mejor se comporta en caso de que sean sometidos a elevadas temperaturas, sobre todo si se compara con el acero o la madera, ya que presenta unas excelentes propiedades: alta resistencia al fuego (sin protección), es un material incombustible y no contribuye a la carga de fuego, presenta una muy baja conductividad del calor, tiene una alta posibilidad de reparación después del fuego (si éste no ha sido demasiado destructivo) y protege a los usuarios durante la evacuación de los usuarios así como a los bomberos durante su extinción. El único problema que presenta el hormigón frente a la acción del fuego es el fenómeno conocido como *spalling*, sobre todo en caso de que se trate de un hormigón de alta resistencia. En hormigones cuya resistencia sea normal no suele ser un problema muy grave, pero si se someten a elevadas temperaturas durante largos períodos de tiempo puede provocar desprendimientos, que pueden dejar al descubierto las armaduras al perder el recubrimiento mínimo, generando grandes pérdidas en la resistencia de la estructura. Sin embargo, en hormigones con resistencias elevadas los problemas son mayores, ya que al presentar mayor densidad y porosidad, el *spalling* empieza antes y de forma más brusca. En este proyecto se han citado algunos métodos a partir de los cuales los efectos provocados por el sometimiento al fuego de elementos estructurales realizados con hormigones de alta resistencia han sido disminuidos.

Durante estas décadas se han realizado ensayos donde se ha estudiado la evolución de la microestructura de los hormigones de alta resistencia a elevadas temperaturas, los cuales han permitido obtener las siguientes conclusiones:

- Un hormigón cualquiera sufre más deterioro frente al fuego cuanto menor es su porosidad; de este modo, los hormigones de alta resistencia se comportan peor frente al fuego que los hormigones tradicionales.

- La exposición de los hormigones a elevadas temperaturas produce un continuo aumento de la porosidad en los hormigones de alta resistencia. En casos de hormigones de muy alta resistencia, y sólo en ocasiones, este efecto puede no apreciarse.
- Los poros de gel son los que primero se alteran a temperaturas superiores a 100 °C incrementando el tamaño de poros en la región de poros capilares.
- La conectividad de los poros es un factor crítico, determinado por el tamaño de poros en la región capilar, sobre todo entre 0,01 y 1µm.
- La permeabilidad residual aumenta con la temperatura de exposición para los hormigones de alta resistencia.

Adoptando las apropiadas medidas, el *spalling* en los hormigones de alta resistencia puede minimizarse así como mejorar la resistencia a elevadas temperaturas:

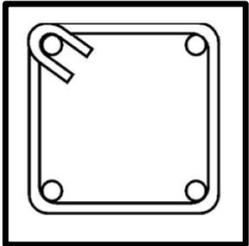
- El tamaño de los elementos estructurales influye, las disposiciones en las normas vigentes especifican las dimensiones mínimas de la sección transversal de los pilares de hormigones de resistencia normal. Las dimensiones mínimas recomendadas para conseguir cierta resistencia al fuego en los pilares de HAR (ya sean cuadrados o circulares) son:

Una hora	30 cm
Una hora – Una hora y media	35 cm
Dos horas	40 cm
3 horas o más	45 cm

Estas dimensiones son relativamente mayores a las requeridas para pilares elaborados con hormigón convencional.

- La adición de fibras de polipropileno (entre un 0,1 – 0,15% en volumen) a la mezcla reduce la degradación generada por el *spalling* ya que crea “caminos” por donde puede escapar la tensión generada en el interior de los elementos estructurales. Al llegar a una determinada temperatura las fibras de polipropileno se funden, por donde escapa la presión interior. el uso de fibras de polipropileno puede ser potencialmente útil para controlar el deterioro de

hormigones de alta resistencia cuando son expuestos a altas temperaturas. Por otro lado, las fibras de acero no parecen tener un efecto positivo en la resistencia a altas temperaturas. Además, el uso de fibras de acero y polipropileno no fue positivo, ya que la presencia de las fibras de acero provocó una pérdida de resistencia a 800°C, mientras que para 0°C y 400°C el comportamiento fue parecido al de las probetas que sólo tenían incorporado fibras de polipropileno.

- La disposición de los estribos en pilares de hormigón influye en el comportamiento de éstos cuando son sometidos a elevadas temperaturas. La distribución de estribos “doblados” (formando un ángulo de 135° con respecto al núcleo del elemento) mejora la resistencia al fuego y disminuye el efecto del *spalling*.
- En el caso de se utilicen fibras de acero se aumentará la resistencia a tracción del material por lo que se reducen los desprendimientos provocados por el *spalling*. Este tipo de fibras se suele utilizar más en hormigones con resistencias normales, aunque también mejora el comportamiento en aquellos de alta resistencia.
- El uso de áridos de origen calizo, en lugar de áridos silíceos, reduce el *spalling* y aumenta la resistencia a elevadas temperaturas.
- El *spalling* en HAR es mucho más severo en incendios donde exista una gran intensidad de calor, o se produzcan incrementos de temperatura elevados y rápidos, como incendios de hidrocarburos. En estas situaciones es muy recomendable utilizar fibras de polipropileno.
- Utilización del suficiente recubrimiento mínimo del hormigón sobre la armadura como se especifica en la norma.

Después de realizar los correspondientes ensayos de resistencia a compresión, así como a la exposición de elevadas temperaturas, podemos afirmar:

- El aumento de la capacidad de deformación que presenta el hormigón con el coctel de fibras ha permitido mejorar el comportamiento frente al *spalling*.
- La formación de microfisuras comienza antes, hecho que es influenciado por la fusión de fibras de polipropileno.
- Por otro lado, las fibras de acero permiten que se retrase el desprendimiento en los bordes de la pieza, por lo que el incremento de temperatura del interior del pilar se retrasa.
- Los hormigones de alta resistencia con fibras de caucho muestran una disminución en la resistencia a compresión y rigidez, en comparación con HAR convencionales, cuando el porcentaje de las mismas aumenta. Este comportamiento puede ser rentable cuando se necesite cierta ductilidad en el material, manteniendo su alta resistencia. El problema que presentan las fibras de caucho es que generan gases nocivos para la salud cuando se funden.
- Los ensayos frente al fuego han mostrado que se reduce la curvatura y el riesgo de *spalling* explosivo cuando se añade caucho al hormigón; la profundidad de daño también se reduce. Este hecho puede deberse a la reducción del refuerzo requerido en los elementos estructurales, o al incremento de la seguridad de los elementos estructurales de HAR contra el fuego.

A partir de lo citado en estos apartados, y a lo largo de todo el proyecto, el comportamiento frente al fuego del hormigón, dependiendo del tipo de resistencia que tenga, mejora notablemente.

Bibliografía

- A. Kitchen: Polypropylene fibres reduce explosive spalling in fire. *Concrete*, abr. 2001, pp. 40-41, 2001.
- A.N. Noumowe, P. Clastres, G. Debicki and J.L. Costaz. Thermal stresses and water vapour pressure of high performance concrete at high temperature. 4th Int. Symp. On utilization of high performance concrete, Paris (1996) 561-570.
- Acceptance criteria for concrete with synthetic fibers; lcc Evaluation Service, INC 2003.
- ACI Committee 216, "Standard Method for Determining Fire Resistance of Concrete and Masonry Construction Assemblies", American Concrete Institute, Detroit, 1997.
- ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete" (ACI 318-95), American Concrete Institute, Detroit, 1995.
- Ali, F.A., Nadjai, A., Glackin, P., Silcock, G., "Structural performance of high strength concrete columns in fire"; Proceedings of the Seventh International Association of Fire Safety Science Symposium (Worcester, MA., U.S.A.), pp. 1001-1012, 2002.
- American Society for Testing and Materials, Standard Methods of Fire Endurance Tests of Building Construction and Materials. ASTM E119-00, Philadelphia, PA, 2000.
- American Society of Civil Engineers(2003) The Pentagon building performance report, ASCE, washington, USA.
- B. Chr. Jensen and B. Aarup, Fire resistance of fibre reinforced silica fume based concrete. 4th Int. Symp. On utilization of high performance concrete, Paris (1996) 551-560.
- Beese, G y Kurkchubasche, R. (1975). Hochhaus Platz der Republik in Frankfurt am Main. Teil III Der Brand vom 22August 1973. *Beton- und Stahlbetonbau*, 70 (1975) H. 8, S.184/188. Alemania.
- Bilodeau, A., Malhotra, V.M. and Hoff, G.C. "Hydrocarbon Fire Resistance of High Strength Normal Weight and Light Weight

Concrete Incorporating Polypropylene Fibres", International Symposium on High Performance and Reactive Powder Concrete, Sherbrooke, QC, pp. 271-296, 1998.

- Canadian Standards Association, Code for the Design of Concrete Structures for Buildings. CAN3-A23.3-M94, Rexdale, ON, 1994.
- Carbon Fibre Reinforced Polymers for Strengthening of Structural Elements; Anders Carolin; Doctoral Thesis, Lulea University of Technology, 2003.
- CEMBUREAU (2004). Improving fire safety in tunnels: the concrete pavement solution, CEMBUREAU, 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.
- 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 EN 1991-1-2(2002). Eurocode , Part 1-2: Actions on structures - General actions - Actions of structures exposed to fire. CEN, Bruselas, Bélgica.
- CEN, Eurocode 2: Design of Concrete Structures: Part 1– 2. Structural fire design, CEN/TC 250/SC, 1993.
- Chana, P and Price, B (2003). The Cardington fire test, Concrete- the magazine of The Concrete Society, January, pág.28-33. Camberley, Reino Unido.
- CIMbéton (2006). Conception des batiments d'activités en béton: Murs séparatifs coupe-feu et façades à fonction d'écran thermique en beton (B67), Cimbéton, Paris, Francia.
- Código Técnico
- D.P. Bentz, Fibers, percolation and spalling of HPC, ACI Mater. J. 97 (3) (2000) 351–359.
- Danielsen, Ulf. "Marine Concrete Structures Exposed to Hydrocarbon Fires", Report, SINTEF – The Norwegian Fire Research Institute, pp. 56-76, 1997.
- 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).
- Diederichs, U., Jumppanen, U.-M., Schneider, U. : High Temperature Properties and Spalling Behaviour of High Strength Concrete. Contribution in "High Performance Concrete: Materials and Properties", Aedification-Verlag, Freiburg, 1995.
- Diederichs, U.; Jumppanen, U.M., Schneider, U. "High Temperature Properties and Spalling Behaviour of HSC", Proceedings of 4th Weimar Workshop on HPC, HAB Weimar, Germany, pp. 219-235, 1995.
- Engineered Steel Fibers with Optimal Properties for Reinforcement of Cement Composites; Antoine E.Naaman, 2003.
- F.M. Lea. The chemistry of cement and concrete, Edt. Eduard Arnold Ltd. London, U.K. (1983) 656.
- F.S. Rostasy, C. Ehm and K. Hinrichsmeyer, Structural alterations in concrete due to thermal and mechanical stresses. Pore structure and materials properties, Edt. J.C. Maso Chapman and Hall, vol 1. (1987) 92-99.
- F.S. Rostasy, R. Weis and G. Wiedemann. Changes of pore structure of cement mortars due to temperature. Cem. And Conc. Rs., vol 10, (1980) 157-164.
- Fernández Cánovas, Manuel, "Hormigón", 5ª Edición adaptado a la Instrucción de Cementos RC-97 y a la Instrucción de Hormigón Estructural EHE-98, Madrid, 1999.
- Fiber Reinforcement of Concrete Structures; R. Brown, University of Rhode Island Transportation Center, 2002
- Fibermesh: Polypropylene fibres for concrete and mortar; The Indian Concrete Journal, 2003.
- G.A. , Khoury B. N. Grainger and P. J.E. Sullivan, Transient thermal strain of concrete: Literature review, conditions within specimen and behavior of individuals constituents. Magz. of Conc. Rs., vol 37, nº 132, sept. (1985) 131-143.
- G.A. Khoury. Compressive strength at high temperatures: a reassessment. Magz. Of Conc. Rs., Vol 44 nº161, (1992) 291-309.

- Gálligo Estévez, José Manuel; Alaejos Gutiérrez, M^o Pilar, "Hormigón de alta resistencia. Estado actual de conocimientos" publicado por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, Madrid, 1999.
- Garrido Hernández, Antonio, "Apuntes de la Asignatura de Materiales de Construcción II, 2^o de Arquitectura Técnica de la Universidad Politécnica de Cartagena"
- Gonzalez-Isabel, Germán, "Hormigón de Alta Resistencia", publicado por INTEMAC (Instituto Técnico de Materiales y Construcciones), Madrid, 1993.
- H.J. Herbst and U. Schneider, porositäts und permeabilitätsentwicklung verschiedenartiger betone infolge termischer beanspruchung, Forchugsbericht, Kassel August (1986).
- H.L. Malhotra. The effect of temperature on compression strength concrete. Magz. of Conc. Rs. Aug. (1956) 85-94.
- Hertz K.D. "Limits of Spalling of Fire-Exposed Concrete", Fire Safety Journal 38 (2003) pp 103-116
- 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.
- Instrucción estructural del Hormigón. (EHE-08)
- INTEMAC (2005). Fire in the Windsor Building, Madrid.
- ISO/CD 23932. Fire safety engineering - General principles.
- J. Piasta. Heat transformation of cement phases and the microstructure of cement paste. Mat. et Const. Vol 17, n^o 102 (1984) 415-420.

- J.C. Wang, Young's modulus of porous materials, *J. Mater. Sci.* 19 (1984) 809– 814.
- Jensen, B., Aarup, B.: Fire Resistance of Fibre Reinforced Silica Fume Based Concrete. Contribution "4th International Symposium on Utilization of High-Strength/High-Performance Concrete, Paris, 1996.
- Jiménez Montoya, Pedro, "Hormigón Armado", 14ª Edición basada en la EHE ajustada al Código Modelo y al Eurocodigo, 2001.
- K. Hinrichsmeyer, *Strukturorientierte analyse und dellbescheibung der thermischen schädigung von beton*. Heft. 74. Braunschweig (1987).
- Khoury, G. (2000). Effect of fire on concrete and concrete structures. *Proceedings in Structural Engineering Materials*, Vol. 2, pág. 429-447.
- Kodur V.K.R.; Cheng F.P.; Wang T.C. "Effect of strength and fiber reinforcement on the fire resistance of high strength concrete columns", *ASCE Journal of Structural Engineering*, 129(2), pp. 253-259, 2003.
- Kodur, V. R.; Wang T.C.; Cheng, F.P. "Predicting the fire resistance behaviour of high strength concrete columns", *Cement and Concrete Composites Journal*, 26, pp. 141-153, 2004.
- Kodur, V.K.R. "Spalling in HSC Exposed to Fire: Concerns, Causes, Critical parameters and Cures", *Proceedings, ASCE Structures Congress, Philadelphia, PA, 2000*.
- Kodur, V.K.R. and McGrath, R., "Performance of High Strength Concrete Columns Under Severe Fire Conditions". *Proceedings Third International Conference on Concrete Under Severe Conditions, Vancouver, BC, Canada, pp. 254-268, 2001*.
- Kodur, V.R. "Fibre-Reinforced Concrete for Enhancing the Structural Fire Resistance of Columns" *Fibre- Structural Applications of Fibre-Reinforced Concrete, ACI SP-182*, pp. 215-234, 1999.
- Kodur, V.R., Sultan, M.A. "Structural behaviour of high strength concrete columns exposed to fire" *Proceedings: International*

Symposium on High Performance and Reactive Powder Concrete, Vol. 4, 217-232, Sherbrooke, Quebec, 1998.

- Kodur, V.R.; McGrath, R.C. "Fire endurance of high strength concrete columns" Fire Technology – Special Issue, Vol. 39: No. 1, 2003
- Kodur, V.R.; Wang, T.C.; Cheng, F.P.; Sultan, M.A. "A Model for evaluating the fire resistance of high performance concrete columns" Proceedings of the Seventh International Association of Fire Safety Science Symposium (Worcester, MA., U.S.A.), pp. 1013-10124, 2002.
- König, G., Grimm, R.: Hochleistungsbeton. Betonkalender 1996, Teil 1, Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 1996.
- Kordina, K.: Brandversuche an Tunnel-Auskleidungssystemen. FEVorhaben "Brandschutz in Verkehrstunnelanlagen", Final Report, 1994.
- L. Kützing: Fire resistance of high performance concrete with fibre cocktails. 2002.
- L. T. Phan. N. J. Carino: Review of mechanical properties of HSC at elevated temperature. Journal of materials in civil engineering., pp. 58-64. Feb 1998.
- L.T. Phan, Fire performance of HSC: a report of the state of the art, NISTIR 5934, NIST, 1996.
- L.T. Phan, J.R. Lawson, F.L. Davis, Heating, spalling and residual properties of high performance concrete, NISTIR 6588, NIST, 2000.
- 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.
- M. Bonomi, P.G. Gambarova, A. Meda, P. Setti, S. Zaglio: On the ultimate capacity of high performance R/C sections at high temperatura and after cooling. Proc of Third International Conference of Concrete Under Severe conditions, eds. Banthian,

N., Sakai, K., Gjory, .E., The University of British Columbia. Vancouver, Canada.2001. pp. 127-133.

- Markeset, G.: Failure of concrete under compressive strain gradients. Dissertation, Departement of Structural Engineering, University of Trondheim, Norwegen, 1993.
- Miguel Sosa, Pedro, "Hormigón de Alta Resistencia", Revista número 228-229 publicado por ACHE (Asociación Científico-técnica del Hormigón Estructural), Madrid, segundo y tercer trimestre de 2003.
- 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.
- N. Khoylou and G.L. England, The effect of moisture on spalling of normal and high strength concretes. Held in conjunction with the structures. Congress XIV, Worldwide advances in structural concrete and masonry, ASCE. Chicago Apr. (1996) 559-569.
- Naryanan, N. y Goodchild, C. H. (2006) Concise Eurocode 2, The Concrete Centre, Camberley, Reino Unido.
- National Research Council of Canada, National Building Code of Canada, Ottawa, ON, 1995.
- 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.
- 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.

- P. Kalifa. F.D. Menneteau. D. Quenard: Spalling and pore pressure in HPC at high temperature. *Cement and Concrete Research*, n, 30, 2000.
- P. Kalifa. G. Chéné. C. Gallé: High temperature behavior of HPC with polypropylene fibres from spalling to microstructure. *Cement and Concrete Research*, n.31, 2001.
- P.-C. Ai'tcin, Le développement des bétons à hautes performances en Amérique du Nord, in *Les bétons à hautes performances. Caractérisation, durabilité, applications*, Presses de l'école nationale des Ponts et chaussées, Paris, 1992.
- P.C. Ai'tcin: *The art and science of high performance concrete*, 1999.
- P.K. Metha, *Concrete structure properties and materials*, Edt. Prentice Hall, Inc, USA (1986) 129-132.
- Parra Costa, Carlos J, *Jornada Técnica sobre: NUEVOS HORMIGONES*", Organizada por IECA delegación del levante (Instituto Español del cemento y sus Aplicaciones), Cartagena, 2006.
- Phan, L.T. "Fire Performance of High-Strength Concrete: A Report of the State-of-the-Art", National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, pp. 105, 1996.
- Poly Vinyl Alcohol Fiber Reinforced Engineered Cementitious Composites; Pápay Zita Judit, Budapest University of Technology and Economics Department of Construction Materials and Engineering Geology, 2004.
- R. Sri Ravindrarajah and F. Stathopoulos. Effect of high-temperature on the properties of high-strength concrete 4th CAMET/ACI Int. conference on durability of concrete, Sydney, Aug. (1997) 17-22.
- Rilem recommendation: Compressive strength for service and accident conditions, *Mat. and Strut.*, vol 28 (1995) 410-414.
- Rilem recommendation: Measurement of the gas permeability of concrete by Cembureau method. *April*, vol 32 (1999) 176.

- Ros Mc Donnell, Diego, "Apuntes de la Asignatura de Materiales de Construcción I, de 1º de Arquitectura Técnica de al Universidad Politécnica de Cartagena"
- 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.
- Steinert, C.: Brandverhalten von Tunnelauskleidungen aus Spritzbeton mit Faserzusatz. Bauingenieur, Vol. 76, Nr. 1/98, 1998.
- 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.
- Summy Y.N. Chan, P. Gai-fei and John K.W. Chan, Comparison between high strength concrete and normal strength concrete subjected to high temperature, Mat. and Struct., vol 29, Dec (1996) 616-619.
- 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.
- Szoke S S. (2005). Are we protected from fire in buildings? PCI Journal, enero -febrero 2005. PCI, USA.
- T. Takano, T. Horigush, N. Sacki, T.D. Lin, M. Inuzuka, P. J.E. Sullivan: Residual properties of high strength fiber reinforced concrete exposed to high temperature. Proc. of Third International Conference of Concrete Under Severe conditions, eds. Banthian, N., Sakai, K., Gjory, .E., The University of British Columbia. Vancouver, Canada.2001. pp. 489-494.
- UNE-EN 1363-1, Ensayos de resistencia al fuego: Parte 1. Requisitos generales.
- Use of composite materials in civil Infraestructure in Japan, International Technology Research Institute; World Technology (WTEC) Division.Prof.Vistap M.Karbhari, 1998.
- Usine entreprise (Factory business) n°. 3031, noviembre 2004. Bruselas, Bélgica.

- V. Baroghel-Bouny, J. Godin and J. Gawsewitch. Microstructure and moisture properties of high-performance concrete. 4th Int. Symp. On utilization of high performance concrete, Paris (1996) 451-461.
- V.K. R. Kodur: Studies on the fire resistance of high strength concrete at the national research council of Canada. Proc. of international workshop on fire performance of high strength concrete. NIST, Gaithersburg, MD. Feb. 13-14, 1997, pp. 75-82.
- Vázquez Arenas, Gemma Apuntes de la Asignatura de Instalacio, 2º de Arquitectura Técnica de la Universidad Politécnica de Cartagena”
- W. Sun, X. Luo, S.Y.N. Chan: Properties of high performance concrete subjected to high temperature attack. Proc. Of Third International Conference of Concrete Under Severe conditions, eds. Banthian, N., Sakai, K., Gjory, O.E., The University of British Columbia. Vancouver, Canadá. 2001, pp. 473-479.
- W. Sun, X. Luo, S.Y.N. HAN: Properties of high performance concrete subjected to high temperature attack. In: Third International Conference of Concrete Under Severe conditions, eds. Banthian, N., Sakai, K., Gjory, .E., The University of British Columbia. 2001. 2v v.1. pp 473-479.
- W.H.Y. Waddell, L.R. Evans, Use of non-black fillers in tire compounds, Rubber Chem. Technol. 69 (3) (1996) 377.
- Wellington Lifelines Group (2002). Fire following earthquake: identifying key issues for New Zealand. Wellington Lifelines Group, Wellington, Nueva Zelanda.
- X. Fu and D.D.L. Chung. Reversible decrease of the flexural dynamic modulus of cement pastes up heating., Cem. And Conc. Rs., vol 27, nº6, (1997) 839-844.
- Y. Anderberg, Spalling phenomena of HPC and OC, Proceedings of the International Workshop on Fire Performance of High-Strength Concrete, NIST, Gaithersburg, 1997.
- Z.P. Bazant and M. F. Kaplan., Concrete at high temperatures. Longman Grp. Ltd., England (1996)