

El hormigón de alta resistencia en la edificación. Características del material. Dosificación. Aplicaciones

JESÚS GÓMEZ HERMOSO (*)

RESUMEN En el presente artículo se realiza una revisión de algunas de las últimas realizaciones internacionales, así como de la única nacional, de edificios de hormigón de alta resistencia. Los aspectos mostrados y analizados se centran, sobre todo, en las características del material y su dosificación. Finalmente se extraen unas conclusiones que permitan fijar ideas para futuros proyectos y obras realizados con este material.

HIGH PERFORMANCE CONCRETE IN BUILDINGS. MATERIALS CHARACTERISTIC. APLICATIONS

ABSTRACT This paper make a revision about some international realizations, and a single national, of high performance concrete buildings. The aspects shows and analysed are the characteristics of material and the mix. Finally we take out some conclusions that permit fix ideas for projects and workers in the future.

Palabras clave: Hormigón alta resistencia; Edificación; Material; Aplicaciones.

1. INTRODUCCIÓN

El incremento del empleo del hormigón en las estructuras de edificios altos en las últimas décadas se encuentra estrechamente ligado a la obtención de unas más elevadas características mecánicas. La obtención de hormigón de alta resistencia (en adelante HAR), entendiéndose por tal aquél cuya resistencia característica a compresión supera los 50 MPa, mediante una técnica y una dosificación ya dominadas, permite garantizar la continuidad de su calidad y nivel a lo largo de toda la ejecución de la obra y, por tanto, competir de forma directa con la estructura metálica en este campo de la construcción.

Un dato que permite confirmar la aseveración del párrafo anterior se obtiene de la relación de los "100 edificios más altos del mundo" (Council on Tall Buildings and Urban Habitat, 1998). En la tabla 1 se presenta un análisis de la misma en función de la década de construcción y del material que constituye la estructura.

década	nº edificios	acero%	hormigón (%)	mixta (%)
70s	17	76	12	12
80s	27	41	15	44
90s	42	28	36	36

TABLA 1.

(*) Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Jefe Dpto. Cimientos y Estructuras. Delegación Madrid-Edificación II. FCC Construcción, S.A.

Como puede apreciarse, el número (valor absoluto) y el porcentaje (valor relativo) de edificios construidos con hormigón no sólo se ha incrementado, sino que llega a ser superior al de los ejecutados con estructura metálica.

En España, sin embargo, las realizaciones con HAR se pueden recordar con facilidad por el escaso número de ellas que se han desarrollado hasta el presente. Sí se emplea este material en elementos prefabricados (en muchas ocasiones por razones de ritmo de producción más que por requerimientos estructurales en servicio), pero es muy escaso su uso como material vertido "in situ".

En este documento se muestran algunas de las características del hormigón utilizado en las realizaciones internacionales y nacionales de edificación que se presentan (fundamentalmente dosificación), realizándose una comparación que permita obtener una serie de conclusiones que sirvan de referencia para futuras aplicaciones.

2. REALIZACIONES INTERNACIONALES

En los siguientes puntos se recogen algunas de las características más significativas del hormigón puesto en obra en seis realizaciones internacionales. La resistencia característica indicada se refiere a la del material con mayor resistencia a compresión, ya que en cada edificio se emplean varios tipos de hormigón, incluso en los pilares (en función de la altura de la planta de que se trate).

2.1. EDIFICIO TRIANON

Situado en Frankfurt, finalizó su construcción en el año 1992. Con una altura de 186 m sobre rasante y 19,61 m bajo la misma, dispone de 48 plantas sobre aquélla y 4 sótanos. Su planta es, básicamente, triangular (foto 1).



FOTO 1. Edificio TRIANON. Frankfurt, 1992.

Se utilizaron tres tipos de hormigón en la estructura (B35, B45 y B85). El tipo B85 ($f_{ck} \geq 85 \text{ N/mm}^2$), de mayor resistencia a compresión, se empleó en los muros de los núcleos y en los pilares más solicitados de las plantas inferiores. En el proyecto inicial estos pilares, soportando una carga de 40 MN, tenían una sección cuadrada de 1,20 m de lado. Con el incremento de la resistencia a compresión del hormigón se buscaban dos objetivos: reducir la armadura principal de los pilares y disminuir la sección de los mismos.

En los estudios realizados se plantearon diversas dosificaciones en función de la resistencia característica que se pretendía alcanzar. En la tabla 2 se muestran tres de las obtenidas, así como algunos otros datos característicos.

Las principales características de un hormigón de esta resistencia son:

- Alto contenido de superplastificante (5 a 20 l/m³), obteniendo buenos resultados con los basados en naftalenofor- maldeidos condensados.
- Baja relación agua/cemento, que se reduce sensiblemente para aumentar la resistencia a compresión del hormigón.
- Inclusión de humo de sílice en la dosificación en valores próximos al 10% en peso del cemento.

Se realizaron ensayos de resistencia a compresión mediante la rotura de probetas cúbicas de 100 y 200 mm de lado

	B 85	B 100	B 125
Cemento PZ 45 F (kg/m ³)	455	450	450
Humo de sílice (kg/m ³)	30	45	45
Árido (0-2 mm) (kg/m ³)	618	654	661
Árido (2-8 mm) (kg/m ³)	360	353	358
Árido (8-16 mm) (kg/m ³)	738	760	768
Agua (l/m ³)	163	138	128
Superplastificante (l/m ³)	6,8	16,9	22,5
Retardador (l/m ³)	1,6	1,8	1,8
Agua / (cemento + humo de sílice)	0,34	0,28	0,26
Temperatura hormigón fresco (° C)	25	24	23
Aire ocluido (% volumen)	1,9	1,5	1,6
$f_{c,28d}$ (probeta cúbica 100 mm) (N/mm ²)	96	110	135

TABLA 2.

y cilíndricas de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura. En la figura 1 se aprecia la relación existente entre las de estas últimas y las cúbicas de 200 mm. Su relación es de 0,85.

En la figura 2 se muestran los diagramas simplificados parábola-rectángulo de tensión-deformación obtenidos para cuatro tipos de hormigones (B25, B55, B85 y B115). De los mismos se concluye que a medida que se incrementa la resistencia a compresión lo hace también la fragilidad, disminuyendo la ductilidad del elemento estructural. Para compensar este efecto ha de disponerse mayor armadura de confinamiento. El refuerzo transversal proyectado en este edificio es de un 0,8% de volumen de aceros en los pilares de sección cuadrada y un 0,5% en los de sección circular.

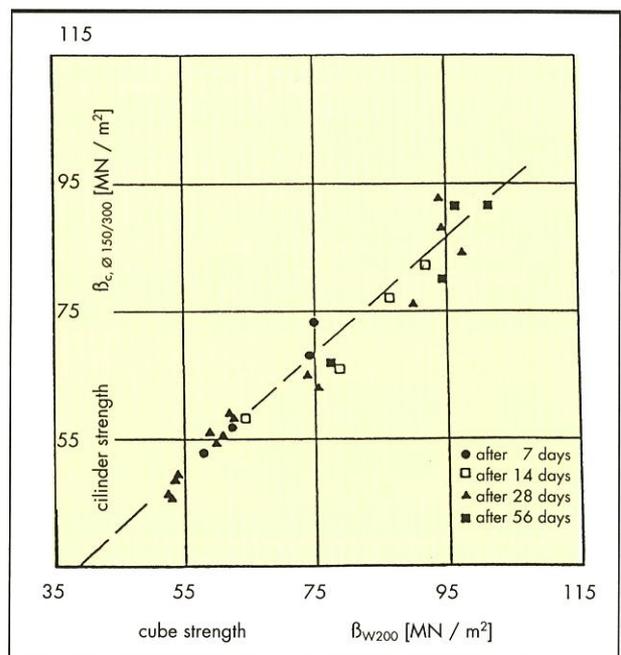


FIGURA 1.

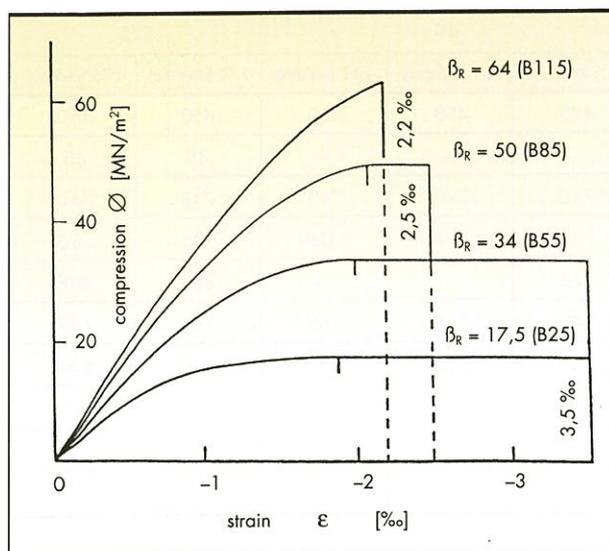


FIGURA 2.

2.2. JAPAN CENTRE

Este edificio de oficinas, situado en la misma ciudad que el anterior, fue terminado de construir en el año 1996. Tiene 32 plantas (28 sobre rasante y 4 sótanos) y 115 m de altura, siendo su planta cuadrada de 37 m de lado.

El hormigón con mayor resistencia a compresión utilizado en su construcción es del tipo C105 ($f_{ck} \geq 105 \text{ N/mm}^2$), habiendo sido empleado en los pilares y las vigas de las cuatro fachadas en las doce plantas inferiores. El objetivo fundamental que se perseguía con el empleo de este material era incrementar la superficie útil del edificio.

En la tabla 3 se encuentra el detalle de la dosificación, debiendo subrayarse el empleo de fibras de polipropileno.

El comportamiento del HAR frente al fuego es más desfavorable que el del hormigón convencional. El incremento de resistencia a compresión va ligado a una disminución de la porosidad. Cuando la acción del fuego alcanza a un hormigón, a la temperatura de 150°C se evapora el agua que se encuentra en la masa del mismo; al no disponer de una cierta capilaridad a través de los poros, se produce una mayor presión interior.

Sin embargo, los estudios realizados en la Universidad Tecnológica de Braunschweig muestran que la adición de fibras de polipropileno permiten clasificar sin restricciones a un hormigón C105 como F120. Estas fibras, ante la acción del fuego, y alcanzada una cierta temperatura, se queman y funden, formando unos poros en forma tubular que permite disminuir la presión anteriormente comentada.

Respecto al control de las características del material durante la ejecución de la obra, se realizaron ensayos de rotura a compresión de probetas cúbicas de 150 mm de lado. A los 7 días se superó en todos los casos una resistencia de 92 N/mm^2 , siendo el valor medio a los 28 días de 120 N/mm^2 .

El valor medio obtenido para el módulo de elasticidad ha sido de 47.000 MPa.

2.3. BIBLIOTECA DE FRANCIA

La construcción de este edificio, situado en París y comenzada en el año 1992, finalizó en 1995. Sobre una superficie rectangular de 375 x 175 m, con un espacio central de 10.000 m^2 , dispone de 6 plantas. Sobre este conjunto y situa-

	C105
Cemento Portland 55 (kg/m^3)	520
Humo de sílice (kg/m^3)	35 + 35
Arena (0-2 mm) (kg/m^3)	644
Grava (2-8 mm) (kg/m^3)	235
Basalto (8-11 mm) (kg/m^3)	961
Agua (l/m^3)	106,5
Plastificante (kg/m^3)	25
Fibras de polipropileno (kg/m^3)	2
Agua / (cemento + humo de sílice)	0,22

TABLA 3.

das en las esquinas se encuentran 4 torres de 80 m de altura, con forma de "L" y 22 plantas cada una (2 inferiores que constituyen un gran vestíbulo, 7 destinadas a uso de oficinas, 11 de almacén de documentación bibliográfica y 2 plantas técnicas superiores).

Los tipos de hormigón empleados en la ejecución de la estructura han sido los C35, C60 y C75 (35, 60 y 75 N/mm^2 de resistencia característica, respectivamente), utilizándose en este último humo de sílice entre sus componentes.

Además de las superiores características mecánicas, el desarrollo del proyecto y de la obra con HAR se debió al incremento que se obtenía en el ritmo de la ejecución de ésta. Así la media de hormigón puesto en obra fue de 16.000 m^3/mes (alcanzando los 24.000 m^3/mes), y de 800 $\text{m}^3/\text{día}$ (con un máximo de 1.200 $\text{m}^3/\text{día}$) para el conjunto de la obra, encontrándose el HAR entre 60 y 100 $\text{m}^3/\text{día}$. Estos valores se alcanzaban ejecutando 2 plantas por torre cada 7 días y 7 plantas por torre cada 28 días.

Las dosificaciones empleadas para los distintos tipos de HAR fueron cinco distintas, siguiendo los siguientes criterios y diferencias:

- En el C60 no se empleó humo de sílice, mientras que sí se hizo en el C75.
- Para cada uno de ellos se diseñó una dosificación para verano y otra para invierno, siendo menor la cantidad de superplastificante utilizado en esta última.
- El hormigón tipo C60 se preparó con 2 y con 3 tamaños distintos de árido.

En la tabla 4 puede apreciarse el detalle de las distintas dosificaciones.

Sobre los datos de la tabla 4 se pueden realizar los siguientes comentarios:

- El cemento empleado se mantuvo prácticamente constante en los 450 kg/m^3 .
- El consumo de humo de sílice (C75) supone un 10% del cemento de peso.
- La cantidad de arena se mantuvo constante en los 740 kg/m^3 .
- El volumen de agua se redujo en un 11% al pasar de hormigón tipo C60 a C75.

	C60			C75	
	F6	F61 (invierno)	F61 (verano)	F75 (invierno)	F75 (verano)
Cemento Portland (kg/m ³)	425	450	450	450	450
Humo de sílice (kg/m ³)	—	—	—	45	45
Arena (0-4 mm) (kg/m ³)	740	740	740	740	740
Grava (4 a 12,5 mm) (kg/m ³)	135	1.030	1.030	135	135
Grava (5 a 20 mm) (kg/m ³)	928	—	—	888	888
Agua (l/ m ³)	149	165	165	147	147
Superplastificante 1/3 (l/m ³)	4,25	4,50	4,50	4,50	4,50
Superplastificante 2/3 (l/m ³)	8,50	9,00	10,12	10,35	12,15
Agua / cemento	0,35	0,37	0,37	—	—
Agua / (cemento + humo de sílice)	—	—	—	0,30	0,30

TABLA 4.

- La cantidad de superplastificante se incrementó en un 10% al pasar de invierno a verano.

Durante la ejecución de la obra se realizó un control de calidad del hormigón que permitiera conocer la evolución de su resistencia a compresión (en probeta cilíndrica). En la tabla 5 pueden apreciarse los resultados obtenidos.

Por tanto, con unas desviaciones estándar relativamente bajas se obtuvieron unas resistencias medias a los 28 días que permitían garantizar de una forma homogénea la resistencia de proyecto.

2.4. SOCIÉTÉ GÉNÉRALE TOWER

Este edificio, cuya construcción finalizó en 1995, se encuentra situado en el barrio de La Defense, en París. Lo constituyen dos torres de 190 m de altura, de los que 167 m se encuentran sobre rasante.

Proyectado y ejecutado con diversos tipos de hormigón, el de mayor resistencia de proyecto corresponde a 60 MPa, del que son 24.000 m³ de los 120.000 m³ totales.

Las razones fundamentales del uso de HAR fueron reducir la sección de los pilares, aumentar la superficie útil del edificio e incrementar el ritmo de ejecución de la obra, llegando a una planta cada 5 días en las primeras y cada 3 días para las 10 últimas.

En la tabla 6 se refleja la dosificación empleada para la fabricación del hormigón tipo C60.

Resistencia a compresión (MPa)	C60		C75
	F6	F61 y F62	F75
A los 7 días (media)	60,6	58,9	70,6
A los 7 días (desviación estándar)	2,5	2,5	3,7
A los 28 días (media)	69,6	69,0	86,5
A los 28 días (desviación estándar)	3,3	2,9	5,1
Resistencia característica (P = 0,95)	64,2	64,2	78,1

TABLA 5.

Como puede apreciarse el porcentaje de humo de sílice respecto al cemento empleado es de un 8%, habiéndose determinado la tolerancia en un +/-1%.

El control de calidad realizado arrojó un valor medio de la resistencia a compresión del hormigón de 73,5 MPa, con una desviación estándar de 5 MPa, siendo la resistencia característica ($f_{cm}-1,6s$) de 65,5 MPa.

2.5. HOTEL "NEW CENTURY"

Situado en Beijing, la construcción de este edificio finalizó en 1989. Sobre un conjunto común compuesto por dos plantas sótano y tres plantas sobre rasante, se elevan dos torres de 35 y 17 plantas.

El tipo de hormigón de mayor resistencia característica puesto en obra es el C60 (60 MPa), que se encuentra en los pilares hasta la planta 4ª. Inicialmente estos se habían proyectado con hormigón tipo C40, con el que las secciones eran de 1,27 x 1,27 m. Al cambiar el tipo de hormigón y proyectar soportes mixos la citada sección se redujo a 0,90 x 0,90 m. La principal razón para el empleo de un HAR fue, por tanto, la reducción de la sección de los pilares y el incremento de la superficie útil del edificio (en 129,5 m²).

En la tabla 7 se encuentran algunas de las características de la dosificación empleada.

Para tener una idea de las características de docilidad resultante en este material debe indicarse que, siendo su "cono" de trabajo de 18 cm, pasados 40 minutos la pérdida de éste fue de 2 cm.

	C60
Cemento CPJ HPR PM (kg/m ³)	417
Humo de sílice (kg/m ³)	33
Arena (kg/m ³)	740
Grava (5 a 25 mm) (kg/m ³)	1.020
Agua (l/m ³)	150
Superplastificante (l/m ³)	8,30
Agua / (cemento + humo de sílice)	0,33

TABLA 6.

	C60
Cemento (kg/m ³)	444
Humo de sílice (kg/m ³)	45
Agua (l/m ³)	180
Superplastificante (l/m ³)	4,40
Agua / cemento	0,40

TABLA 7.

2.6. TORRES PETRONAS

Este conjunto constituido por dos torres (foto 2) se encuentra situado en Kuala Lumpur, Malaysia. Ambas torres, gemelas, tienen una altura sobre rasante de 450 m, con un total de 88 plantas (82 y 6, respectivamente, sobre y bajo aquélla).

El tipo de hormigón empleado, en función de la planta a la que correspondían los soportes y muros interiores, es el C80, C60 y C40. Las razones fundamentales que impulsaron el empleo del HAR son las siguientes:

- Mayor “eficiencia” estructural: frente a la estructura metálica presenta un menor coste; frente al hormigón convencional supone una reducción de las secciones de los pilares, lo que supone un incremento de la superficie útil disponible.
- Mejor “constructibilidad”: la ejecución de los elementos de hormigón con el vertido de este material “in situ” facilita la puesta en obra frente al movimiento en la misma de elementos estructurales prefabricados; para los constructores locales supone un procedimiento más flexible de ejecución, no obligando, por otra parte, a la notable importación de elementos metálicos a que obligaría una solución de este tipo.
- Confort de los ocupantes: el mayor amortiguamiento intrínseco de una estructura de hormigón supone unos menores desplazamientos horizontales por efecto del viento, lo que repercute favorablemente en la comodidad del usuario.

Para la dosificación del hormigón tipo C80 se consideran, básicamente, dos alternativas en función del cemento empleado: portland y con la utilización de “masscrete” (con un 20% de cenizas incorporadas al cemento). En la tabla 8 pueden apreciarse ambas dosificaciones, así como algunas otras características, sobre todo térmicas, del hormigón.

En la figura 3 se observa la evolución de la resistencia a compresión del hormigón con ambas dosificaciones. Hasta los 7 días existen algunas diferencias; a partir de ese punto la evolución hasta 46 días es prácticamente la misma.

Se hizo también un estudio de gradientes térmicos entre diversos puntos de las columnas que se ensayaron (centro y esquina, punto medio de la superior, y un lado, respectivamente), obteniéndose su evolución en el tiempo. Sobre las diferencias y evolución de la temperatura en el centro del elemento estructural, puede apreciarse en la figura 4 que los valores obtenidos con la segunda dosificación (con cenizas volantes) son ligeramente inferiores, siendo similar la tendencia de fuerte incremento inicial y lento enfriamiento posterior. También con esta última dosificación se aprecia un menor gradiente térmico entre centro y puntos exteriores del elemento.



FOTO 2. Torres Petronas. Kuala Lumpur. Malasia.

	PC/SF	PC/PFA/SF
Cemento PC/SF (kg/m ³)	505	184
Cemento Masscrete (PC/PFA/SF) (kg/m ³)	—	345
Humo de sílice (kg/m ³)	30	35
Arena (kg/m ³)	750	728
Grava (kg/m ³)	1.000	1.006
Agua (l/m ³)	134	152
Superplastificante (l/m ³)	9,06	8,48
Retardador (l/m ³)	1,00	0,80
Agua / (cemento + humo de sílice)	0,25	0,27
Cono (mm)	22	22
Temperatura del hormigón fresco (° C)	32 a 33	33 a 35
Máxima temperatura medida en el hormigón (° C / horas)	91,6° C a 29 h	87° C a 26,5 h

TABLA 8.

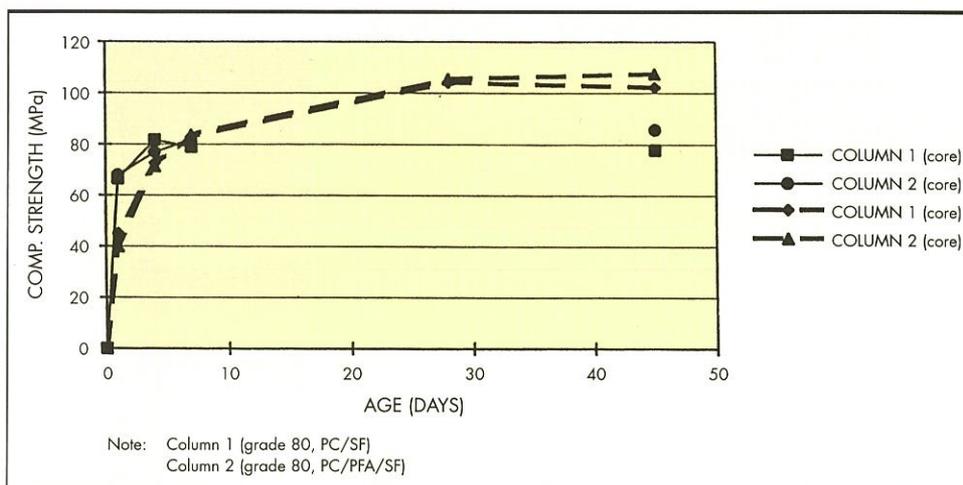


FIGURA 3.

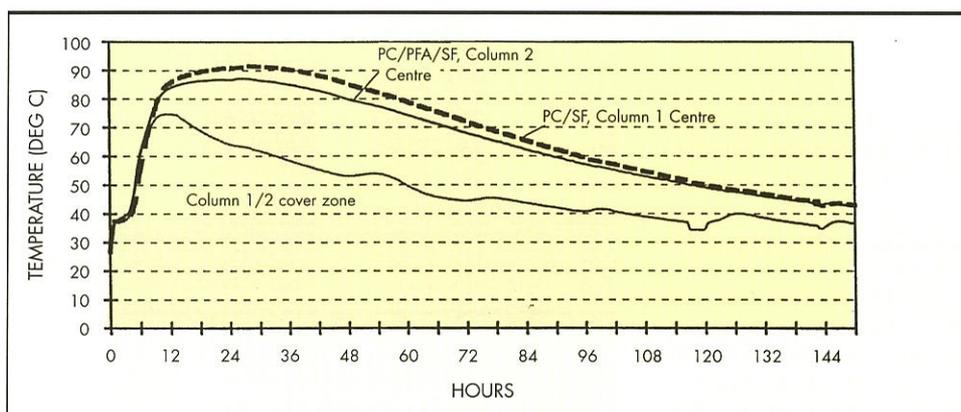


FIGURA 4.

La relación agua/(cemento + humo de sílice) solicitada inicialmente fue de 0,25. Sin embargo, finalmente se admitió 0,27 y este valor arrojó buenos resultados.

Respecto a los resultados de los ensayos de resistencia a compresión, ya citados en los anteriores comentarios sobre la figura 3, el valor medio de las probetas ensayadas se encontraba un 25% por encima de los 80 MPa (a 56 días) exigidos en proyecto y la desviación estándar era de un 10%. Se realizaron ensayos sobre probetas cilíndricas y cúbicas, siendo la relación entre las roturas de ambas de 0,85.

3. REALIZACIONES ESPAÑOLAS

Aunque existen algunas realizaciones españolas con HAR en el campo de la obra civil en general, cuyas referencias y mayor detalle se pueden encontrar en el Boletín nº 20 "Hormigones de alta resistencia. Fabricación y puesta en obra", del GEHO y en las actas del reciente "1º Congreso Nacional de Hormigón de Altas Prestaciones", en el más específico de la edificación sólo disponemos como experiencia conocida de estructura ejecutada con hormigón "in situ" el edificio "Natura Playa", sito en Alicante. Tiene un número de plantas variable entre 21 (19 sobre rasante y 2 sótanos) y 13 (12 y 1, respectivamente), según la zona de que se trate.

El tipo de hormigón empleado ha sido H700 (70 MPa de resistencia característica) en los pilares y H250 en el for-

jado reticular. En la tabla 9 se detalla la dosificación empleada.

Respecto al control de las características del material se realizó un seguimiento de la resistencia a compresión mediante la rotura de probetas cúbicas de 100 x 100 x 100 mm, obteniéndose un valor medio de 87,60 MPa. El criterio de aceptación estaba fijado en un valor comprendido entre 80 y 85 MPa a 28 días.

El control de la consistencia se llevó a cabo con la medición del asiento en cono de Abrams, encontrándose el mismo entre 21 y 24 cm.

	H-700
Cemento (I-45A) (kg/m³)	475
Humo de sílice (kg/m³)	38
Arena (0 a 5 mm) (kg/m³)	702
Grava (5 a 15 mm) (kg/m³)	1.088
Agua (l/m³)	150
Superfluidificante (l/m³)	16 + 6
Agua / (cemento + humo de sílice)	0,32

TABLA 9.

4. RESUMEN Y CONCLUSIONES

Tras la descripción efectuada en los apartados anteriores sobre las características del material empleado en las distintas obras, en éste se presentará un breve resumen de algunos de los aspectos tratados, así como se extraerán algunas conclusiones que puedan servir como datos de partida para futuras realizaciones.

Los aspectos considerados y las conclusiones alcanzadas son los siguientes:

- En edificios altos, en las últimas décadas, se ha producido una evolución en la tipología estructural por lo que al material empleado se refiere, pasando desde un claro dominio de las estructuras metálicas hasta un reparto con las de hormigón armado e, incluso, una preponderancia de estas últimas.
- Algunas de las razones que motivan el uso de HAR son:
 - Reducir la sección de los pilares frente a la obtenida con un hormigón convencional, aumentando la superficie útil del edificio.
 - Reducir la armadura longitudinal de los pilares.
 - Reducir el coste respecto a una estructura metálica.
 - Facilitar el acceso a materiales locales. En algunas ocasiones, y teniendo en cuenta la magnitud de algunas obras, es más fácil obtener las materias primas para fabricar hormigón que los elementos metálicos suficientes con un plazo y garantía de servicio razonables.
 - Mayor amortiguamiento intrínseco y menor vibración que con una estructura metálica. Por tanto, mayor confort para los usuarios.
 - Incremento del ritmo de obra, con reducción de los plazos de desencofrado respecto a un hormigón convencional.
- La resistencia característica de estos HAR se encuentra, normalmente, entre los 60 y los 85 MPa, siendo excepcional la exigencia de valores superiores.
- En cada estructura se emplean distintos tipos de hormigón, en función de la situación del mismo en la obra. La aplicación normal es en soportes y en muros de núcleos frente a viento en las plantas inferiores.
- La cuantía de cemento empleado se encuentra alrededor de los 450 kg/m³ de hormigón, existiendo pocas variaciones aunque lo haga la resistencia a compresión obtenida finalmente. Ésta se obtiene modificando, básicamente, la cuantía de humo de sílice o la relación agua/cemento.
- Para obtener un HAR, como confirman los estudios realizados, no es imprescindible el uso de humo de sílice hasta valores de la resistencia característica del orden de los 70 MPa. A modo de ejemplo que confirma esta aseveración se encuentra la dosificación de un hormigón C60 en el edificio de la Biblioteca de Francia. Sin embargo, su empleo garantiza la homogeneidad del resultado final y permite la obtención de una más alta resistencia a compresión. Las cuantías empleadas, en porcentaje del peso de cemento, se encuentran entre el 6 y 10%.
- El adecuado control de la relación agua/cemento o agua/(cemento + humo de sílice) es uno de los principales factores que permite la obtención de estas elevadas resistencias. Este último parámetro se encuentra en valores comprendidos entre 0,22 y 0,34, estando de forma más habitual entre 0,25 y 0,30.
- Con el reducido valor del parámetro anterior, se convierte en un aspecto fundamental el empleo de superplastificante en la dosificación del hormigón. Con valores comprendidos entre 5 y 20 l/m³, permite obtener una docilidad cuantificable mediante el ensayo del cono de Abrams en un descenso de 20 cm.
- El comportamiento frente al fuego del HAR es más desfavorable que el de un hormigón convencional por las razones expuestas en el punto 2.2. El uso de fibras de polipropileno mejora su resistencia al fuego.
- Los ensayos de resistencia a compresión del HAR se realizan con probetas cilíndricas y cúbicas (de 100, 150 o 200 mm). El empleo de las segundas en ocasiones tiene su origen en la capacidad de las prensas que se emplean en los laboratorios. La relación encontrada entre las roturas de ambos tipos de probetas es de 0,85 (respecto a las cúbicas de 100 mm).
- Los diagramas tensión-deformación obtenidos en el ensayo de probetas de hormigones con diferentes resistencias características (ver punto 2.1 y figura 2) indican que a medida que se incrementan las mismas lo hace también la fragilidad del material, perdiendo ductilidad. Este hecho lleva a incrementar la armadura de confinamiento, disponiendo en obra una cuantía superior de armadura transversal en los pilares.

5. BIBLIOGRAFÍA

- AGUADO, A. y GÓMEZ HERMOSO, J., "Realizaciones españolas", Jornada sobre hormigones de alta resistencia (Madrid), 1997.
- Council on Tall Buildings and Habitat, Relación de los 100 edificios más altos del mundo, 1998.
- GEHO, "Hormigones de alta resistencia. Fabricación y puesta en obra", Boletín nº 20, 1997.
- GURUSAMY, K. y PRINCE, W. F., "The Petronas Towers, Kuala Lumpur: Beneficial use of High Strength Concrete", Multi-purpose High-rise Towers and Tall Buildings (Londres), 1997, págs. 383 a 396.
- GÓMEZ HERMOSO, J., "Últimas realizaciones internacionales en edificación con hormigón de alta resistencia. Análisis, conclusiones y tendencias", 1º Symposium nacional de hormigón de altas prestaciones (Madrid), 1998, págs. 241 a 250.
- GÓMEZ HERMOSO, J., "El hormigón de alta resistencia en la edificación. Tipología estructural", Informes de la construcción, nº 455, 1998, págs. 5 a 25.
- HEGER J. y BURKHARDT, J., "Structural strength and ductility of reinforced frame structures from High Strength Concrete", 4th International Symposium on Utilization of High-strength/High performance concrete (París), 1996, págs. 1.505 a 1.514.
- HELD, M. y KÖNING, G., "First utilization of High-strength concrete in Germany", Structural Engineering International, vol. 2, nº 3, 1992, págs. 170 a 172.
- HU, Q. y ZHU, J., "Utilization of High-strength concrete in Tall Buildings", The structural design of tall building, vol. 3, nº 4, 1994, págs. 269 a 274.
- MONACHON, P. y GAUMY, A., "The Normandy bridge and the Société Générale Tower - HSC grade 60", 4th International Symposium on Utilization of High-strength/High performance concrete (París), 1996, págs. 1.525 a 1.536.
- PANEI, R. y PERRAULT, D., "Like an open book!? The National Library of France in Paris", L'industria italiana del cemento, nº 734, 1998, págs. 588 a 605.
- RAMADIER, C.; ROCHEFORT, H.; DUGAT, J. y VERRIER, R. "The Library of France", 4th International Symposium on Utilization of High-strength/High performance concrete (París), 1996, págs. 1515 a 1523.
- THORNTON, C.; MOHAMAD, H.; HUNGSPRUKE, U. y JOSEPH, L., "High Strength Concrete for High-Rise Towers", 67th Regional Conference of Council on Tall Buildings and Urban Habitat, 1996, págs. 447 a 458.