

Nuevos hormigones, nuevas posibilidades estructurales. Ejemplos de aplicación a puentes y edificios

Hugo Corres Peiretti

*Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Catedrático de Hormigón Estructural de la Universidad Politécnica de Madrid
Presidente de FHECOR Ingenieros Consultores
email:fhecor@fhecor.es*

Palabras Claves: hormigón ligero, hormigón de alta resistencia, hormigón autocompactable, aceros estructurales de alta resistencia.

I. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de nuevos materiales, nuevas tecnologías que pueden ser utilizadas en la industria de la construcción, el desarrollo de cada vez mas potentes medios de construcción son los que permitirán el desarrollo de las estructuras en el siglo XXI.

En el mundo de hormigón también existe esta tendencia y también el desarrollo de las estructuras de hormigón y sus posibilidades futuras esta vinculada a una relectura del pasado con estas nuevas posibilidades.

En este trabajo se muestran ejemplos de utilización de hormigones especiales en distintos puentes y edificios proyectados y, algunos de ellos, construidos en España.

2. VIADUCTO SOBRE EL RIO TAJUÑA

El viaducto tiene una longitud total de 2.000,00 m y una altura de 140,00 m, desde el fondo del valle del río Tajuña, debido a requerimientos medioambientales. Los condicionantes principales en la elección de la tipología eran la posibilidad de construcción en un periodo de 36 meses y que el coste económico fuese lo más reducido posible. El viaducto tiene 14 vanos de 40,00 + 3 x 70,00 + 150,00 + 5 x 250,00 + 150,00 + 2 x 70,00 + 40,00 m. El tablero tiene un ancho 24,00 m y sección cajón de canto variable. La parte central de los vanos de 250,00 m se realiza con hormigón ligero H-35, mientras que las zonas sobre pilas se realizan con hormigón de alta resistencia H-75. Para los vanos de 250,00 m, el proceso constructivo propuesto es el de avance por voladizos sucesivos. Las pilas presentan alturas de hasta 125,00 m en los vanos centrales, la sección tipo propuesta es la de cajón en la parte inferior y dos pantallas en la parte superior, el hormigón en toda la altura es de alta resistencia H-75.

Condicionantes geotécnicos

La cimentación de la estructura es profunda.

Condicionantes económicos

El condicionante económico es también un factor muy importante dado el volumen de la estructura, de manera que se han estudiado concienzudamente las posibles variantes de diseño y sus repercusiones económicas.

2.2 SOLUCION PROPUESTA

La solución adoptada consiste en un único tablero en forma de cajón de hormigón que recoge las dos calzadas de 24.00 metros de ancho, incluyendo una mediana de 2.00 metros de ancho, que incluye las barreras interiores.



Figura 2: Solución propuesta – Alzado

La longitud total del viaducto es de 1980.00 m. entre apoyos de estribos, repartidos en 14 vanos de luces: $40,00+3 \times 70,00+150,00+5 \times 250,00+150,00+2 \times 70,00+40,00$ m. El canto de la estructura es constante de 4.00 m en los vanos de 40,00 y 70,00 m, y variable en los de 150,00 y 250,00 m, desde 16.50 m, sobre pilas ($c/L = 1/15.2$), a 4.00 metros, en centros de vano ($c/L = 1/62.5$).

El ancho del cajón es de 7.50 m, por lo que los voladizos resultantes de 8.25 metros requieren el empleo de costillas transversales. La separación dada a estas costillas es de 5.00 m. mientras que su canto es de 1.40 m. La separación de 5.00 m. responde a la necesidad de situar no más de una costilla en cada dovela en que se divide el tablero para su construcción. El espesor de las almas es de 0.60 m, y el de la losa superior es de 0.32 m. El espesor de la losa inferior es variable desde 0.30 m, en los vanos de 40,00 y 70,00 m y en el centro de los vanos de 150,00 y 250,00 m, hasta los 2.50 m, en las secciones sobre las pilas 5 a 10.

El tablero se ejecutará con hormigón de alta resistencia y con hormigón ligero. La distribución de estos hormigones se explica en el siguiente apartado, referente al proceso constructivo, pero básicamente consiste en ejecutar los voladizos en hormigón ligero y el cajón en hormigón de alta resistencia salvo en el aproximadamente 70 % de los centros de los vanos de 150,00 y 250,00 m de luz, que también se ejecuta con hormigón ligero.

El pretensado dispuesto en los vanos de 40 y 70 m. es de 5 ó 6 parejas de tendones que se tesan al final de cada fase, además de un pretensado de continuidad en la losa inferior en los vanos de 70,00 m tesados con la estructura ya cerrada. El pretensado dispuesto en los vanos construidos en

dilatación y los amortiguadores que tienen unas dimensiones importantes, ya que el tablero del viaducto tiene 1984.4 m de hormigón sin juntas intermedias. Las cimentaciones son profundas tanto en pilas como en estribos, mediante pilotes de 1.80 m de diámetro. Las pilas 1 a 4 y 11 a 13 se cimentan con 9 pilotes bajo un encepado de 14,00 x 14,00 m. en planta y canto variable. Las pilas 5 a 10 se cimentan con 49 pilotes bajo un encepado de 36,00 x 36,00 m. y canto variable entre 8,00 y 3,00 m pretensado en las dos direcciones. Los estribos se cimentan mediante 6 pilotes bajo un encepado de canto constante de 3.00 m y dimensiones en planta variables.

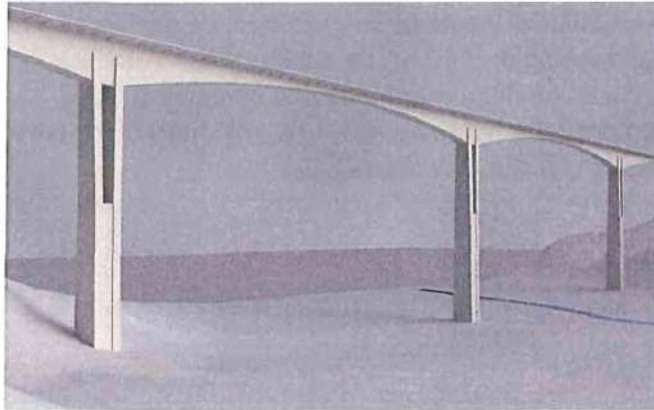


Figura 4: Solución propuesta – Vista en 3D.

2.3 PROCESO CONSTRUCTIVO

El proceso constructivo se realizará como se desarrolla a continuación:

- Ejecución de las cimentaciones.
- Ejecución de alzados de estribos y de pilas. El alzado de pilas se realizará con encofrados trepantes.
- Comienzo de la ejecución del tablero. Se podrá simultanear la ejecución de los vanos con autocimbra y los construidos por avance en voladizo.
- Vanos autocimbrados: la sección transversal se ejecutará en dos fases. En la primera se ejecuta el cajón con hormigón de alta resistencia HAR-75, con un ancho de losa superior de 9.5 m, y en la segunda se ejecutarán los voladizos con hormigón ligero HL-35 (ver figura 5).

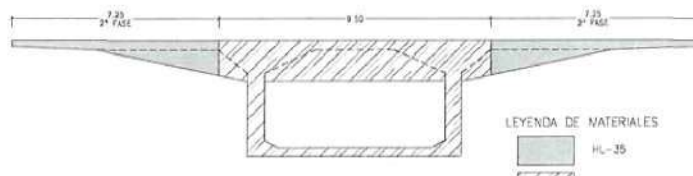


Figura 5: Fases de ejecución de la sección transversal en vanos autocimbrados.

Las etapas de construcción de la sección mediante autocimbra son:

- Ejecución del vano 1 y 1/5 del vano 2.

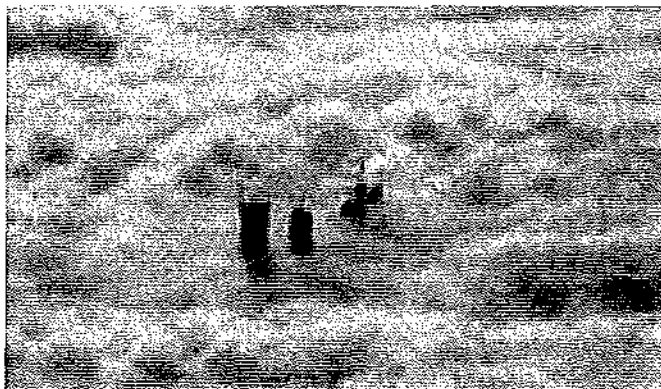
inyección del pretensado superior y el avance de los carros a la nueva posición. Cada una de estas fases puede durar entre 1 y 2 semanas, dependiendo de la dovela.

- Una vez ejecutada la dovela de cierre se procederá al tesado del pretensado de continuidad entre voladizos.
- En los vanos de 150,0 m quedará una dovela de cierre de 12.2 m de longitud entre la zona construida en avance en voladizo y la ejecutada con autocimbra que se ejecutará sosteniendo los encofrados desde los dos extremos ya contruidos. La sección a construir por este procedimiento será de 9.00 m de ancho en primera fase, como en la zona autocimbrada, pero de hormigón ligero HL-35 en lugar de hormigón de alta resistencia. Una vez curado el hormigón se tesará el pretensado de continuidad que cierra la estructura completa.
- Se procederá a construir los voladizos en segunda fase mediante carros laterales.
- Finalmente se realizarán los acabados.

3 TORRES ALTAS DE MADRID

Durante las últimas décadas del siglo XX y las primeras del XXI , ha habido una nueva explosión en el proyecto y construcción de edificios altos. La velocidad con la que la altura de los edificios ha crecido en este período se ha incrementado de forma extraordinaria. Mientras que la máxima altura que se había alcanzado, siglo XX, era de aproximadamente 500,00 m, en estos últimos años la altura se ha duplicado y hasta casi triplicado, con algunos proyectos aún no contruidos que superan los 1200,00 m. El hormigón con sus nuevas posibilidades ha recuperado un papel importantísimo en este tipo de estructuras, antes casi exclusivamente reservado al acero.

En Madrid se está terminando la construcción de cuatro torres de aproximadamente 250 m de altura, diseñadas por los arquitectos Norman Foster, Rubio y Alvarez-Salas, Cesar Pelli y Pei. En todas ellas se ha utilizado, de forma masiva, el hormigón estructural en diferentes formas: in situ o prefabricado, hormigón de distintas densidades, normal y liger, de distintas resistencias, normal y de alta resistencia, de distinta trabajabilidad, normal o autocompactable, condistintos tipos de armadura, armado pretensado, postesado, adherente o no adherente y en soluciones mixtas.



Elementos verticales

En la mayoría de las torres de Madrid se han utilizado pilares perimetrales mixtos de gran capacidad.

En los pilares perimetrales de la Torre de Cristal, que trabajaban fundamentalmente a compresión, se han utilizado pilares mixtos de sección exterior variable desde 0,95 m a 0,60 m de diámetro, con hormigón autocompactable H-45 y con perfiles de dimensiones decrecientes con la altura. En las plantas inferiores los perfiles eran tipo HD de acero HISTAR S 460 y con espesores de hasta 120 mm.

Debido a los espesores tan importantes de los perfiles y a la necesidad de acelerar al máximo la construcción, éstos trabajaban solo a compresión y por contacto. Para soportar las tracciones debidas a flexiones locales solo se tiene en cuenta la armadura pasiva.

Desde el punto de vista constructivo ha sido necesario desarrollar un sistema de construcción adecuado de los tramos metálicos, que garantizara unas condiciones geométricas de planeidad y perpendicularidad que minimizara problemas de contacto entre dos tramos de perfiles. Los pilares metálicos se fabricaban con tres alturas y se subían a su posición final con la armadura instalada. El hormigón autocompactable, minimiza los problemas de hormigonado, dada la densidad de armadura y la presencia del perfil en el interior. En este caso la resistencia necesaria para el hormigón no era demasiado exigente, C-45. En alguna de las otras torres, se han utilizado pilares mixtos de este tipo pero con perfiles más pequeños y la calidad del hormigón disminuye con la altura.

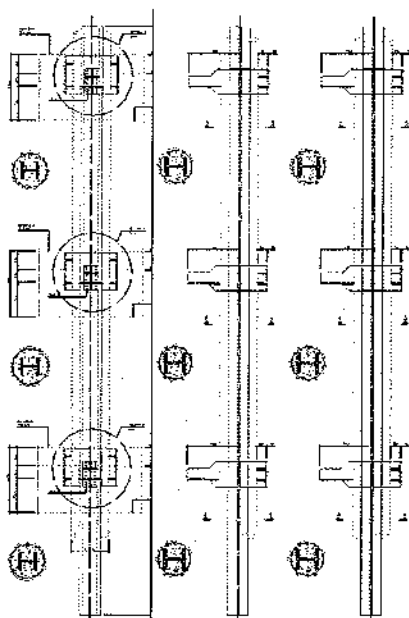


Figura 10: Planta de la estructura de la Torre de Cristal de 250,00 m de altura. Secciones transversales de los pilares mixtos utilizados.

Forjados

En la actualidad las soluciones para los forjados pueden ser múltiples. En las torres de Madrid, se han utilizado todos los sistemas posibles.

En la Torre de Sazyr – Vallehermoso y la Torre de Caja Madrid se ha utilizado el sistema más clásico, estructura horizontal mixta y forjados de chapa colaborante con hormigón ligero.

En la Torre de Cristal se ha utilizado un sistema atípico, estructura horizontal mixta con forjado de placas alveolares. Esta solución se adoptó porque los medios de elevación eran compatibles con la manipulación de las placas y porque se pensaba que esta solución permitía reducir los plazos de construcción. La construcción de una planta se realizaba en una semana.



Figura 13: Solución de forjados mixtos con chapa colaborante y hormigón ligero, Torre de Sacyr-Vallehermoso [6]

dirección de la estructura de hormigón. Las fuerzas de desvío se han resuelto con un atado con cables de pretensado, a nivel de la planta.

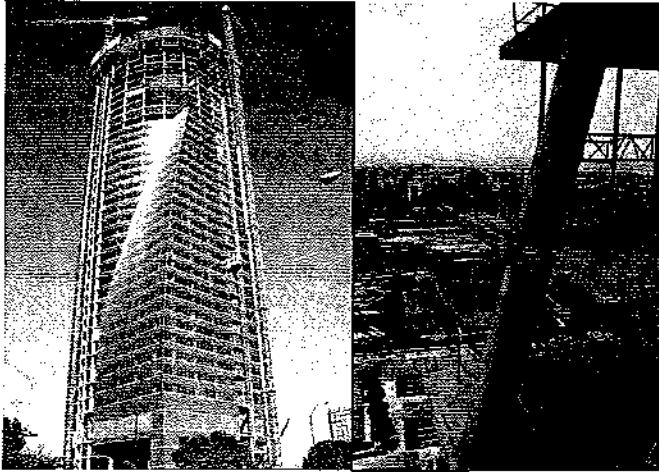
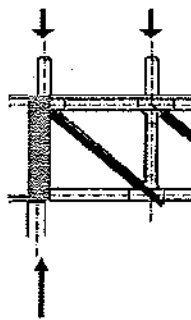
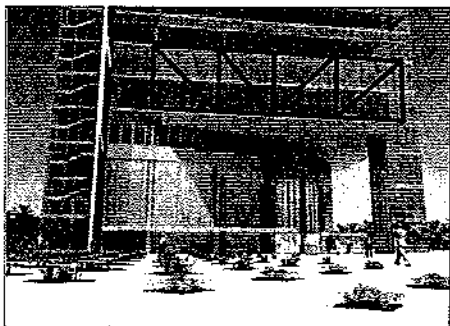


Figura 16: Inclinación e pilares en la fachada de Torre de Cristal y atado de las fuerzas de desvío con pretensado horizontal integrado en el forjado

En este tipo de edificios muchas veces, en las plantas inferiores en donde las cargas de los pilares son más importantes, hay que crear elementos de transición, porque los pilares se interrumpen. En el caso de la Torre Espacio se produce esta situación en la zona de lobby de entrada y se ha resuelto con una celosía mixta, de una planta de altura. El cordón superior e inferior son elementos mixtos integrados en las losas. Los montantes y diagonales son elementos mixtos, cajones de acero rellenos de hormigón. En el caso de los montantes, sometidos a compresión el hormigón estabiliza las chapas del cajón y contribuye a la capacidad resistente. En las diagonales traccionadas se trata de cajones de acero con pretensado. El pretensado precomprime el cajón para aumentar la capacidad resistente a tracción.



Las nuevas posibilidades resistentes, tecnológicas y constructivas del hormigón obligan a la revisión del alcance de su uso de este material en todas las tipologías y, por supuesto, en los edificios de altura.

Un uso acertado, inteligente y creativo de estas posibilidades extiende el campo de posibilidades de este material y abre nuevas posibilidades de proyecto hasta ahora no contempladas

El autor de este trabajo no quiere dejar de expresar su agradecimiento y devoción a todos los integrantes de su equipo, tanto en Fhecor Ingenieros Consultores como en la ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, ya que sin ellos nada de todo este trabajo a lo largo de los últimos 25 años hubiera sido posible. Gracias.

5 . REFERENCIAS

- [1] MATHIVAT, J. Construction par encorbellement des ponts en béton précontraint. Éditions Eyrolles 1979.
- [2] EN 1992-1-1. Eurocode 2 : Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings. European Committee for Standardisation. 1992.
- [3] MARÍ BERNAT, A. (Coord.) Recomendaciones para el proyecto de estructuras de hormigón de alta resistencia. Monografía M-8. Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural. Madrid 2004.
- [4] MARÍ BERNAT, A.; CLADERA BOHIGAS, A. “Bases de cálculo para el hormigón de alta resistencia.” Hormigón y Acero. Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural. Madrid 2003.
- [5] GAYO MARTÍN-NIETO, I. “Características técnicas y aplicaciones con hormigón ligero” Hormigón y Acero. Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural. Madrid 2003.
- [6] GÓMEZ NAVARRO, M. Proyecto y construcción de dos torres de 235 m de altura en Madrid: Similitudes y diferencias entre estructura mixta y estructura de hormigón. XVII Curso Master CEMCO. Jornada J5: ACHE y el hormigón estructural. Instituto Eduardo Torroja. Madrid, 15 de junio de 2007.
- [7] GÓMEZ HEMOSO, J. Proyecto y construcción de edificios altos. XVII Curso Master CEMCO. Jornada J5: ACHE y el hormigón estructural. Instituto Eduardo Torroja. Madrid, 15 de junio de 2007.
- [8] ROMO MARTÍN, J. Cargas horizontales - edificios en altura. Curso de Especialidad en Cálculo Estructural: Concepción Estructural del Edificio. Máster en Estructuras de la Edificación.