

Las cuatro torres del centro de negocios cuatro torres de Madrid

Martínez Pañeda, Miguel
miguelmpaneda@hotmail.com

Palabras clave: Estructura, Madrid, Centro de negocios Cuatro Torres, edificios en altura, Torre Bankia, Torre PwC, Torre Cristal, Torre Espacio.

Resumen

El complejo Cuatro Torres Business Area se compone de cuatro edificios en altura que dan una respuesta diferente a una misma situación y a un mismo problema. En este estudio se pretende describir y comentar mediante un análisis comparativo, las respuestas estructurales con las que cada una resuelve el problema del edificio en altura, así como los condicionantes a los que responde en la toma de decisiones.

Si bien el esquema general de la estructura de cada torre es completamente diferente, se puede diferenciar entre las tres situadas más al Norte -la Torre Espacio, la Torre de Cristal y la Torre PwC y la Torre Bankia, por estar las tres primeras realizadas con un núcleo central de comunicaciones como articulador de la torre, frente a los núcleos de comunicaciones separados y situados en el contorno con los que fue diseñada la Torre Bankia.



Figura 1: Vista general del complejo.

1 Introducción

En la continuación del eje de la Castellana, en la antigua Ciudad Deportiva del Real Madrid, se sitúa el Cuatro Torres Business Area (CTBA). Es un complejo de cuatro edificios de 250 m de altura que se convierten en los nuevos edificios más altos de España. Dejan atrás por 100 m al anterior edificio más alto de Madrid, la Torre Picasso, y por 65 m al Gran Hotel Bali de Benidorm que se erigía como el edificio más alto de España. Situadas todas en un mismo solar, y con un uso mayoritario de oficinas, nos presentan diferentes formas de enfrentarse a un mismo problema.

La especificidad de las construcciones en altura

Los edificios en altura tienen la particularidad de que, a partir de cierta altura, empiezan a tomar mayor protagonismo las acciones horizontales frente a las verticales que habitualmente condicionan la estructura del edificio. El funcionamiento de un edificio en altura se puede asemejar al de una ménsula empotrada en el terreno con la flexión inducida por la carga de viento como principal esfuerzo a resistir.

En los edificios en altura, la condición crítica de la estructura se halla en los movimientos horizontales que se producen en cabeza de la torre. Especialmente, la aceleración que se produce, no ya por los daños que puedan producir los movimientos horizontales, sino por la incomodidad para los usuarios por la percepción de los movimientos del edificio. Por ello, para optimizar la estructura de una torre se deberá situar la masa estructural en el contorno para dotarla así de mayor inercia frente a las fuerzas horizontales. A su vez, se deberá procurar que los elementos encargados de resistir los esfuerzos horizontales reciban suficiente carga gravitatoria para poder así resistir mejor a flexocompresión. La forma óptima estructural básica de una torre podría asemejarse a la de una chimenea, con toda la masa estructural situada en el contorno y recibiendo toda la carga.

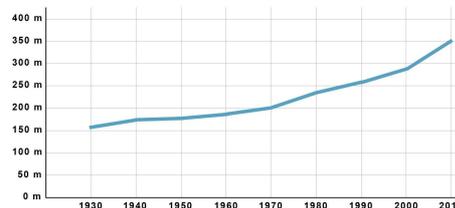


Figura 2: Altura media de los 100 edificios más altos del mundo

Contexto estructural

Los primeros edificios en altura se empezaron a construir en los Estados Unidos en el siglo XIX como respuesta a la falta de espacio en el centro de las ciudades. Desde entonces se ha visto incrementada notablemente la construcción de edificios en altura, tanto en número como en altura (Figura 2). Su construcción ha ido variando en diferentes tipos, tanto con el tiempo, como con la altura. Desde las primeras construcciones, realizadas con muros, se pasó a estructuras de pórticos metálicos de nudos rígidos, al uso de cinturones de rigidez y a la estructura de tubo dentro de tubo, con un núcleo central y unos pilares exteriores solidarizados con este. En 1950, Fazlur Khan definió los diferentes tipos estructurales y estableció unos límites teóricos óptimos, tanto inferior como superior, para cada uno de ellos. Abarcando desde los más sencillos, para alturas reducidas, a otros tipos más elaborados, como el de tubo exterior diagonalizado o el uso de amortiguadores de inercia para alturas superiores a los 450 metros. Paralelamente a la evolución de los tipos, con la altura también han ido evolucionando los materiales, pasando de las estructuras de acero de las primeras construcciones a estructuras mixtas de hormigón y acero y al uso muy frecuente de hormigones de alta resistencia.

Actualmente el edificio más alto construido es el Burj Dubai de 829 m, y ya existen proyectos de rascacielos de más de un kilómetro de altura, con lo que la construcción de edificios de gran altura, de 250 metros, como en el caso que nos ocupa, se ha convertido en algo normal en el panorama internacional.

2 Cuatro Torres Business Área (CTBA)

Torre Espacio

La Torre Espacio, de 223 m de altura y 57 plantas sobre rasante, se sitúa en la esquina noreste de la parcela. Fue diseñada por los arquitectos Pei, Cobb, Freed & Partners y, con un uso de oficinas, presenta una planta cuadrada en base de 42 x 42 m. La torre tiene una esbeltez global de 5,3. Fue concebida como un elemento que surgía del terreno que, como un ser vivo, evoluciona hasta convertirse en la intersección de dos cuartos de circunferencia.

La estructura, que fue desarrollada por el estudio de ingeniería MC-2, dirigido por Julio Martínez Calzón, partía de una imposición previa determinante impuesta por el grupo promotor: el material principal para su desarrollo debía de ser el hormigón.

Cimentación

La cimentación de la torre Espacio se realiza mediante una losa superficial de hormigón postesado de 4 metros de canto, y superficie mayor que la proyección de la torre. El postesado se dispone en la zona central paralelo a las dos direcciones de la losa, recibiendo las cargas de los núcleos de comunicación (Figura 4).

Esquema general de la estructura

La Torre Espacio se compone de núcleo central rectangular continuo, dos secundarios dispuestos en el eje mayor del óvalo, en forma de C, y dos familias de pilares situados en la fachada del edificio (Figura 5a). El núcleo central, que funciona como una pieza continua pese a estar perforado para el paso a los ascensores y de las instalaciones, es el principal elemento resistente frente a las acciones de viento, de flexión y de torsión, originadas estas últimas a causa de la asimetría de la planta. La calidad de su hormigón va decreciendo con la altura, pasando del uso de hormigones de alta resistencia HA-70 en planta baja, a HA-40 y a HA-30 en coronación. Los núcleos secundarios, con una menor rigidez por estar abiertos, colaboran con los esfuerzos de viento gracias a la rigidez de los forjados de losa maciza, que actúan como conectores. Con la altura, los núcleos secundarios desaparecen según va finalizando el uso de sus ascensores y son sustituidos por sendos pilares en sus extremos (Figura 5b).

Para resistir mejor las acciones de viento, a 2/3 de la altura total de la torre se dispone un cinturón de rigidez que conecta el núcleo central con los pilares que siguen la forma del óvalo final. El cinturón de rigidez está formado por dos pantallas perimetrales que conectan los pilares de fachada y cuatro que prolongan los lados del núcleo y lo conectan con las perimetrales (Figura 5c). Se realiza con hormigón pretensado HP-80 y ocupa toda una planta de canto, siendo sus cordones los forjados superior e inferior, de 43 cm de espesor, que se ven reforzados por una mayor densidad de armadura y un pretensado.

Elementos estructurales

En la Torre Espacio se pueden distinguir dos órdenes de pilares, por una parte los que forman el perímetro del óvalo de coronación y son continuos en toda la altura de la torre, y, por otra parte, los que forman el perímetro del cuadrado de la base. Los que forman el perímetro del óvalo transmiten una gran carga gravitatoria y, gracias a la rigidez de los forjados y al cinturón de rigidez que los vincula con el núcleo, actúan también frente a los esfuerzos horizontales. Por las grandes cargas que han de soportar recurren a hormigones de alta resistencia HA-70 en la parte baja, y, al igual que en los núcleos, se va reduciendo la calidad con la altura a HA-40 y a HA-30. Para



Figura 3: Torre Espacio. Vista general.

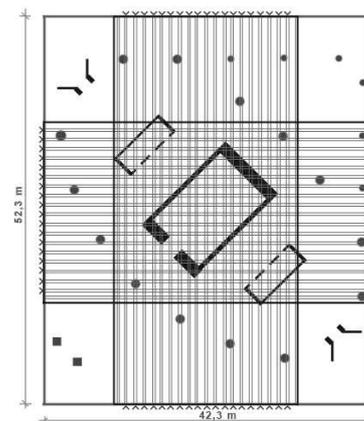


Figura 4: Torre Espacio plano de cimentación.

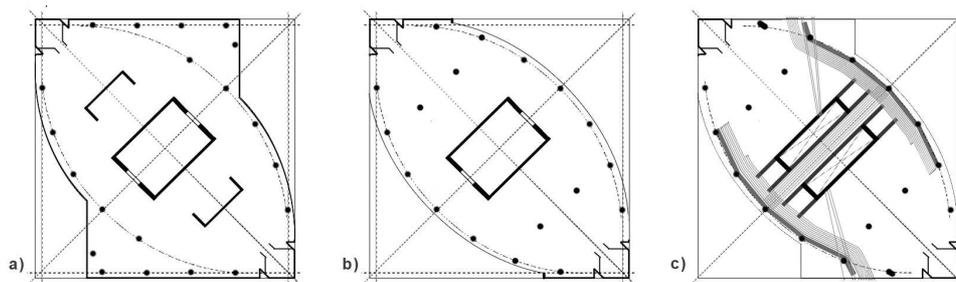


Figura 5: Diferentes plantas de la Torre Espacio: a) Planta inferior, b) planta alta c) estructura estabilizadora con el anillo rígido.

mantenerse en diámetros de 120 cm en la parte subterránea, 100 cm en la base y 60 cm en la parte media y alta, se recurre a grandes cantidades de armado, con un 3 % de armado en la base, dispuesto en una doble corona. En las zonas de acceso, para evitar excesivas dimensiones se recurre a un perfil metálico HEM embebido en el pilar y reforzado por una corona de armadura. El armado de la parte media y superior se dispone en una corona y ocupa desde un 2 a un 5 % de la sección del pilar (Figura 6). Los pilares situados en el perímetro de la base, que al ir aumentando en altura van desapareciendo, reciben una menor carga vertical y apenas tienen trascendencia en la resistencia frente a los esfuerzos laterales. Acompañan a la fachada y se inclinan en dos de sus caras. Como consecuencia de la simetría polar de la planta, la inclinación de los pilares no influye negativamente al autoequilibrarse.

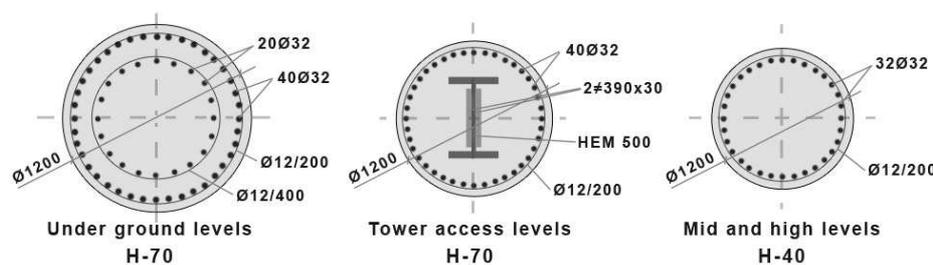


Figura 6: Secciones tipo de los soportes: bajo rasante, zona de acceso a la torre y zonas media y altas de la torre.



Figura 7: Vista de la entrada de la Torre Espacio.

Los forjados, que salvan luces de hasta 12 metros, se realizan de losa maciza de hormigón armado de 28 cm de espesor, con 35 cm en zonas especiales. La rigidez de los forjados permite la transmisión de esfuerzos horizontales que, colaborando con el cinturón de rigidez, garantiza el trabajo conjunto de toda la estructura frente a las acciones de viento.

Para resolver el encuentro entre los forjados de losa maciza de hormigón HA-30 y los pilares fuertemente cargados realizados en hormigones de alta resistencia HA-70, se realiza un zunchado en su encuentro con 5 cercos circulares Ø25 que aumentan la resistencia del forjado.

Con el objetivo de adaptarse a la variación de la geometría de la planta, se produce un desplazamiento horizontal de algunos soportes mediante bloques rígidos de hormigón desde la posición inicial a la final en las plantas técnicas M1 y M2, en la base y en el cinturón de rigidez respectivamente. Las fuerzas horizontales que se originan se compensan con pretensados y refuerzos de armadura pasiva en los forjados superior e inferior.

En el acceso, la Torre Espacio, para permitir una entrada de mayor entidad, apea los pilares perimetrales de sus fachadas Sur y Oeste, excepto el de esquina (Figura 7). Para ello se sirve de una gran celosía metálica de 8 m de canto que salva una luz de 27,8 m y que se conecta a los forjados superior e inferior formando cordones mixtos.

Cristal Tower

La Torre de Cristal, obra de los arquitectos Cesar Pelli & Associates, alcanza los 250m con sus 52 plantas. Con un uso de oficinas, se sitúa al sur de la Torre Espacio en el extremo oeste de su parcela. Tiene una planta rectangular de 49 x 33m y una esbeltez global de 7,6. El volumen del edificio responde a la idea escultórica de que el proyecto se va plegando sobre sí mismo con la altura, dando lugar a que todas las plantas sean diferentes entre sí.

Ya desde la fase de anteproyecto se insinúa la estructura en forma de un gran núcleo central vertical de servicios que liberaba la fachada y que permitía asimilar la forma de la torre a la de una piedra preciosa, que finalmente la consultora de estructuras Otep Internacional se encargaría de resolver.

Cimentación

La cimentación de la Torre de Cristal se resuelve mediante una cimentación profunda por pantallas de 20m de longitud y 120 cm de espesor. Con una losa superficial de 150 cm que trabaja conjuntamente con las pantallas, estas se sitúan bajo el núcleo central y bajo los pilares. Las pantallas, conectadas entre sí, trabajan como una sola unidad. Transmiten la carga por punta y por fuste.

Esquema general de la estructura

La Torre de Cristal se diseña con un gran núcleo central que engloba todas las comunicaciones y servicios y una serie de pilares perimetrales que acompañan la fachada del edificio y que sujetan la estructura de forjado (Figura 9). El gran núcleo central dispone sus paredes fuertes, de espesores de 120 cm en la base y 70 en coronación a favor de la orientación con mayor fachada del edificio, a fin de contrarrestar las mayores fuerzas de viento. En el otro sentido, los diafragmas de unión son de 50 cm de espesor (Figura 9).

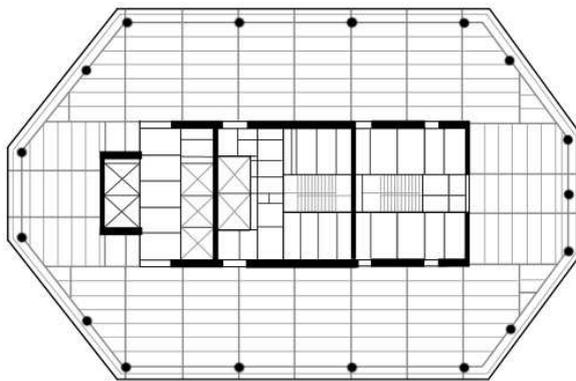


Figura 9: Planta tipo forjado torre de Cristal.

Pese a disponer de estructura perimetral, el núcleo es el elemento encargado de resistir casi la totalidad de los esfuerzos laterales de viento a consecuencia de la escasa rigidez del forjado y de la no existencia de un cinturón de rigidez que solidarice el conjunto.

Elementos estructurales

La Torre de Cristal tiene 18 pilares perimetrales mixtos, con un perfil HD recubierto de una corona de hormigón armado. Alcanzan diámetros de 95 cm en la base y 70 cm en la coronación. En algunas plantas se inclinan, siguiendo a la fachada, compensando las fuerzas de desvío mediante armaduras postesas desde el pilar respectivo al núcleo.



Figura 8: La Torre de Cristal. Vista general.

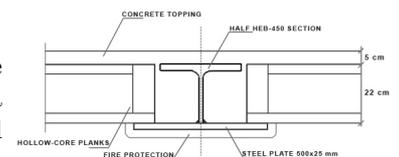


Figura 10: Sección tipo de viga exterior al núcleo



Figura 11: Vista general de la Torre PwC.

Pese a su geometría no ortogonal y variable, el forjado se resuelve mediante una solución prefabricada de placas alveolares de 22+5 cm sobre viguería metálica. Dispuestas una serie de vigas perimetrales entre los pilares, se apoyan sobre estas otra serie de vigas perpendiculares a la fachada y que nacen en el núcleo. Estas vigas secundarias se apoyan alternativamente en el pilar y en el centro de la viga perimetral, de modo que cuando descansan sobre la viga, continúan en un vuelo de 110 cm hasta la fachada, soportando el forjado en voladizo con un nervio de borde que hace el efecto de zunchado del forjado. La losa alveolar se apoya sobre las viguetas perpendiculares a la fachada, que están compuestas de medio HEB-450 y una chapa de 50 cm como ala inferior a fin de garantizar un correcto apoyo de la losa (Figura 10). En la parte interior al núcleo, a causa del gran número de huecos existentes en el forjado, se decide plantear un forjado a base de una chapa metálica plegada que funciona como encofrado perdido de una losa aligerada de hormigón armado de 20+7 cm de canto que se apoya sobre viguería metálica empotrada en los muros del núcleo.

En el acceso, en este caso, no se produce ninguna variación en la estructura. Para marcar la entrada se limita a realizar un cambio en la geometría de la fachada y una planta baja de mayor altura.

Torre PwC

Con un uso mayoritario de hotel, la torre PwC (antigua torre Sacyr-Vallehermoso) es la única que solo destina un tercio de su espacio al uso de oficinas. Situada justo al Sur de la Torre de Cristal, fue proyectada por el estudio español de arquitectos de Enrique Álvarez Sala y Carlos Rubio Carvajal. Con sus 236 m, 52 plantas y una esbeltez de 5,9, la torre está dividida en planta en 3 sectores diferentes, que se formalizan al exterior por medio de grietas en la fachada que iluminan el núcleo trilobular central. Tanto su planta como su estructura están marcadas por un aprovechamiento máximo para su uso hotelero.

El estudio de Ingeniería MC-2, que se había encargado anteriormente de plantear la estructura de la Torre Espacio, también se encarga de la estructura de la Torre PwC.

Cimentación

En la Torre PwC se recurre al mismo sistema usado anteriormente en la Torre Espacio, una losa de hormigón postesado de 4 m de canto y planta mayor que la de la torre. Y al igual que la anterior, se ven en la necesidad de reforzar el encuentro de los pilares con la losa. Dadas las dimensiones de la losa, el hormigonado se realiza en varias fases, separando la losa en dos de 2 metros cada una, en las que es necesario disponer de armadura de conexión a rasante entre ellas. Los soportes y los núcleos, para transmitir convenientemente los esfuerzos de tracción que aparecen bajo solicitaciones extremas de viento, se anclan a la base de la losa. La puesta en tensión de los cables del postesado se llevó a cabo en su totalidad con antelación al inicio de la construcción de soportes y núcleos.

Esquema general de la estructura

El núcleo de la torre PwC, situado en el centro de la torre, tiene una forma trilobular (Figura 12). Presenta la rigidez concentrada en las posiciones extremas en forma de machones con varias capas de armado, a fin de dotar de mayor inercia al conjunto. En sus pantallas radiales disminuye su espesor, y finalmente lo reduce al mínimo en el triángulo que deja en el centro, pasando a espesores de 30 cm. Al igual que ya ocurría en la Torre Espacio, el núcleo se encuentra agujereado para permitir el paso de personas e instalaciones, por lo que el dintel sobre el hueco se dimensiona para que trabaje todo como una unidad a pesar de los alveolos. El núcleo es el elemento principal para resistir los empujes de viento. Su forma interior es continua en todo el edificio, conteniendo en su interior los ascensores y servicios, variando únicamente los espesores y las resistencias del hormigón de sus paredes, pasando de HA-45 a HA-30 en el último tercio.

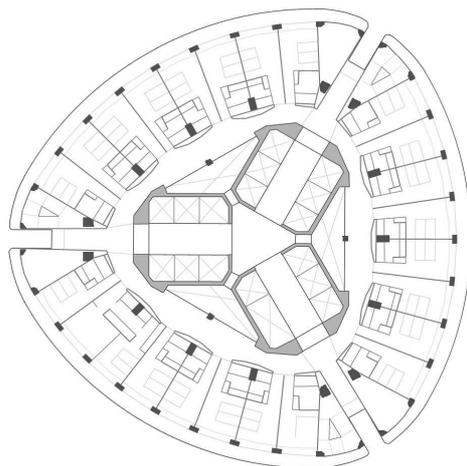


Figura 12: Planta tipo hotel torre PwC.

Para rigidizar la estructura, solidarizando los pilares con el núcleo central, la torre PwC dispone de un cinturón de rigidez en la última planta que une los pilares centrales con el núcleo mediante una estructura de pantallas radiales de 80 cm de espesor y 5 m de canto con los forjados como cordones superiores e inferiores. El cinturón de rigidez, aparte de solidarizar la estructura frente a las acciones de viento también, por su gran rigidez, reduce los acortamientos diferenciales entre el núcleo y los pilares a causa de la retracción y la fluencia del hormigón. En este caso su dimensionado se vio muy condicionado por las cargas gravitatorias a largo plazo que transmitía de los pilares al núcleo.

Elementos estructurales

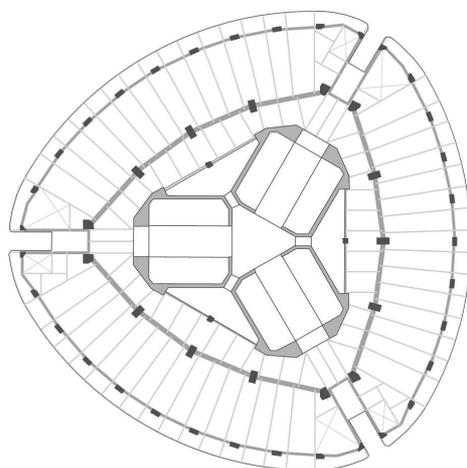


Figura 13: Disposición de la estructura en la planta tipo de la Torre PwC.

En la Torre PwC los soportes están distribuidos atendiendo a la partición del hotel. Se disponen en tres anillos: una corona perimetral, unos centrales en el pasillo del hotel y otros interiores junto al núcleo. La forma de los pilares va cambiando adaptándose a la planta, variando entre rectangular, circular o formas especiales en los soportes exteriores, en su encuentro con las escaleras (Figura 13). En las plantas de acceso y hasta la cimentación, por las grandes cargas, se recurre a un pilar de diámetro entre 150 y 120 cm realizado con hormigón HA-70 con doble corona de armadura. Por encima de la cuarta planta, para disminuir las dimensiones de los soportes en el hotel y permitir un montaje más rápido de la estructura de los forjados, se plantean pilares con un perfil metálico embebido en el hormigón. Para simplificar la unión entre los pilares

metálicos embebidos, se diseñan de modo que una vez vertido el hormigón, el pilar metálico no soporte tracciones, aguantando únicamente las producidas por el viento durante el período de montaje al ir la construcción en acero 3 plantas adelantada respecto al hormigonado. Las armaduras perimetrales serán las encargadas de resistir las tracciones que aparezcan en los soportes.

Los forjados por debajo del nivel N04 de la torre se realizan mediante una losa maciza de hormigón armado, tanto por las cargas y por la disposición de huecos y soportes, como por las luces mayores que aparecen. En las plantas de la torre por encima del nivel N04 se plantea una estructura horizontal mixta de acero y hormigón. Se utiliza una chapa plegada colaborante, con una capa de hormigón de compresión, apoyada sobre viguería metálica dispuesta de conectores. Se forman tres anillos de vigas, atornilladas a los tres anillos de soportes respectivamente. Sobre el anillo exterior pasan las viguetas radiales que sostienen el voladizo de las dos capas de fachadas. El perímetro curvo exterior se resuelve mediante un elemento rigidizador de borde y remate de forjado de direcciones variables en forma de un cajón metálico que se apoya en las viguetas radiales y actúa como encofrado colaborante del hormigón.

En la torre PwC entre las plantas N04 y N06, se efectúa el apeo de uno de cada dos soportes a fin de conseguir un mejor funcionamiento de las plantas de acceso. Dicho apeo se realiza mediante bielas inclinadas de hormigón de alta resistencia con un perfil metálico embebido y reforzados con armadura que ocupan las dos plantas. Estos desvíos se equilibran en el nivel inferior mediante tirantes, que en algunos casos precisan de la colocación de perfiles metálicos para recoger el desvío.



Figura 14: Torre Bankia. Vista general.

Torre Bankia

La Torre Bankia (antigua Torre Caja Madrid), obra del estudio de arquitectura Foster + Partners cierra la parcela del complejo por la esquina sureste. Con 250 metros de altura y 42 plantas, es el edificio más alto de España y el décimo de Europa. Con unas dimensiones de 53 x 43 m en planta, y una esbeltez de 11 está completamente destinado a oficinas. Proyectualmente prima desde el primer momento la idea de crear un espacio de oficinas diáfano lo más flexible posible, que será la idea que marcará todas las decisiones del proyecto.

Se desarrolla una estrecha colaboración desde el primer momento entre el equipo proyectual y el equipo de ingeniería de Halvorson & Partners, encargados de la estructura. La torre se plantea como un “mega pórtico”, donde el núcleo, que se divide en dos y que se convierten en los soportes del “mega pórtico”, se unen en cuatro puntos por dos familias de grandes cerchas, sujetando bloques de 11, 12 y 11 plantas entre los dos núcleos.

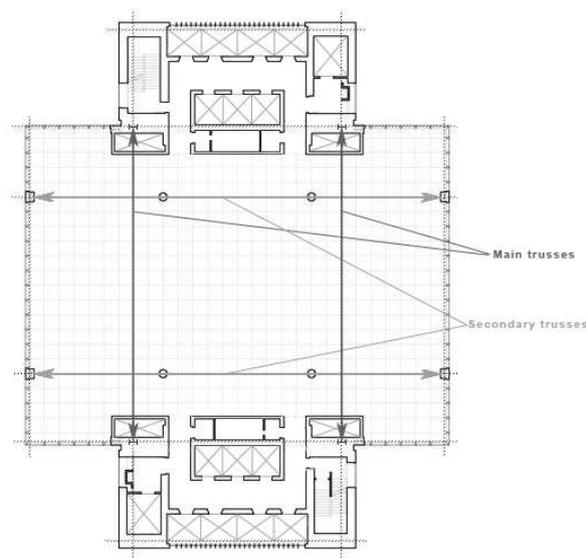


Figura 15: Planta tipo torre Bankia con la proyección de las cerchas.

Cimentación

La Torre Bankia transmite las cargas al terreno directamente desde los dos núcleos principales, al ser estos los únicos elementos que llegan de la torre a planta baja y a la cota de cimentación. La cimentación se realiza mediante una losa superficial de hormigón armado de dimensiones más grandes que la huella de la torre con 5 m de canto. Para su ejecución se realizó el hormigonado en dos fases diferentes de 2,5 m cada una.

Esquema general de la estructura

En la Torre Bankia cobran especial importancia sus dos núcleos, que, siendo continuos en toda la dimensión de la torre, están separados uno en el extremo este y otro en el oeste de la torre, y son los encargados de transmitir todas las cargas verticales a la cimentación. Los tres bloques de oficinas de 11, 12 y 11 plantas les transmiten las cargas a los núcleos a través de dos familias de cerchas, perpendiculares entre sí. Los núcleos son también los encargados de resistir las fuerzas de viento, ya sea en la dirección este-oeste, donde, unidos por las cerchas, actúan como un “mega-pórtico” con una gran resistencia, o en la dirección norte-sur, donde funcionan como una doble ménsula en la que cada núcleo asume su parte de carga de viento. Sus muros están realizadas con hormigones HA-55 y HA-40 y espesores variables desde los 30 cm hasta los 120 cm.

Para transmitir las cargas de los bloques de oficinas y para atar y solidarizar los núcleos se disponen de tres grupos de cerchas bajo los diferentes bloques y de sendas vigas pared en coronación. Estos grupos de cerchas se componen de dos cerchas principales que van de un núcleo a otro y dos secundarias que, perpendiculares a las anteriores, reciben la carga de los 8 pilares y se la transmiten a las principales (Figura 15). El esfuerzo de atar los núcleos frente a las cargas de viento es el que más las penaliza, por lo que el cordón superior de las cerchas principales se encuentra sobredimensionado respecto a las cargas.

Elementos estructurales

La Torre Bankia es un caso particular, puesto que ningún pilar llega al suelo (Figura 16), sino que todos transmiten su carga a los dos grandes núcleos verticales a través de las cerchas. En planta solo hay 8 pilares, 4 interiores y 4 en fachada, separados por luces máximas de 15 y 18 metros. A fin de reducir su dimensión al mínimo todos ellos son perfiles metálicos. Los pilares son continuos en su longitud, estando dimensionados a fin de poder funcionar en estado habitual a compresión apoyados sobre su cercha inferior o, en el caso de que esta tuviera algún fallo, funcionar a tracción colgados de la cercha inmediatamente superior a través de un detalle especial de unión.

Se emplea un forjado de chapa colaborante de 7,5 + 7,5 cm donde, por tener que salvar grandes luces, se utiliza una chapa de 1 mm y una capa de compresión de hormigón aligerado de 18 kN/m³. Dadas las grandes luces que salva el forjado, la chapa se apoya sobre vigas metálicas de ala ancha que están provistas de conectores que aseguran el trabajo conjunto con el hormigón. A norte y a sur, el forjado vuela 9 m respecto a los núcleos, dándose a su vez un vuelo en las esquinas al no disponer de ningún pilar, solo los 8 interiores (Figura 17). Como caso especial, sobre las plantas técnicas, para asegurar un mejor aislamiento acústico, se sustituye el hormigón ligero por hormigón de densidad normal y se aumenta la capa de compresión a 15 cm. En la fachada de cada bloque de oficinas, para mejorar su comportamiento, se forma una estructura Vierendeel con los pilares de fachada y las vigas de borde.

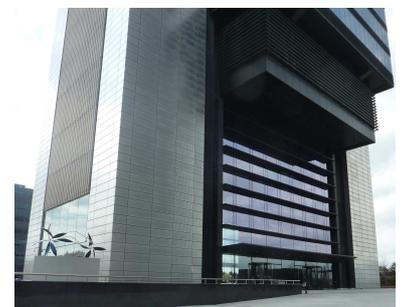


Figura 16: Vista del acceso diáfano a la Torre Bankia Tower.

3 Comparación de las cuatro soluciones

Cimentación

La cimentación de las cuatro torres se realizó sobre un mismo terreno de toscos arenosos (un suelo arcilloso con algo de arena fina), que empezaba a partir de los 15 m

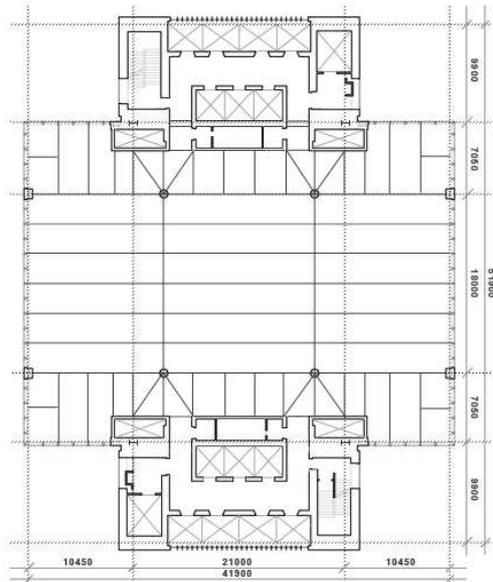


Figura 17: Planta tipo forjado torre Bankia.

a los 25 m de profundidad. Tiene una resistencia admisible de 715 kPa. Únicamente se detectaron aguas freáticas en algunos puntos, entre 13 m y 16 m de profundidad, en la zona sur del complejo.

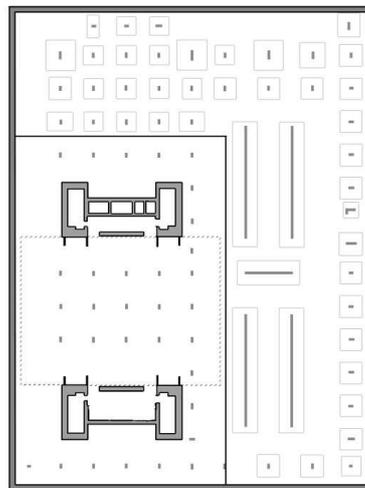


Figura 18: Plano de cimentación de la Torre Bankia.

La Torre de Cristal es la única que realiza una cimentación profunda, por pantallas, con una losa superficial a modo de encepado de 150 cm de canto. Las pantallas tienen 20 m de longitud y 120 cm de espesor.

En el resto de torres se descartó la cimentación profunda por pantallas o por pilotes, pese a que los asentamientos producidos eran menores, a consecuencia del excesivo canto que tomaba la losa de encepado que recibiría los pilotes. Resultando la losa de encepado casi del mismo tamaño que una losa superficial continua.

En la torre Espacio y en la PwC, desarrolladas por el mismo estudio de ingeniería MC-2, se recurrió a una losa superficial de hormigón armado y postesado de 4 m de canto. Ya que el postesado ayudaba a reducir el volumen y las capas de acero a disponer en la losa, así como aseguraba una mejor durabilidad, evitando la aparición de fisuras en el hormigón en contacto con el terreno.

En la Torre Bankia se estudió la posibilidad de hacer una cimentación aislada de cada núcleo por separado, pero, para evitar la posible aparición de asentamientos diferen-

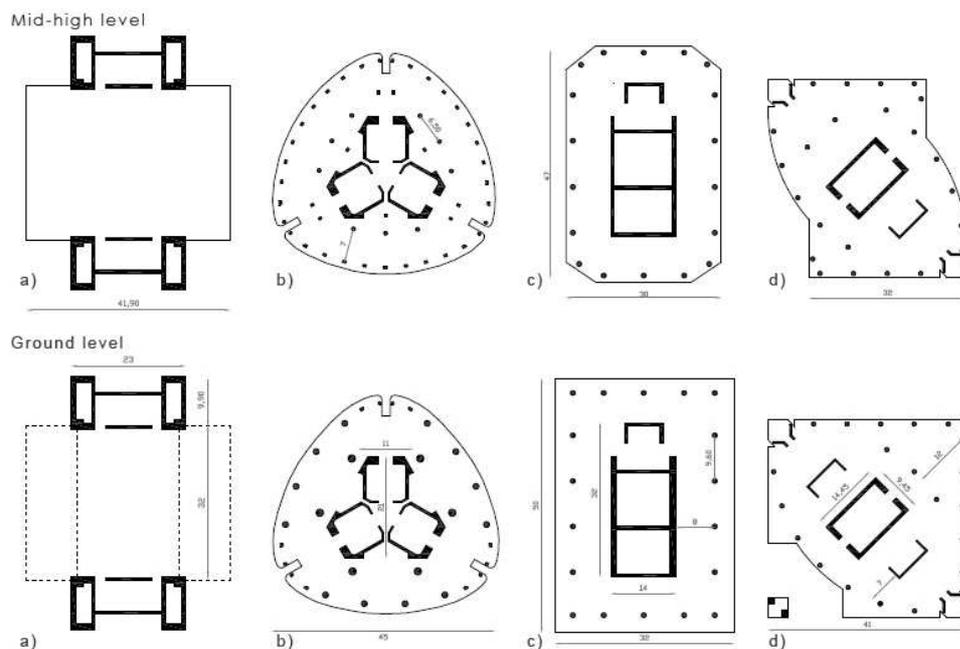


Figura 19: Secciones transversales de las torres: a) Torre Bankia, b) Torre PwC, c) Torre de Cristal, d) Torre Espacio.

ciales entre cada núcleo, se optó finalmente por realizar una única losa conjunta.

General scheme of the structure

Los núcleos de escaleras y ascensores juegan un papel determinante en los edificios en altura. Habitualmente suelen ocupar hasta un tercio de la planta en superficie, por lo que su disposición acaba convirtiéndose en uno de los temas centrales del diseño de la torre. Al necesitar los núcleos de comunicaciones verticales de estructuras que les acompañen durante todo el ascenso, se aprovecha para incrementar la carga que reciben esas estructuras, aumentando también sus espesores, y se les otorga suficiente entidad como para ser los principales elementos resistentes frente a cargas laterales de viento y transmisores de cargas a la cimentación. De esta forma, se evita hacer una estructura secundaria para las comunicaciones y otra principal para resistir los esfuerzos.

En la Torre Espacio, la Torre de Cristal y la Torre PwC las comunicaciones se resuelven con un núcleo central, que se convierte en el elemento articulador de la torre. Si bien dicho núcleo central adquiere en cada una de ellas un papel diferente en el global de la estructura, la solución de las torres citadas se diferencian claramente de la adoptada en la Torre Bankia, con los núcleos de comunicaciones situados en el contorno.

En la Torre Espacio los núcleos de comunicación se disponen, por razones funcionales, a lo largo del eje longitudinal del óvalo de la torre. Para compensar la escasa inercia existente frente a las fuerzas de viento sobre el lado mayor de la fachada, se aumenta considerablemente el grosor de los muros extremos del núcleo, hasta los 150 cm de espesor, con una gran densidad de armadura.

En la Torre de Cristal el núcleo de comunicación, de grandes dimensiones en relación a su planta, es el elemento encargado de resistir casi la totalidad de las acciones horizontales. En él, al igual que sucedía en la Torre Espacio, se regruesan los muros del extremo del lado menor del núcleo a fin de compensar la menor distancia existente entre ellos y aumentar la inercia del conjunto para el eje más desfavorable.

En la Torre PwC, con un núcleo trilobular central, para evitar complicaciones en su dimensionado y facilitar el paso de las instalaciones, se plantea un patinillo exterior al núcleo, por donde circulen. Esta decisión repercute en una gran reducción en la transmisión de carga vertical a los núcleos, al no atravesar el patinillo las vigas de

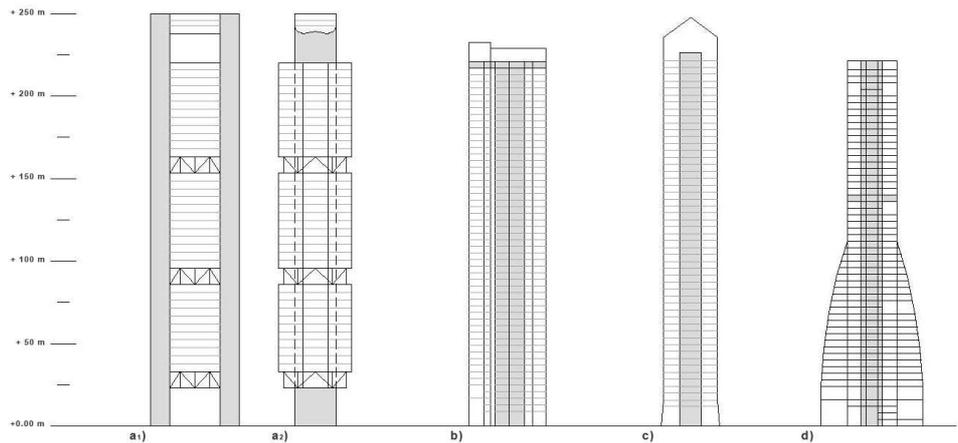


Figura 20: Sección esquemática de las torres comparando la disposición de los elementos resistentes frente acción horizontal: a1) alzado sur de la Torre Bankia, a2) sección transversal norte-sur de la Torre Bankia, b) sección longitudinal de la Torre PwC, c) sección longitudinal de la Torre de Cristal, d) sección longitudinal de la Torre Espacio.

planta. Así, frente al aproximadamente 52 % de carga vertical que se llevaba el núcleo de la Torre Espacio, el de la Torre PwC solo recibe un 32 % pese a ser el encargado de resistir el 90 % de las fuerzas horizontales, frente al 50 % del de la Torre Espacio. Esto repercute en el dimensionado del núcleo, que no solo se ve perjudicado por una menor resistencia a flexión por su menor carga de compresión, sino que incluso podría llegar a que una parte de él trabajara a tracción ante una determinada situación de esfuerzos horizontales.

El que el núcleo de la Torre PwC adquiera tanta importancia en la resistencia frente a las acciones horizontales con relación a la que recibía el de la Torre Espacio (siendo ambas estructuras diseñadas por el mismo equipo de ingeniería MC-2) viene determinado también por la colocación del cinturón de rigidez en coronación, frente a la colocación a 2/3 de la altura total de la torre, en su posición óptima, que habían realizado previamente en la Torre Espacio. Si bien el aporte que realiza a la rigidez del edificio en el caso de la torre PwC es de un 10 %, menor que el que realiza en la Torre Espacio (un 19 %), por ser todas las plantas iguales y para no interrumpir el proceso constructivo, en la torre PwC, se decide colocar en cabeza.

En la torre Bankia, al separar el núcleo en dos y situarlos en los extremos se consigue una optimización frente a los esfuerzos laterales de viento procedentes de la dirección este-oeste al estar la masa estructural situada en los extremos. Pero, por contra, se dificulta la transmisión de cargas verticales, y las orientaciones norte y sur, con mayor fachada, no ofrecen una mayor resistencia a viento. Para compensarlo, se dispone de la mayor parte de la masa estructural de los núcleos en los extremos norte y sur lo más separada posible.

El tipo estructural, usado generalmente para tipologías de torres de mayor altura, responde a la voluntad arquitectónica de crear una planta de oficinas libre y flexible. Este tipo presenta la ventaja de que toda la carga gravitatoria se transmite a los núcleos, mejorando su resistencia a flexión. Pero el desvío de las cargas supone una serie de problemas añadidos, no ya solo por el desvío de las cargas de su dirección inicial, sino por su transmisión al núcleo. Para asegurar la transmisión, fue necesario el empleo de una losa postesada de 1,9 m de canto en el núcleo a nivel del cordón inferior y superior de las cerchas (Figura 21), que presentaba el gran inconveniente de que obligaba a interrumpir el proceso constructivo y a desmontar los encofrados autotrepantes interiores del núcleo para su realización. Para reducir las excesivas cargas transmitidas por las cerchas, que están pensadas para poder aguantar el peso de dos bloques de oficina en compresión o, por seguridad, en compresión y tracción, se recurre a un postesado a nivel del cordón inferior. Para reducir el momento que las cerchas introducen al núcleo, dada la magnitud alcanzada, no se aprieta completa-

mente la tornillería de unión del cordón superior de la cercha con el pilar embebido hasta que no entra totalmente en carga.

Elementos estructurales

Más allá del esquema general de la estructura, en las edificaciones en altura cobran mucha importancia los elementos estructurales, no solo por su eficacia estructural y peso propio, sino por su influencia en el proceso constructivo. Son beneficiosas para ello decisiones como la repetición de plantas, de cara a la prefabricación, o el uso de elementos autoportantes que eviten los apeos y aumenten la seguridad en obra.

La Torre Espacio es el único ejemplo de forjado de losa maciza de hormigón armado. Este tipo de forjado responde al interés de la promotora por realizar la totalidad de la obra en hormigón armado, pero también a la geometría compleja y variable de la planta, que dificulta en cierta medida la prefabricación, a su sencillez constructiva, que presenta el inconveniente de tener que realizar apeos, aunque evita en cierta medida el uso de grúas, y a la necesidad de transmitir fuerzas horizontales por el forjado para el trabajo conjunto de toda la estructura frente a las acciones de viento. Ante las acciones horizontales el forjado, por su rigidez, es capaz de transmitir un 31 % de estas a los pilares, para que colaboren con el núcleo. En la Torre Espacio los pilares adquieren un papel muy importante en la resistencia frente a viento, de modo que el 50 % de los esfuerzos son asumidos por el núcleo y el otro 50 % se transmite a los pilares a través del cinturón de rigidez y de los forjados de losa maciza.

En la Torre de Cristal se diseñaron pilares mixtos de hormigón armado con un perfil metálico embebido. Se evitó el realizar los pilares solo de hormigón por sus mayores deformaciones reológicas y por su inadecuación con el sistema de forjado de losas alveolares, pero siendo más económico y rápido que realizados únicamente de acero, por la necesidad de protegerlos contra el fuego y de darles un acabado. De esta forma únicamente tenía que ser ignífuga la chapa inferior que quedaba vista de las vigas metálicas entre las losas alveolares. Esta solución prefabricada, si bien presentaba el inconveniente de su geometría variable y hacía necesario el uso de grúas, repercutió en una mayor facilidad y rapidez de montaje, sin necesidad de apeos.

La Torre PwC presenta una clara diferencia respecto a las anteriores en la repetición de las plantas en toda la altura de la torre. Procedimiento que resulta muy beneficioso de cara a la prefabricación y a una sistematización del proceso de montaje. Al igual que sucedía en la Torre de Cristal, solo que aquí con forjados de chapa colaborante, para agilizar el proceso constructivo, a partir de la cuarta planta, se emplearon perfiles metálicos embebidos en el hormigón, que permitían que el montaje de la estructura metálica fuera 3 plantas por delante del hormigonado. La solución de chapa colaborante fue adoptada por las facilidades constructivas que ofrecía, permitiendo recurrir a grúas ligeras, al ser una solución más ligera que la de losa alveolar, y sin la necesidad de apeos. La geometría circular de la planta no fue un problema al sistematizar el cajón que hacía el remate y utilizarlo en todas las plantas de forma sistemática. Este sistema constructivo permitió a la torre PwC construirse a un ritmo de 6 días por planta, frente a los 9 días por planta de la Torre Espacio. Con el fin de ignifugar el forjado, se ignifugaron únicamente las vigas y se armó el forjado a momentos positivos en el fondo de los valles.

La torre Bankia, respondiendo a su voluntad arquitectónica de lograr una planta lo más diáfana posible, plantea un forjado con el menor número de soportes posibles, resultando luces de hasta 18 metros entre sus 8 pilares. Dadas las grandes luces, ha de recurrir a un forjado de chapa colaborante con solo 7,5 cm de espesor de la capa de compresión, en la que emplea hormigón aligerado de 18 kN/m³, y donde las vigas metálicas se proyectan en su mayoría con contraflecha, de cara a compensar el peso propio del forjado en las grandes luces que ha de salvar. Si bien esas especificidades, para responder de forma idónea a las voluntades arquitectónicas del proyecto, podrían resultar un problema, este se ve minimizado por la repetición de todas las plantas a lo largo de la altura del edificio, permitiendo la prefabricación de todos los elementos.

En relación con la gran importancia que adquieren, en las edificaciones en altura realizadas con hormigón armado, las deformaciones que se producen a consecuencia de la fluencia y retracción del hormigón, las torres optan por soluciones diferentes.

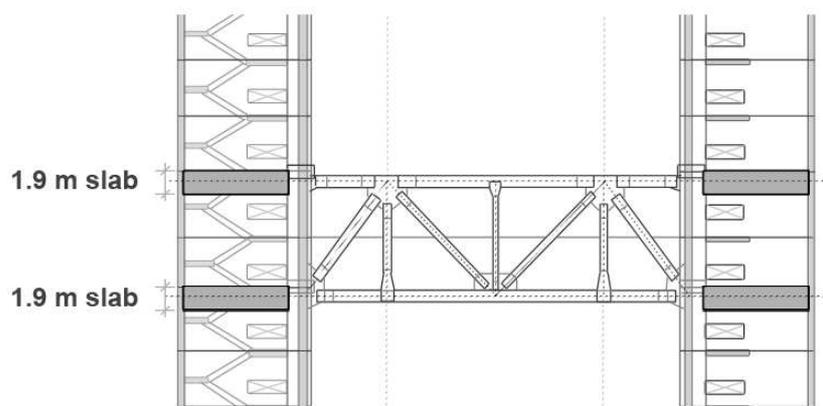


Figura 21: Situación de las losas de 1,9 m de espesor en los núcleos de la Torre Bankia.

En la torres Espacio y PwC, con pilares y núcleo de hormigón, el problema de la retracción y fluencia diferencial que se da entre ellos -y que tiende a crear descensos diferenciales en los forjados-, es asumido por el cinturón de rigidización que, por su rigidez, evita la aparición de acortamientos diferenciales.

En la Torre de Cristal, al no tener cinturón de rigidez que compense los mayores acortamientos de los pilares frente al núcleo, se va incrementando a cada tramo la longitud del pilar.

En la Torre Bankia, para compensar los grandes valores de retracción y fluencia que presenta el hormigón de los núcleos frente a la estructura metálica de los bloques de oficinas, se permite el desplazamiento relativo entre los distintos bloques al nivel de cada cercha, independizándolos y limitando la acumulación de esfuerzos y movimientos diferenciales a cada bloque de oficinas por separado.

4 Conclusiones

El tipo de las torres del Cuatro Torres Business Area, con alturas hasta los 250 m y esbelteces que van desde 5,3 hasta 11, ofrece varias alternativas estructurales. En este caso la elección más extendida fue la del núcleo central con pilares perimetrales. Una solución que comparten la torre Espacio, la de Cristal y la PwC, si bien en cada una de ellas juega un papel diferente.

En la Torre Espacio y en la de Cristal los núcleos centrales, con un comportamiento diferente en cada una, responden al interés por dejar la fachada libre y continúa, que se convierte en la imagen del proyecto y de la torre. En la torre PwC el núcleo central responde más a la intención de permitir un máximo aprovechamiento de la superficie de la planta para el uso de hotel, liberando la superficie de fachada para este uso. La torre Bankia emplea otro tipo completamente diferente, con los núcleos en el contorno, para poder tener una planta de oficinas diáfana. En todas ellas, ya sea en mayor o menor medida, los objetivos de cada torre se reflejan en la elección de su tipo estructural.

Unida a la decisión del tipo estructural va la elección de los diferentes elementos estructurales que conformaran la estructura de la torre. En este caso se abarca un gran abanico de posibilidades, desde forjados de chapa colaborante, a losa maciza o de losas alveolares, a pilares metálicos, de hormigón armado o mixto. En función del tipo estructural de la torre y del papel que los elementos estructurales toman en el proyecto se pueden ver las diferentes posibilidades y cualidades que aporta cada uno.

Las diferentes soluciones estructurales están evidenciando, como hemos tratado de poner de relieve, la inexistencia de una única solución estructural y la relación directa de esta con todos los aspectos que comprende la construcción de una torre. El análisis de las estructuras de las cuatro torres revela la necesidad de una interacción de la

respuesta estructural con la voluntad arquitectónica ya desde las primeras fases del proyecto.

Referencias

- Alarcón López de la Manzanara, Jaime.: “La Torre Espacio en Madrid” Realizaciones nº 935, Diciembre 2009
- Corres Peiretti, Hugo: “La visión estructural del hormigón autocompactante” FHECOR, Ingenieros Consultores, 2009
- Corres, H.; Romo, J.; Romero, E.: “High Rise Buildings. The Challenge of a New Field of Possibilities of the use of Structural Concrete”. FHECOR, Ingenieros Consultores
- FCC Construcción. “Torre Caja Madrid” Informe técnico 809, junio 2010
- Hoogendoorn, Peter Paul; Álvarez Cabal, Ramón: "Four tall buildings in Madrid. Study of the wind-induced response in serviceability limit state". Council on Tall Buildings and Urban Habitat, 2009
- "Edificios altos de Cuatro Torres Business Area", Hormigón y acero V. 59 nº 249, July-September 2008
- Lakota, Gregory: "Standing Tall in Madrid" Modern Steel Construction, July 2009
- Lakota, Gregory; Alarcón, Arantzazu: "Design Challenges for the Tall Building in Madrid". 17th Congress of IABSE, Chicago, 2008
- Martínez Calzón, Julio: “Hormigones de alta resistencia en la edificación de gran altura”, Hormigón y Acero, nº 228-229, 2º y 3er trimestre 2003
- Martínez Calzón, J.; Gómez Navarro, M.: “Estructura del edificio de gran altura Torre Espacio en la Castellana de Madrid”. Realizaciones, III Congreso de ACHE de puentes y estructuras
- Perez Gutierrez, Maria Concepción. “Evolución del tipo estructural “torre” en España”. Tesis 2009. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid
- "Proyecto de Edificios Altos" Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural. Grupo de Trabajo 1/5 Proyecto de Edificios Altos, 2013
- "Tall Buildings in numbers" CTBUH Journal, 2008

