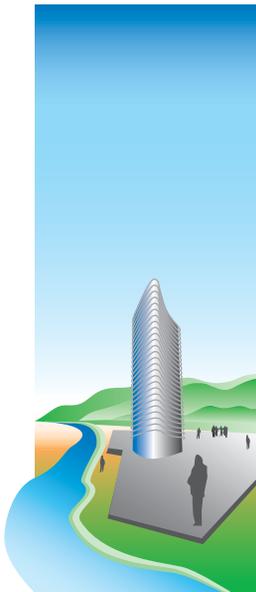


# Torre del Agua

Julio Martínez Calzón y Miguel Gómez Navarro



**DESCRIPTORES**  
TORRES  
EXPO 2008  
AGUA  
ESTRUCTURAS

Tanto por su ubicación como por su altura de coronación, este edificio será el más visible de la Expo, respondiendo a la idea de símbolo o referente de la misma, tal como el concurso convocado en su día requería.

Y aunque puedan darse otras construcciones en el recinto que puedan superarla en amplitud y complejidad: puentes, Palacio de Congresos, grandes pabellones, etc., esa categoría de icono representativo será real para la mayoría de los visitantes, porque la presencia de la Torre del Agua ofrecerá una imagen de enorme atractivo a través de la serie de temas/propuestas que el edificio provoca y que llevaron a la elección del lema con que fue presentado al concurso, "Soledad sonora",<sup>1</sup> y que, fundamentalmente, podrían resumirse así:

— Visión diurna:

- Variabilidad de su silueta y perspectiva a causa de la forma de gota de agua que refleja su planta, en clara cohesión con su función.
- Vibración y sutileza de la textura de su recubrimiento, que incorporará un efecto "moiré" o de interferencias luminosas, muy fluyente y cambiante.
- Una visión muy dinámica, a pesar de su quietud, por las transformaciones de su imagen a medida que el espectador se desplaza, al entrar en juego las sombras, reflejos e interferencias que las curvaturas variables de la fachada y las piezas que la componen producen.
- Una percepción geométrica compleja, que los efectos luminosos y cromáticos del día irán aportando: nubes, luz de sol, tonos, etc.

En conjunto, se producirá inicialmente una imagen muy cambiante, nada obvia, inaprehensible por una visión fugaz o única, que requerirá para su captación un recorrido más amplio que, integrando intuitivamente diversas perspectivas, llegue a captar sus características esenciales a través del discurso de su configuración y permita acceder a la plena imagen polifónica real, en la que la dificultad de percibir el contenido a través de la fachada será otro efecto, no desdeñable, de complejidad añadida.

— Visión nocturna:

Esa presencia interior empezará a manifestarse y tomar corporeidad al caer el día y desaparecer la luz exterior, desvelándose por una parte la estructura, prácticamente invisible durante el día, que recubrirá mediante su trama los elementos del interior: burbujas, rampas, núcleos, colores, gente moviéndose, etc., que darán lugar a un nuevo haz de visiones cambiantes.

Esta sensibilidad y polifacetismo de la obra arquitectónica se interrelaciona muy en profundidad con la estructura resistente, trabada con aquélla desde muy al principio de la concepción de la propuesta para el concurso, dando lugar a una potente dualidad e interpretación que han conducido no a una suma de factores, sino a su potenciación, de tal forma que el sistema se ha convertido en un organismo de intensa energía, que permitirá valorar muy hondamente tanto los aspectos relativos al gran espacio interior vacío, creado como elemento básico expresivo, en el que adicionalmente se engloban los contenidos temáticos requeridos, como la amplia visión del exterior de la Expo, la ciudad de Zaragoza y el río Ebro.

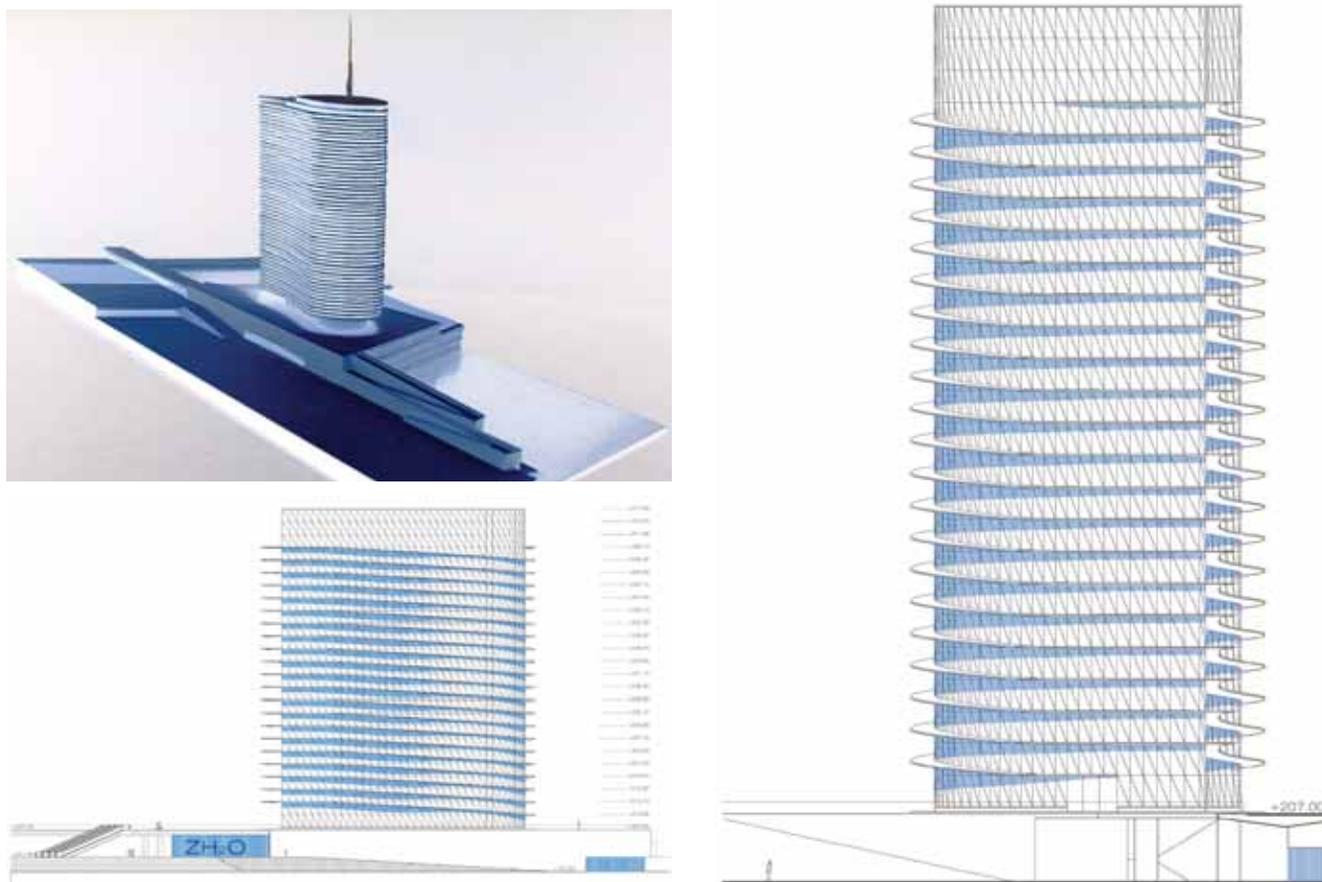


Fig. 1. Imágenes generales diurnas.

Y todo ello, combinado con los factores añadidos de su necesaria transformación post-expo, que han de convertir esta función expositiva y de atracción en otra más funcional y operativa que la permita subsistir en el tiempo.

La Torre, como muchos de los edificios de la Expo 2008, debía responder a una intensa vinculación con el agua –más marcada si cabe por su propia denominación–, que no solo se cumple a través de la expresividad de su forma en planta y de la complejidad que la misma ofrece y que, subliminalmente, se integrará en la percepción de sus contenidos dedicados a este elemento, sino que el edificio será punto de salida y llegada del canal de aguas bravas, que la rodeará en parte, creándose una topografía específica. Para atender a todos los aspectos requeridos, el edificio consta de dos partes bien diferenciadas:

- Un gran zócalo, que ocupa la totalidad de la parcela asignada, situado parcialmente bajo la rasante del terreno, constituido por tres plantas y una altura total de unos 13 metros:
  - En los dos niveles inferiores se ubican las instalaciones, un aparcamiento y el acceso al canal de aguas bravas, con las necesarias dotaciones para su uso y explotación.
  - La planta superior albergará la entrada a la torre, accediendo a la misma las grandes escaleras mecánicas y ascensores de comunicación de la misma.
  - La cubierta conecta el edificio con el recinto de la exposición, dando salida además a una gran pasarela que permitirá llegar directamente hasta la gran plaza de la Expo; y recibe en su parte central la estructura perimetral de la torre propiamente dicha, dando lugar en el in-

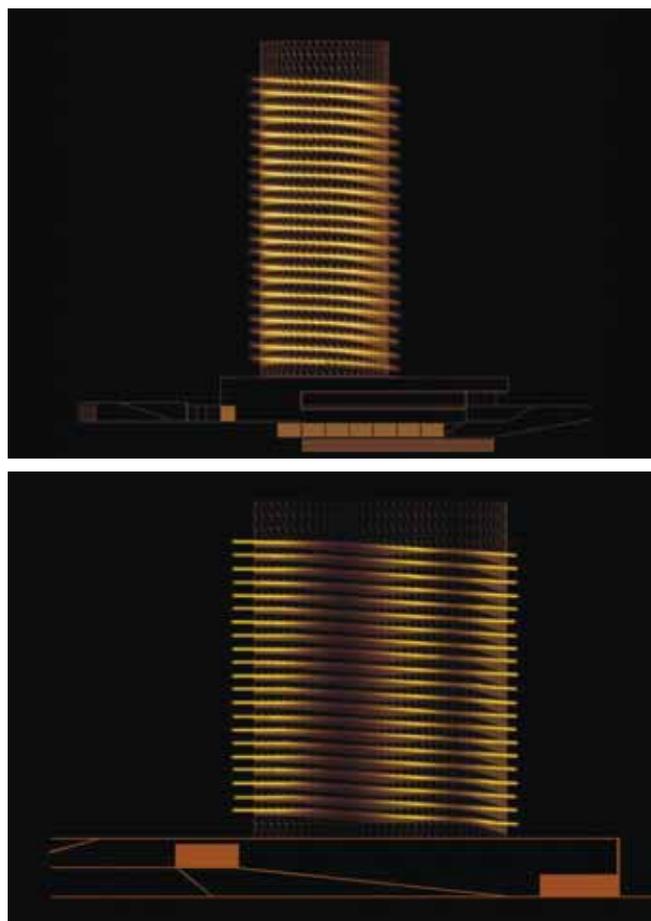


Fig. 2. Imágenes generales nocturnas con iluminación artificial.



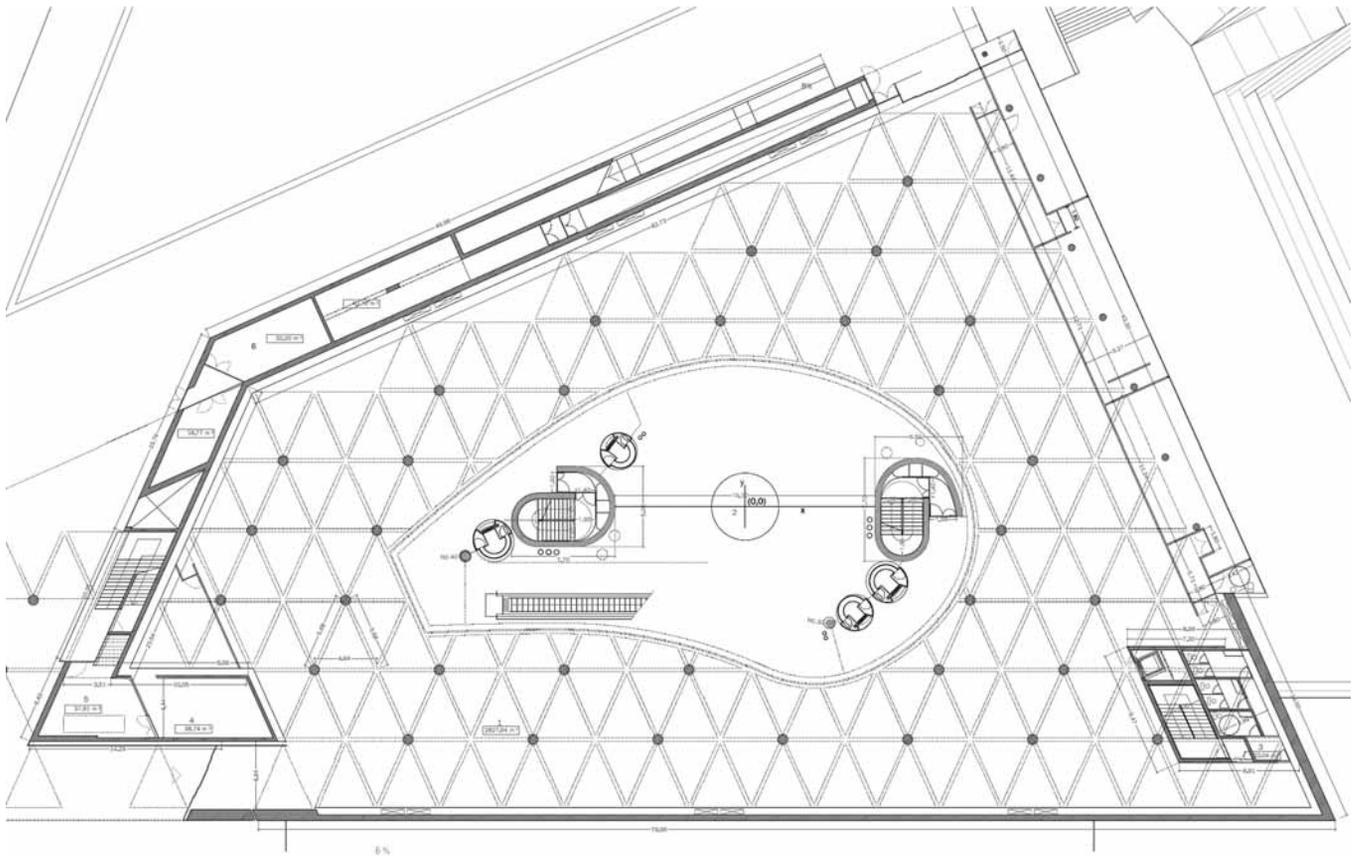


Fig. 3. Esquema en planta de la cubierta del zócalo incluyendo el gran óculo central, los nervios del forjado y la posición de los soportes.



Fig. 4. Imágenes del zócalo en construcción.

terior de dicho perímetro a un gran óculo de comunicación con la planta de acceso antes mencionada. Esta cubierta consiste en un potente forjado nervado de hormigón armado con una malla de triángulos isósceles de interejos en torno a los cuatro metros. El forjado nervado, de canto 0,25 (losa) + 0,90 (nervios), recibe las importantes cargas que descienden por la fachada del edificio y las transmite a unos soportes troncocónicos ubicados en vértices de la malla, y por tanto no siempre próximos a la línea de actuación de las mismas.

- La Torre del Agua, de 67,55 metros de altura y forma en planta asemejable a una gota de agua, en la que se desarrolla un programa expositivo. Los elementos fundamentales que definen la morfología de esta parte del edificio son:
  - El espacio vacío interior limitado por la gran fachada, en el que se situarán los dos ámbitos expositivos separados por una plataforma ubicada a 16,95 metros de altura.
  - El conjunto formado por las rampas periféricas interiores y los parasoles que, en forma de helicoides, rodean la fachada y marcan el ritmo de las plataformas y plantas del edificio.
  - La zona de coronación, con tres plantas, situada por encima de los 58,95 metros de altura, que incluye parte de las instalaciones, un restaurante-cafetería y sus correspondientes cocinas, permitiendo suspender los sistemas expositivos que sean necesarios.
  - Dos núcleos de ascensores e instalaciones que cruzan la totalidad del espacio en altura.

Como se ha enunciado, el edificio deberá transformarse al término de la exposición internacional, para lo que se han considerado diversas soluciones y previsto la posibilidad de ejecutar hasta un máximo de ocho forjados en el espacio interior entre la plataforma intermedia y el bloque de coronación. Con el fin de minimizar la incidencia de esta transformación se han incorporado a los sistemas resistentes de la primera fase los elementos necesarios para asegurar la capacidad resistente necesaria.

El esquema estructural de la torre consiste, esencialmente, en una fachada portante triangulada cilíndrica vertical, de sección transversal en forma de gota, y una pareja de núcleos interiores de hormigón armado, también cilíndricos pero con secciones transversales no cerradas.

Estos dos sistemas, conectados entre sí a través de losas de hormigón armado, de reducida extensión en planta, permiten definir una respuesta estructural conjunta frente a la totalidad de las solicitaciones verticales y horizontales del edificio, en cualquiera de las fases de utilización mencionadas, en un trabajo espacial complejo, dadas las especiales disposiciones relativas de los dos elementos, su geometría, y las extremadamente diferentes solicitaciones que en cada orientación de la planta se producen debido a su irregular forma.

La estructura portante de la fachada se ha dimensionado considerando de manera muy precisa los factores resistentes y los arquitectónicos, disponiéndose el sistema de barras que la constituye definitivamente vinculado con el doble subsistema helicoidal funcional y resistente, constituido por un conjunto de

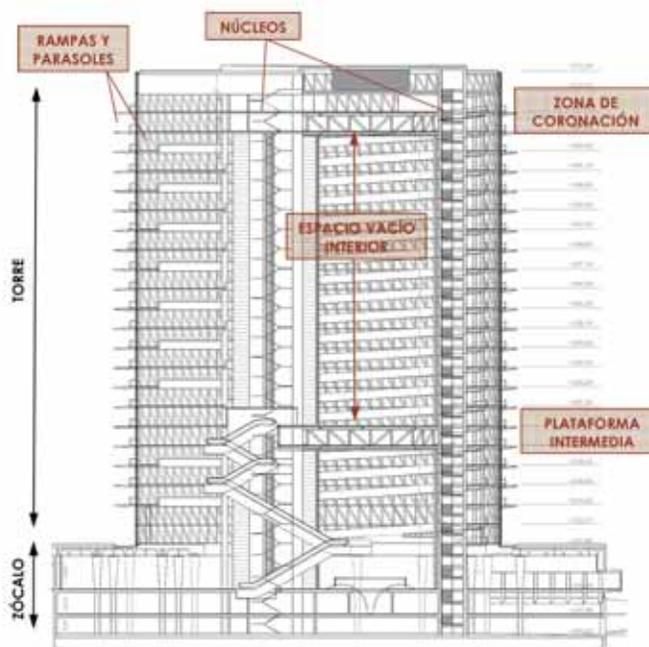


Fig. 5. Sección transversal del edificio.

parasoles exteriores y rampas interiores, cuya disposición se deduce del hecho de mantener para estas últimas la inclinación apropiada del 6% al recorrer el perímetro de la burbuja.

La modulación de la altura de 5,60 metros así determinada permite intercalar separadamente con altura libre de 2,80 metros las dos rampas de subida y bajada, accediendo a dos grupos de descansillos, dispuestos uno en cada extremo de las plantas, que también se disponen con un interejo de 2,80 metros, y formados por las losas de hormigón armado citadas que están vinculadas cada una a uno de los núcleos verticales de comunicación. Dichas losas efectúan precisamente la función estructural antes mencionada de conexión entre los dos sistemas principales.

La triangulación elegida para la fachada consiste en:

- Soportes verticales, separados 1,65 metros a lo largo de una poligonal inscrita en la curva teórica de la gota de agua formada por arcos de círculo ensamblados apropiadamente.
- Anillos horizontales, que siguen dichas poligonales, dispuestos cada 2,80 metros en vertical.
- Diagonales, en una dirección única, dando lugar a grandes líneas inclinadas a lo largo de la fachada.

Esta estructura queda desacoplada del flujo de los subsistemas helicoidales citados, aunque mantiene el mismo ritmo de separación vertical de 2,80 metros entre elementos.

Las rampas y los parasoles dispuestos en voladizo coinciden, a un lado y otro de la estructura de fachada, y se unen exclusivamente a sus piezas verticales, empotrándose elásticamente en las mismas, en cotas relativas variables a lo largo de la altura entre anillos, dando lugar a flexiones transversales compensadas en parte o superpuestas, según sea el signo de la componente vertical del viento, pero aportando como función primordial el trascendente trabajo de arriostamiento de tales soportes de alturas libres inmensas frente al pandeo fuera de la superficie cilíndrica.



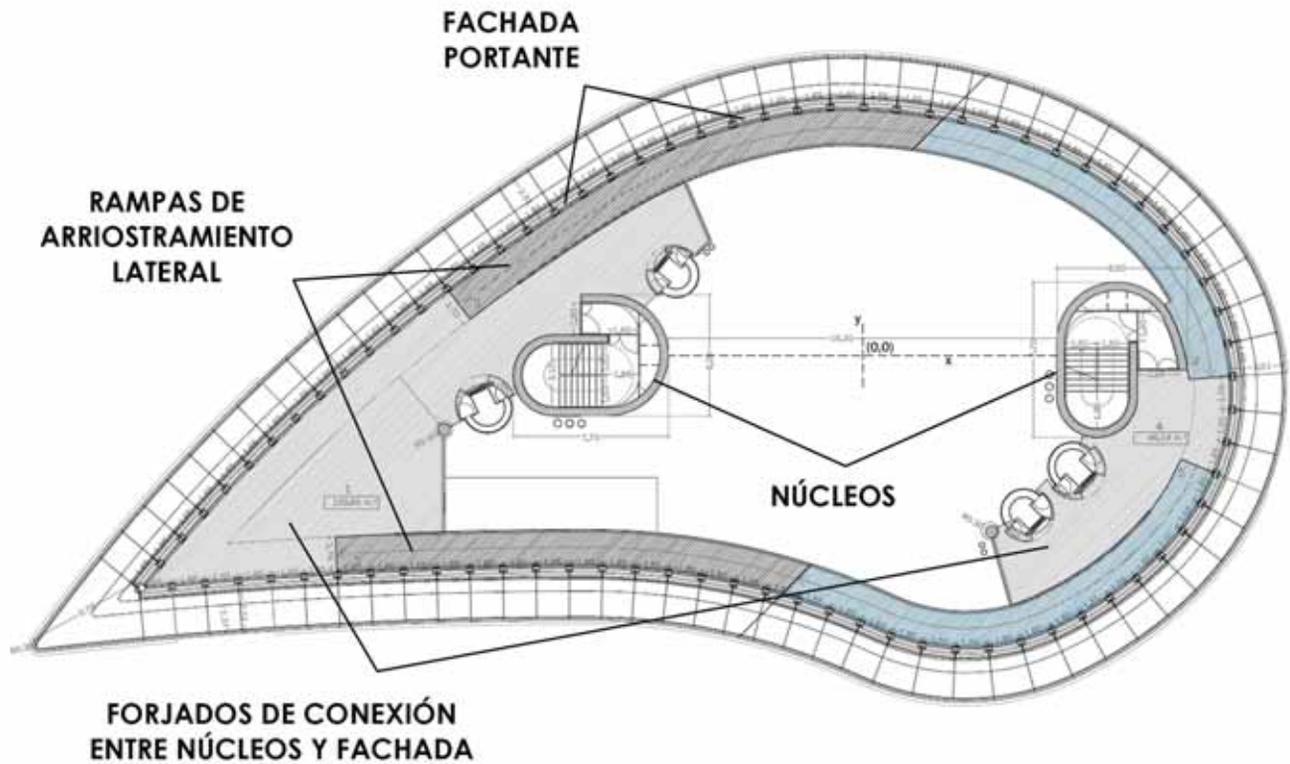


Fig. 6. Planta tipo con los principales elementos de la estructura de la torre.

Este arriostramiento es fundamental no solo en relación al concepto de cargas verticales, sino frente a las solicitaciones de tipo membranal provocadas en el conjunto de la fachada por las solicitaciones de viento. Al actuar tales fuerzas en el plano de su superficie, la componente horizontal, debido a la curvatura en planta, provoca fuerzas de desvío hacia fuera o hacia adentro de la fachada según el signo de curvatura en cada tramo; fuerzas que han de ser contrarrestadas por el sistema de arriostramiento citado de las rampas, realizadas en estructura mixta, que, como diafragmas, a modo de grandes vigas planas casi horizontales, recogen todas estas fuerzas de pandeo y/o desvío y las canalizan hasta las placas de los descansillos, en donde se equilibran y transfieren entre sí y con los núcleos de hormigón, para constituir el esquema global básico de tubo-en-tubo, pero en una forma dual y pseudo abierta.

El trabajo laminar completo del tubo cilíndrico rigidizado por las rampas, y el gran número de uniones y nudos requerido, determinan como primordial simplificar al máximo tales uniones y facilitar la entrada de las acciones de las rampas y parasoles en la fachada.

Aunque inicialmente se desarrolló una solución tubular de tubos cuadrados de dimensiones exteriores constantes y espesores variables, dispuestos romboidalmente en la fachada para minimizar la incidencia visual arquitectónica, tanto exterior como interiormente, y recoger favorablemente en las dos esquinas libres las chapas de los voladizos de rampas y parasoles, y los tubos transversales en las otras dos, dicha solución fue desechada por diversos motivos:

- La estabilidad al fuego requerida por bomberos, a pesar de ser un sistema exterior, fue RF-180, lo que implicaba un recubrimiento ignífugo importante, con pérdida de todos los aspectos arquitectónicos perseguidos.

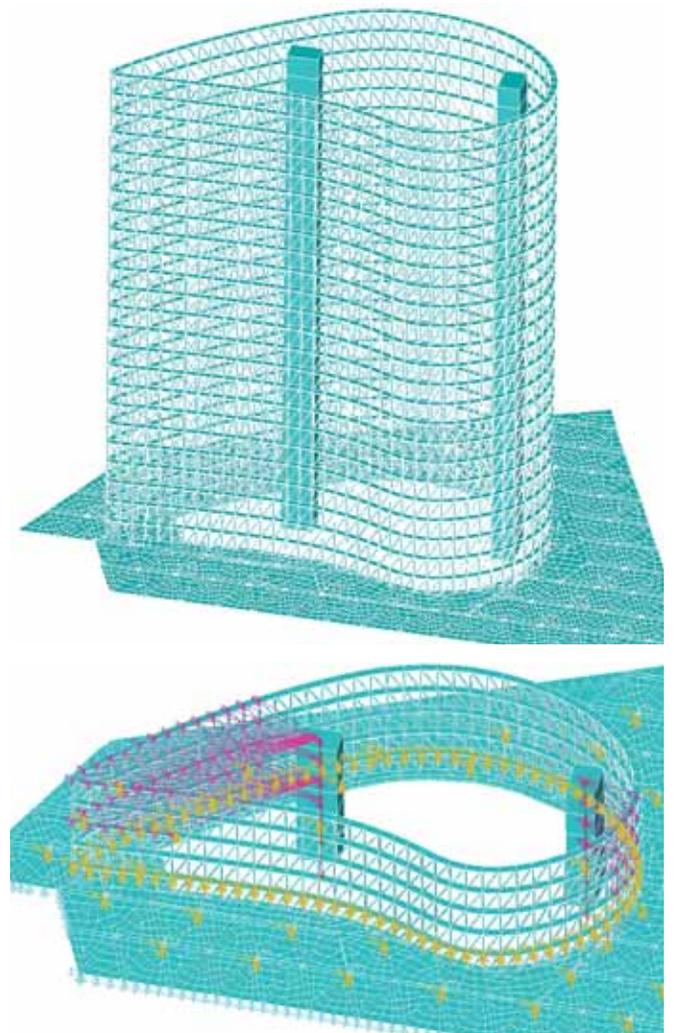


Fig. 7. Imágenes del modelo empleado para estudiar el comportamiento conjunto de la fachada, el forjado nervado y los núcleos.

- El plazo de suministro de la gama de tubos necesaria resultaba incompatible con las condiciones de ejecución; no por el mayor lapso en sí, sino por el ajustado plazo del proceso: proyecto-control-concurso de construcción-adjudicación-pedido de materiales-realización, que aunque se separan de lo que son conceptos estructurales, resultan tan decisivos o más que los resistentes en el conjunto de un proyecto estructural sometido a una temporalidad muy estricta.
- Un coste unitario mayor; aunque no decisivo, muy activo, al ser esta partida muy importante en el coste global.

La solución adoptada finalmente consiste en el empleo de la gama de un solo calibre de perfiles laminados tipo HEM-HEB-HEA para las columnas, recibiendo en sus almas las acciones de las chapas verticales de apoyo de los elementos volados, y diagonales y montantes en HEB-HEA-IPE de idéntico calibre, dispuestos con sus planos de alma coincidentes con los de los soportes, intersectándose las almas de los tres sistemas mediante desmembrado de alas de diagonales y montantes; configurándose así una disposición y superficies muy sistemáticas y de ejecución relativamente rápida y sencilla.

Un aspecto importante en el desarrollo del análisis de esta estructura radica en las características del apoyo de la misma en la gran cubierta del zócalo. Al hacerlo en una zona volada de la gran losa reticulada triangulada que forma dicha cubierta, y en proximidad al óculo abierto central, la deformabilidad de estos vuelos interactúa con la de la fachada, y es preciso llevar a cabo su análisis combinado, el cual regula y homogeneiza apreciablemente las solicitaciones entre las zonas más o menos voladas respecto a los soportes inferiores de dicha placa, pero a costa de incorporar fuertes solicitaciones adicionales locales a la lámina cilíndrica en las zonas de contacto con el zócalo.

El trabajo conjunto del referido tubo-en-tubo espacial, determina un reparto muy igualado de esfuerzos entre ambos sistemas, a pesar de la mayor dimensión de la fachada, pero muy favorable en los aspectos deformativos, que se alejan de los valores habitualmente límites de los edificios de altura; y todo ello, sin incidir notablemente en la gama de los perfiles requeridos.

Adicionalmente a los elementos estructurales descritos, que dan lugar a la megaestructura fachada-núcleos, la torre incluye otros sistemas estructurales de interés menor, entre los que pueden destacarse los siguientes:

- Dos grandes plataformas constituidas por sendas parejas de potentes vigas de celosías mixtas, que se apoyan en los dos núcleos de hormigón a través de ventanas dejadas en los mismos. Estas piezas permiten disponer perfiles transversales importantes apoyados en dichas celosías y salientes a ambos lados, con dimensiones de los voladizos variables, debido a la forma en planta del espacio, hasta prácticamente llegar al borde interior de las rampas, pero sin contactar con ellas.
- Forjados mixtos de chapa plegada y canto total de 180 milímetros apoyados en perfiles secundarios, que reposan directamente sobre las plataformas antedichas.
- Forjados de losa maciza de hormigón, dispuestos en la coronación y que apoyan en soportes metálicos.
- Estructura metálica autónoma, de sustentación de una gran escalera mecánica de varios tiros volados, situada en el interior del gran espacio central inferior.

El proceso constructivo previsto para la estructura combina las propiedades de las diferentes tipologías que se presentan en el edificio, aprovechando al máximo las peculiaridades de cada una de ellas con el objetivo de minimizar el plazo de ejecución global:

- Ejecución convencional del conjunto del zócalo, incluyendo la gran losa nervada triangulada de su cubierta y grandes soportes en hormigón blanco.
- Encofrados trepantes para los dos núcleos de hormigón.
- Montaje de la fachada por medio de grandes paneles realizados en taller, con cuatro o cinco módulos verticales y altura total de hasta 14 metros; y dos módulos horizontales con una anchura de 3,30 metros. La curvatura de estos paneles determina una estabilidad adicional a la intrínseca de una malla en la fase de colocación y juega a favor de la facilidad constructiva en obra.
- Forjados mixtos muy sencillos en las rampas y plataformas.
- Montaje completo de celosías principales metálicas, preensambladas en obra.
- Ejecución convencional de losas de descansillo apoyadas en fachada y núcleos.

La estabilidad frente al fuego de la fachada y los sistemas estructurales metálicos se logra mediante aplicación de una protección ignífuga, que se recubre en la fachada mediante una carpintería metálica específica, de manera que la presencia cercana desde la propia rampa sea de la calidad necesaria para su función.

Las chapas plegadas no se protegen frente al fuego, incorporando en el interior del hormigón unas armaduras capaces de resistir esta situación de acciones sin colaboración de dichas chapas. □

Julio Martínez Calzón y Miguel Gómez Navarro  
Doctores Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos



Fig. 8. Fases iniciales del montaje en obra de la estructura metálica de la fachada y las rampas.

#### Nota

1. Tomado de Juan Ramón Jiménez, que a su vez la recogió de San Juan de la Cruz y que, curiosamente, con posterioridad al concurso, es título de una reciente biografía de Xavier Zubiri; todo lo cual refleja, sin duda, la fuerte concatenación de pensamientos, de difícil conjugación, que el doble término produce, bastante cercano incluso a un oxímoron.

