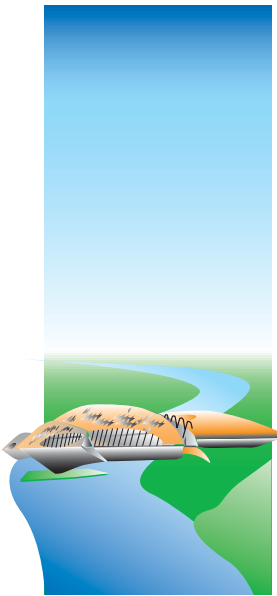


Grandes avances en la ingeniería hacen un sueño realidad

Carlos Merino Agüeros y Francisco Javier Rueda Merino



DESCRIPTORES

PUENTE PABELLÓN EXPO 2008
RIBERAS DEL EBRO
MARGAS YESÍFERAS DEL EBRO
PILOTES IN SITU DE GRAN DIÁMETRO
PRUEBA DE CARGA OSTERBERG-CELL
PUENTE METÁLICO
TIPOLOGÍA ESTRUCTURAL DE PUENTES
MODELIZACIÓN Y ANÁLISIS ESTRUCTURAL
EFICIENCIA ESTRUCTURAL Y CONSTRUCTIVA

Detrás del proyecto del Puente Pabellón se encuentra el objetivo de hacer realidad algo hasta hace poco imposible. Está siendo el desarrollo tecnológico en el mundo de la ingeniería (tanto en técnicas de diseño como de construcción) el precursor en la actualidad de proyectos que antes eran considerados exclusivamente teóricos y académicos. La ingeniería se ha convertido en imprescindible catalizador y nexos de unión entre la arquitectura más moderna y la cultura de las ciudades españolas. De la mano de estos avances en diseño y construcción, los arquitectos más reconocidos mundialmente están haciendo realidad sus sueños en España, permitiendo que la identidad cultural española se vea reflejada en un futuro cada día más cercano.

Es el espejo de la ingeniería el que está haciendo posible el reflejo real de una singularidad geométrica, espacial y visual, al servicio de los visitantes del Puente Pabellón, permitiéndonos contemplar la magnitud de los avances sin los cuales dicha visión aún quedaría confinada a dibujos y maquetas. En el caso particular del Puente Pabellón, los elementos estructurales y sus formas quedan parcialmente al desnudo reflejando una concepción estructural que cohabita con una arquitectura sin artificios al servicio común de la verdad.

Si algo destaca en el proyecto del Puente Pabellón, es su carácter multidisciplinar, donde coexisten en un espacio común el respeto entre la ingeniería estructural, la seguridad ante incendios, la arquitectura, la fachada y las instalaciones tanto de servicios como de contenidos. Son los avances en las nuevas herramientas de análisis y diseño 3D los que han permitido afrontar un reto antes inimaginable. Sin embargo, el objetivo de alcanzar una obra reconocible desde el espejo de la ingeniería obliga a dotar a la estructura de una racionalidad dentro de unos márgenes de coexistencia con el resto de las disciplinas. Toda esa interacción queda al descubierto, al formar la estructura una parte vista del Puente Pabellón. Las formas descubiertas nos permiten entender una racionalidad estructural condescendiente con una geometría definida, pe-

ro en la que queda patente el largo camino que la ingeniería estructural ha recorrido hasta nuestros días en sus formas básicas, respondiendo a la verdad de su funcionamiento.

En el Puente Pabellón, además de la complejidad de mantener el equilibrio entre un diseño con objetivos multidisciplinares propio de su doble entidad como puente y pabellón, se afrontan singularidades propias a todos los niveles de los parámetros básicos que lo definen. Su geometría, la geología local, cimentaciones, diseño estructural, materiales, proceso constructivo, funcionalidad y prestaciones son parámetros que lo caracterizan como singular tanto analizados en su conjunto como aisladamente.

Descripción general y emplazamiento

Si seguimos el camino directo desde Delicias, la estación del AVE de Zaragoza, en dirección hacia el meandro de Ranillas del río Ebro nos situamos en la puerta principal de acceso del recinto de la Expo 2008. Este punto está situado a menos de ochocientos metros de la estación de Delicias, a unos trescientos metros aguas abajo del puente del Tercer Milenio y a 1,5 kilómetros aguas arriba del puente de la Almozara. Estamos frente a un puente de impactante diseño, totalmente diferente a todos los que ha visto hasta el momento una ciudad con una larga tradición de puentes sobre el río Ebro (Fig. 2).

Se trata del Puente Pabellón de la Expo 2008. Por una parte, es una pasarela peatonal para el principal acceso a la Expo de Zaragoza diseñada para permitir flujos peatonales de más de 10.000 personas a la hora. Por otra parte alberga, como pabellón, zonas que servirán para exhibir algunas de las exposiciones más originales sobre la temática del agua para la exposición internacional de 2008. Esta compleja integración de dos construcciones de funcionalidad diferente supone el origen del reto de diseño para esta estructura. El proyecto ganador resultó elegido en un concurso internacional al que se presentaron 41 propuestas, entre las que se encontraban equi-



Fig. 1. Puente de Piedra en Zaragoza.

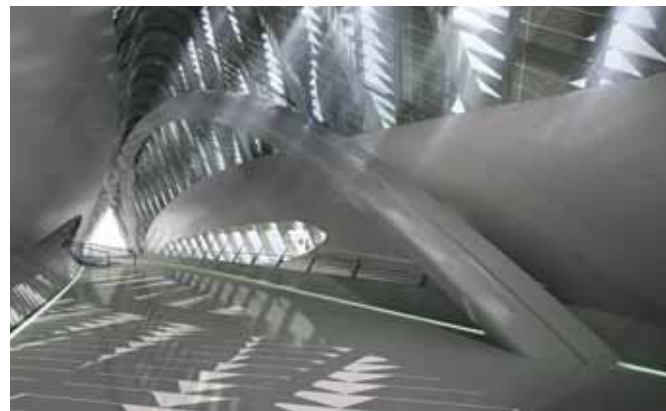
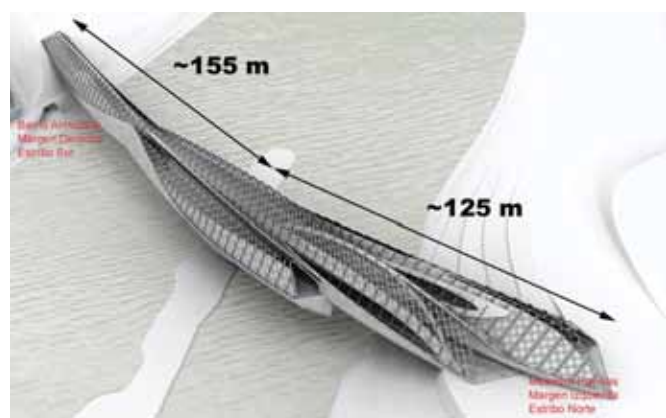
Fig. 2. Vista aérea del emplazamiento.¹

pos multidisciplinares de ingeniería y arquitectura de renombre nacional e internacional. El Puente Pabellón diseñado por la arquitecta de origen iraquí Zaha Hadid, premio Pritzker de arquitectura 2004, en colaboración con la ingeniería ARUP, logra integrar de una forma eficaz ambas funciones.

Su geometría exterior es fluida y continua como el agua del Ebro sobre la que se alza. En su interior, su distribución funcional se basa en una distribución de módulos denominados *Pods* (vaina o cápsula en inglés). Se diferencian cuatro *Pods*, dos permiten principalmente el paso peatonal mientras que los otros dos dan acceso a espacios para exposiciones. Aunque cada *pod* ha sido diseñado con un uso principal diferente, en el interior del puente están unidos. Se interconectan por medio de pasillos comunes y rampas que conectan a una planta superior. Con todo ello, se destinan cerca de 7.000 metros cuadrados a área expositiva y zonas atemperadas para el bienestar de los visitantes. Además de la dualidad de funcionamiento como puente-pasarela y como pabellón, el paso principal de los *Pods* 2 y 4 ha sido diseñado como ruta de evacuación y acceso de camiones de bomberos (Figs. 3 y 4).

Características del puente

La obra, de 280 metros de longitud, descansa sobre una cimentación profunda en ambas riberas y sobre una pequeña isleta situada en el centro del cauce, capricho de la naturaleza por los movimientos fluviales. Con ello nos brinda un puente de dos vanos, uno de 155 metros de luz en la vertiente derecha, y otro de 125 en la izquierda. Se trata de un puente de estructura metálica, cuyos elementos estructurales adoptan la forma geométrica curva y fluida que se observa desde el exterior. De la isleta nace, a la cota +191,50, la pila central del puente, de aspecto redondeado y robusto. Crece desde la base formando un cáliz que envuelve la parte inferior de la estructura y se alza sobre el tablero, dando paso a la fachada. Este cáliz embebe un encepado de 3,5 metros de canto que descansa sobre 10 pilotes y que constituye el apoyo central sobre el que gravita la superestructura del puente. El encepado se ha concebido como parte de la pila, por encima del nivel del río, precisamente para facilitar la construcción en medio del cauce (Fig. 5).

Fig. 3. Vista aguas arriba desde la margen izquierda.²Fig. 4. Interior del puente con estructura vista.²Fig. 5. Vista de la estructura global.²

El canto global de la estructura está limitado por la geometría establecida, con una profundidad variable de entre 13 metros en el *pod* 4 y 30 metros en el soporte central. El nivel de la parte inferior está limitado por el resguardo a los niveles de avenidas de diseño, establecidos en +199,05, y el nivel de cubierta está fijado en +203,6 típicamente.

La solución estructural se resume en celosía espacial metálica, combinando una serie de tipologías básicas que proporcionan un comportamiento global híbrido. Los elementos principales se pueden resumir en: arcos y cordones superiores, costillas principales y diagrid de fachada, tablero ortótropo y celosía espacial por debajo del tablero.

El tablero ortótropo de acero recoge las cargas verticales y actúa como tirante para las componentes horizontales de las patas inclinadas del cordón superior. Su ancho es variable entre 12 y 28 metros, ajustándose a la planta del puente.

Por debajo del tablero se encuentra la viga cajón, formada por una celosía espacial y que alberga el paso de todas las instalaciones del puente. Estructuralmente proporciona al puente rigidez a torsión durante la fase de construcción.

Los cordones superiores y patas de apoyo transmiten las compresiones a los apoyos y permiten aprovechar el canto total del puente. Soportan la mayor parte de la compresión en el puente y quedan constituidos por chapas de grandes espesores.

Cada 3,6 metros se coloca un módulo de costillas que da forma a cada una de las 76 secciones transversales paralelas en las que esquemáticamente se divide el puente. Las costillas se aprovechan para el montaje del puente in situ y trabajan como montantes de la estructura global y el sostenimiento del tablero principal y el nivel superior. Soportan y dan continuidad al arriostramiento de la fachada.

Uniéndolos laterales de las costillas, una piel exterior formada por paneles de diagonales colabora en la transmisión de los esfuerzos cortantes, desempeñando un papel fundamental en la estructura global del puente. Transfiere las cargas entre el cordón superior principal y la estructura de cubierta y sostiene los paneles de fachada, constituyendo parte de la misma.

Este conjunto, trabajando como una gran estructura tubular, transmite las acciones hasta la cimentación, representando 4.500 toneladas de acero (Fig. 6).

Zonificación de los pods

El puente está sectorizado en varios cuerpos según los *pods*, y dividido a su vez en dos plantas. Estos *pods* se organizan de la siguiente forma (Figs. 7 y 8):

- *Pod* 4: en el lado próximo al centro histórico de la ciudad (barrio de la Almozara-margen derecha) hay un solo tablero, que constituye el acceso peatonal a la Expo. Su función es principalmente de recorrido, más que de recinto expositivo. Al llegar al pequeño islote sobre el centro del río, este tablero se divide en otros tres (*pods* 1, 2 y 3).
- *Pod* 2: corresponde al tablero central del puente, que continúa el recorrido peatonal hasta el núcleo de la Expo (meandro de Ranillas-margen izquierda). Su función es de continuidad del flujo de recorrido del *pod* 4. El puente peatonal

como tal, tanto desde el punto de vista de flujos de visitantes como de salida de evacuación, está constituido por los *pods* 2 y 4, que forman una unidad de recorrido.

- *Pod* 1: situado entre el islote central y la orilla Expo, al oeste del *pod* 2. Tiene acceso desde la Expo a través de una puerta acristalada en la fachada norte. Su contenido es expositivo. Está formado por dos niveles con rampas que los comunican. El nivel superior, también de contenido expositivo, continúa por encima del *pod* 2 y parte del *pod* 4.
- *Pod* 3: situado al este del *pod* 2, arranca del islote central pero no llega hasta la orilla Expo. Permite la colocación de contenido expositivo con vistas de la Expo desde el Ebro. Está formado por un único nivel, coincidente con el tablero inferior del puente.

Condiciones del terreno

La ubicación nos brinda un extraordinario reto geotécnico que esquemáticamente queda representado por la gran variabilidad y heterogeneidad de los sustratos de cimentación, con diferencias y discontinuidades muy acusadas tanto horizontalmente como en profundidad en pocos metros de distancia en planta. Todo ello ha obligado una vez más a llevar la ingeniería al límite.

Las características básicas, y por otro lado conocidas, del subsuelo en el entorno del Ebro consisten en una potente capa de depósitos cuaternarios correspondientes al aluvial y subyacente al sustrato Terciario. El primer aspecto reseñable es la variable profundidad a la que aparece el sustrato Terciario, en definitiva el espesor de gravas aluviales cuaternarias. Sin embargo, el factor determinante de la singularidad del diseño de las cimentaciones se encuentra dentro del propio sustrato mioceno, con una destacada repercusión en la ubicación del Puente Pabellón; este factor es la errática variabilidad en la diferenciación entre el sustrato alterado y el sano, tanto en profundidad como en su distribución horizontal. Se distingue un nivel superior de margas sin yesos donde ha desaparecido parcial o totalmente el yeso por disolución. El yeso hace presencia a partir de los 30 metros aproximadamente, según la margen del río, con intercalaciones y nódulos centimétricos terrosos y/o sacaroideos entre las arcillas o argilitas. A partir de la aparición de los yesos a los 45 metros de profundidad se producen las intercalaciones entre las arcillas duras y medianamente duras y las arcillas grises blandas en estado líquido o casi líquido. Es solo a partir de profundidades de 65 metros donde nos encontramos con la continuidad de yesos alabastrinos sanos con potencias de hasta siete metros pero bajo los cuales aún resulta imposible descartar la existencia de episodios blandos (fruto de la colmatación de cavidades).

La variabilidad en la consistencia de las arcillas es especialmente marcada en la margen derecha del puente, barrio de la Almozara, frente al aumento progresivo de consistencia que sufren los mismos sustratos alterados de la margen izquierda en el meandro de Ranillas, a 280 metros de distancia. Esto se traduce en la alternancia de capas blandas de margas en estado casi líquido tanto en la margen derecha como en el centro del cauce.

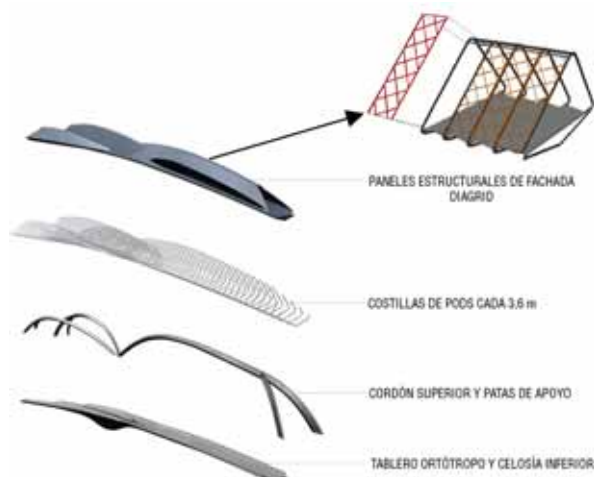


Fig. 6. Tipologías básicas estructurales?

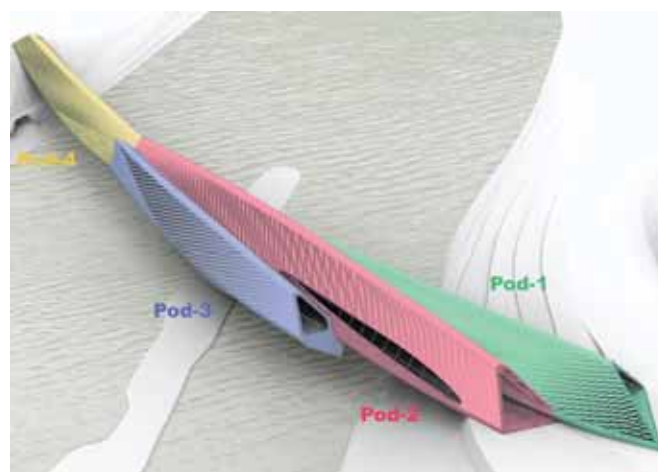


Fig. 7. Sistema de pods?

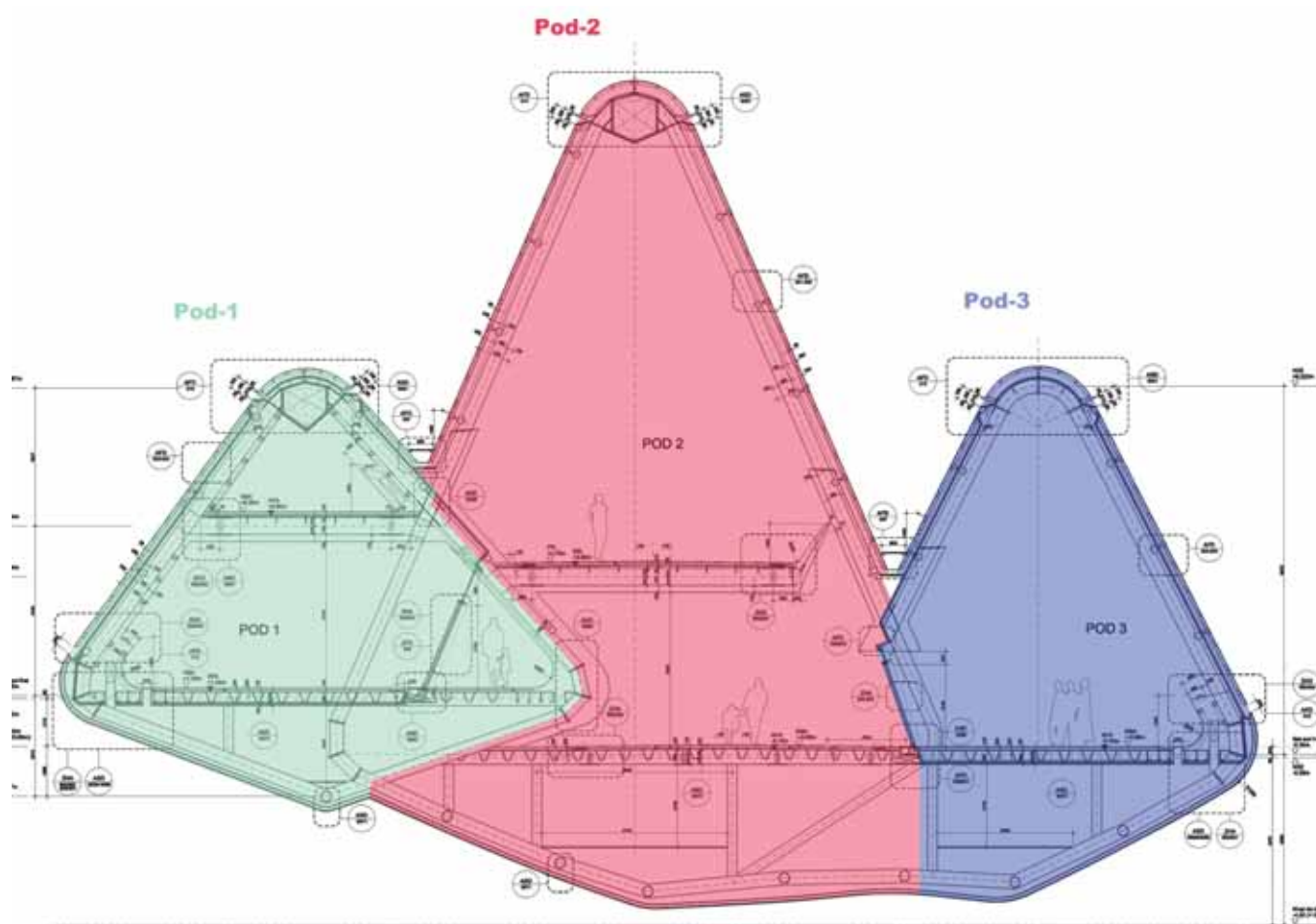


Fig. 8. Sección B-24 con intersección de pods 1, 2 y 3?

Tipo de cimentación

Como ha quedado indicado, es determinante la presencia de yesos como la causa fundamental de la existencia de episodios erráticos caracterizados por cavernas y simas rellenas con arcillas líquidas (simas en la mayoría de los casos de carácter vertical y subvertical). Estos niveles presentan una pérdida total de capacidad portante, y su ubicación y características geométricas son imposibles de determinar a priori. Bajo estas premisas es necesario cimentar mediante pilotes

apoyados en el sustrato sano de yesos y argilitas que se ubican bajo el sustrato alterado, empotrando un mínimo de dos diámetros los pilotes, dada la gran profundidad a la que será necesario apoyarlos. El criterio general de diseño establecido desde el proyecto básico es garantizar un coeficiente de seguridad mínimo en el caso de perderse la capacidad portante en la punta por la presencia de arcillas líquidas o simas en sus proximidades, de tal forma que los pilotes puedan trabajar por fuste (Fig. 9).

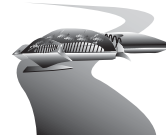




Fig. 9. Ejecución de pilotes encamisados in situ.

Lo anterior ha obligado a llevar al límite las características de la cimentación, con la ejecución de los pilotes más largos de España en la actualidad, llegando hasta 68,50 metros de profundidad, con un diseño inicial de hasta 72,00 metros. Todo lo anterior bajo la perspectiva de un diseño geotécnico de la cimentación basado en criterios rigurosos de seguridad mínima ante el fallo local de la punta. Se realiza una doble comprobación: una primera adoptando coeficientes de seguridad convencionales bajo cargas de hundimiento considerando el funcionamiento habitual, y una segunda comprobación con un coeficiente mínimo al hundimiento considerando el apoyo de la punta en los estratos blandos.

En la margen izquierda la cimentación está constituida por ocho pilotes distribuidos en tres encepados de 2,50 metros de canto. Un encepado de tres pilotes de 1,50 metros de diámetro con una longitud total de aproximadamente 65,50 metros. Un segundo encepado constituido por tres pilotes de 2,0 metros de diámetro diseñados para una reacción característica de aproximadamente 13.000 kN por pilote con unas longitudes de proyecto de 55,50 metros. Y finalmente, un tercer encepado de dos pilotes de 2,0 metros de diámetro diseñados bajo las mismas condiciones de diseño y con unas longitudes idénticas al encepado anterior.

El encepado central está constituido por 10 pilotes que quedan envueltos en el cáliz central del puente sobre el que apoya la estructura. La longitud de los pilotes es de 61,00 metros y su diámetro de 2,0 metros, para una reacción admisible de 15.700 kN por pilote. Se ha llegado a dicha cimentación en un proceso dinámico que ha incorporado a los diferentes

agentes de las fases posteriores de construcción del puente, al haberse licitado el lote de cimentación previamente. Para ello se analiza la situación de máxima rigidez a torsión de la estructura inferior del puente y de los elementos de conexión con la pila central. Se ha calculado una envolvente de los esfuerzos obtenidos en el encepado tanto por variaciones en la rigidez de la superestructura como para diferentes alternativas del proceso constructivo.

A la posición idónea se llega tras el análisis de varias posibles configuraciones de pilotes ocultos dentro del contorno del cáliz de la pila central y la isla natural del Ebro buscando la máxima eficiencia en la absorción de esfuerzos.

En la margen derecha la cimentación está constituida por cuatro pilotes distribuidos en un único encepado de 2,50 metros de canto, de un diámetro de 2,0 metros y con una longitud de 50,00 metros, para una reacción característica de 11.000 kN. Estos pilotes son fruto del recálculo bajo las mismas premisas de diseño indicadas para el resto de la cimentación pero basándose en la extrapolación de los resultados de una prueba de carga efectuada en la pila central.

Los accesos al Puente Pabellón requieren constituir terraplenes en ambas márgenes que permitan elevar la rasante del puente. Para evitar asentamientos y rozamiento negativo en los pilotes se han efectuado precargas del terreno con anterioridad al inicio de las obras.

Las consecuencias principales emanadas de todo lo anterior son:

- La necesidad de no dar por concluida en ningún momento la campaña inicial de reconocimiento geotécnico previa al inicio de las obras, aun cuando se han efectuado sondeos de hasta 78 metros. Resulta imprescindible el seguimiento permanente en la obra y analizar los resultados de las excavaciones, para adaptar las investigaciones complementarias a efectuar.
- Igualmente necesario es ampliar las posibilidades de actuación con la disposición en el 100 % de los pilotes de cuatro tubos sónicos de 4" de diámetro. A través de ellos se ha podido realizar una campaña de sondeos en punta en fase de cimentación sobre el 100 % de los pilotes, limpieza de las puntas de pilotes, tratamientos en punta de inyecciones, *jet grouting* e investigaciones específicas.
- La necesidad de extraer conclusiones in situ del comportamiento real de los pilotes mediante la ejecución por primera vez en España de una prueba de carga con célula interior como medio de rediseño y ampliación de los márgenes de maniobra en obra.
- Los medios disponibles siempre deben permitir la máxima prudencia y seguridad a la hora de evitar todo tipo de desprendimiento en los niveles superiores por los posibles descensos de la bentonita utilizada para el sostenimiento de las paredes de perforación. Los pilotes ejecutados han sido perforados al abrigo de entubación recuperable en los primeros 13,00 metros, utilizando para el sostenimiento de las paredes del resto de la perforación lodos tixotrópicos. La experiencia indica que resulta imprescindible entubar totalmente los tramos de gravas aluviales.

Prueba de carga de pilotes

Se consideró necesaria la ejecución de la prueba de carga para evaluar los criterios de diseño de la cimentación tanto en relación a la resistencia de fuste como de punta de los pilotes y de esta manera establecer los coeficientes de seguridad residuales en el caso de pérdida de resistencia por alguno de los fenómenos anteriores. Se marca un hito en la ingeniería de nuestro país, al verificar la capacidad portante del terreno mediante el accionamiento de una célula bidireccional de Osterberg en el interior de un pilote, y nos equipara a países donde la realización de estas pruebas es más habitual (Fig. 10).

El método de pruebas de carga bidireccional con células Osterberg aplica carga en dos direcciones desde la ubicación de la célula sometida a presión hidráulica. La célula O-cell aplica simultáneamente carga al pilote por debajo de la célula que resiste al movimiento hacia abajo y la misma carga al pilote por encima del O-cell que ofrece resistencia de fuste. Se requiere instrumentación montada a lo largo de la armadura, pudiendo hormigonarse mediante procedimientos habituales adaptados, siendo necesarios una serie de medios auxiliares para la adecuada instalación de la célula y ejecución del pilote.

Los instrumentos localizados en la cabeza del pilote miden el movimiento del mismo con relación a una viga de referencia. La abertura de la célula O-cell se mide directamente con extensómetros *linear vibrating wire displacement transducers* acoplados a los platos de la unidad O-cell. La compresión del pilote entre la cabeza y la parte superior de la unidad O-cell se mide con unidades "Telltale" (extensómetros de varilla). Transductores de deformación de cuerda vibrante son instalados en grupos de cuatro o de dos montados en lados diametralmente opuestos en la jaula de armadura y se disponen para las estimaciones de resistencia por fuste en los diferentes estratos atravesados (Figs. 11 y 12).

La prueba se realiza sobre un pilote en la isla central con una carga bidireccional aplicada de 20 MN. El principal problema que podría inutilizar el ensayo, la pérdida de resistencia de reacción por punta por la existencia de estratos blandos, se salvó disponiendo la célula a una distancia de la punta que permitiese movilizar en el resto del pilote el fuste mínimo estimado en proyecto. Los resultados obtenidos con una interpretación conservadora de los mismos nos proporcionan un fuste unitario y una resistencia por punta superiores a los estimados a partir del estudio geotécnico y empleados en proyecto.

Diseño de la estructura

La geometría del puente constituye una forma orgánica y fluida que no sigue ninguna curva o superficie definida matemáticamente. Su origen no viene motivado por una necesidad de eficiencia estructural, sino por la definición de una geometría de espacios que integran una estructura de paso peatonal con otra que alberga zonas de exposiciones.

A lo largo del desarrollo del diseño se ha trabajado para racionalizar su complejidad y aumentar su sistematización, de forma que pueda construirse de manera relativamente eficiente. Se han adoptado los siguientes pasos específicos para lograr estos objetivos:

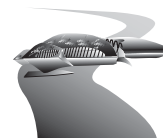


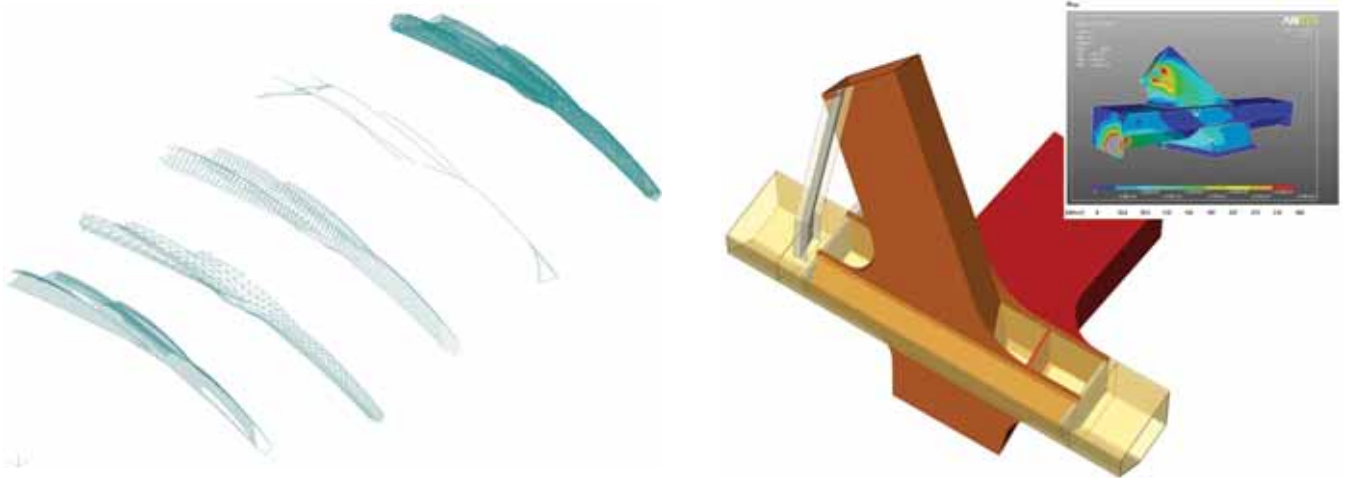
Fig. 10. Célula bidireccional de Osterberg incorporada a la armadura del pilote.



Figs. 11 y 12. Instrumentación y proceso de la prueba de carga.

- Paralelismo entre costillas a intervalos constantes de 3,6 metros, simplificando el montaje y las uniones.
- El ángulo de las costillas respecto a la vertical es idéntico por encima del nivel del suelo, lo que deriva en que los paneles de fachada sean planos en vez de superficies combadas. Esto simplifica la fachada y los elementos de acero situados tras la misma.
- Los elementos estructurales para la fachada se han proyectado industrializados en marcos transportables hasta el emplazamiento y manejables para su montaje in situ.
- A pesar del aspecto curvo de todo el puente, la inmensa mayoría de los elementos de acero son rectos. La curvatura de conjunto se logra por la discretización entre costillas.
- Los cordones superiores se trazan dentro de planos inclinados, por lo que se evitan curvaturas dobles.
- Los elementos longitudinales principales están diseñados para ser fabricados en tramos lo suficientemente largos para reducir al mínimo las soldaduras en obra y facilitar el transporte.
- Los tamaños de las secciones se han calculado usando rutinas informáticas de optimización, lo que da como resultado un peso mínimo de la estructura. No obstante, se ha dado importancia a la repetición de piezas para simplificar la construcción. Esto se logra asegurando que los cambios en el tamaño de las secciones se uniformicen por familias para simplificar las uniones en obra.





Figs. 13 y 14. Modelo GSA con estructura global y Modelos MEF con detalles de uniones.

- La mayoría de los elementos (por número) son secciones estándar de catálogo.
- En la selección del tipo de elementos se ha tenido en cuenta el proceso de unión para el montaje, con el fin de reducir al mínimo las soldaduras en obra y mantener tolerancias incorporadas.

Constitución del sistema estructural

Aunque la forma global del puente no tiene su origen en una geometría clásica estructural, sí ha evolucionado desde el concepto original reubicando la posición de los huecos en la fachada para conseguir una optimización de su respuesta estructural. El esquema básico utiliza la fachada como una piel de malla que contribuye a la resistencia y rigidez global del puente. El revestimiento comprende una malla diagonal de elementos de acero con paneles de relleno de chapa de acero unida a las costillas cada 3,6 metros. El requerimiento arquitectónico de aberturas discretas en la fachada ha obligado a ubicarlas en las partes de la fachada menos solicitadas, determinadas mediante el análisis estructural en 3D. En la búsqueda de la máxima eficiencia se han utilizando rutinas informáticas de optimización. El primer paso fue analizar la estructura con placas en el 100% de la fachada. Se estableció un valor umbral para la utilización de las placas por medio de hojas de cálculo, se retiraron del modelo las placas con baja utilización y luego se volvió a analizar el modelo. Este proceso se siguió repitiendo hasta haber eliminado el 50% de las placas y, finalmente, hasta que solo quedaron el 15% de las placas. La principal ventaja de esta estrategia de diseño es que es eficaz desde el punto de vista estructural, ya que aprovecha la estructura metálica requerida para sostener la fachada, que de otro modo no se aprovecharía para sostener el puente, y a su vez incorpora aberturas en zonas menos solicitadas.

Una vez determinada la forma final de la estructura con la posición de las aberturas principales, y contrastado el comportamiento global con modelos simplificados, se procedió a generar un modelo completo. Para ello se ha utilizado un modelo espacial compuesto de barras unifilares para los perfiles y celosías y elementos placa para el tablero y piezas de unión. Todo ello ha dado lugar a un modelo de más de 30.000 ele-



Figs. 15 y 16. Diagrama de fuerza axial que muestra comportamiento primario.

mentos. Para abordar estas operaciones tan complejas se ha optado por modelarlo utilizando programas de elementos finitos GSA, desarrollados por el propio grupo ARUP. De esta manera se ha podido adaptar el código fuente para introducir rutinas de optimización que han servido tanto para analizar el comportamiento como para continuar optimizando la estructura.

La complejidad de las uniones principales entre el cordón superior y el tablero a través de las patas ha requerido un estudio especial para su diseño. Para ello se ha reproducido la geometría real con modelos locales de elementos placa con la ayuda de programas de elementos finitos especializados para ingeniería de detalle. Estos estudios han permitido analizar y optimizar las uniones críticas (Figs. 13 y 14).

Respuesta estructural

Como ha quedado indicado, el comportamiento estructural del puente queda descrito como una estructura híbrida consistente en un cordón superior y una viga de celosía tridimensional trabajando conjuntamente como tubo. En la zona de la base, las patas de los cordones superiores están atirantados por el tablero de acero ortótropo.

El comportamiento primario demostrado por el análisis estructural es similar al de arcos atirantados por el tablero atados por un "cordón superior" a tracción que actúa para dar continuidad a lo largo del apoyo central. Queda demostrado en las figuras 15 y 16.

Los cordones superiores no son perfectamente funiculares y se produce una flexión importante especialmente cerca de los soportes externos. En las posiciones del cordón superior



Figs. 17 y 18. Diagramas de fuerza axial para arriostramiento de fachada.

con flexión elevada, los elementos de enrejado de la fachada colaboran con él para reducir la flexión, que de otro modo se concentraría exclusivamente en el mismo. Los elementos de fachada actúan también como elementos de alma en una viga de celosía. El cortante vertical que actúa sobre el puente se manifiesta, por lo tanto, principalmente como axil en el cordón superior pero también a través del comportamiento de cercha en los elementos de fachada. Las leyes de axiles de las figuras 17 y 18 muestran cómo los elementos de la fachada trabajan activamente cuando la flexión en los arcos es elevada.

Deformaciones verticales

La disposición de las tipologías estructurales indicadas permite respetar la forma geométrica establecida y al mismo tiempo aprovechar el canto total de la estructura. De esta manera, se ha conseguido una rigidez elevada y se han podido reducir las deformaciones verticales del puente. La flecha máxima prevista debida a la carga no permanente peatonal solo sobre la gran luz es de aproximadamente 10 centímetros. Esto equivale a una relación luz/1500, lo cual es perfectamente compatible con la estructura. La flecha máxima prevista del puente por su propio peso es de aproximadamente 22 centímetros. La mayor parte de ésta se eliminará al incorporar las contraflechas verticales durante su construcción.

Efectos dinámicos y vibración

Los puentes y pasarelas de grandes luces como éste son susceptibles de sufrir niveles de vibración inaceptables. Aunque no afecte al grado de seguridad estructural del puente, la vibración excesiva puede causar alarma en algunos peatones y excepcionalmente puede causar daños a las instalaciones dentro del espacio de los pabellones. A partir de la experiencia de ARUP en el Puente del Milenio en Londres, se observó que existe un umbral superior para la frecuencia natural en el primer modo lateral sobre el que no se requiere una evaluación de la excitación lateral sincrónica, que es aproximadamente 1,3 Hz. La frecuencia natural del puente se ha calculado usando un análisis dinámico modal en GSA.

Los puntos destacados del análisis son los siguientes:

- El *pod 4* es el más crítico respecto a vibraciones dinámicas, lo cual es esperable ya que es el más largo y estrecho de los vanos.
- El primer modo lateral se produce a 0,9 Hz y se muestra en la figura 19. La forma modal es predominantemente lateral con un grado de torsión.



Fig. 19. Forma modal del primer modo lateral.

Se han aplicado criterios teóricos y empíricos desarrollados por ARUP tras experiencias anteriores para calcular la amortiguación requerida para mitigar estos efectos dinámicos. Éstos muestran que, suponiendo una densidad peatonal de $1,5/m^2$, se requiere aproximadamente un 2% de amortiguación crítica. El comportamiento dinámico final depende directamente de la amortiguación real medida in situ, por lo que se ha previsto la instalación de amortiguadores de masa sintonizada en zonas críticas del *pod 4*. Se determinará el nivel de amortiguación adicional necesaria en función de las medidas tomadas sobre la estructura real.

Metodología constructiva de la estructura

Se prevé realizar la construcción de los *Pods 1, 2 y 3* sobre una atagüa de relleno temporal en la margen izquierda del río, con cimbrado temporal para la totalidad de los cuerpos, elevando hasta su ubicación los segmentos más largos posibles por medio de grúas.

El método elegido para montar el *pod 4* es lanzándolo desde la margen derecha incorporando un contrapeso de 160 toneladas. Se trata del *pod* más largo y de geometría más uniforme. La estructura de acero del *pod 4* se construirá sobre terreno seco en la margen derecha hasta el momento de transferencia a la estructura deslizante lanzadera. El puente se montará sobre conjuntos de palas de arrastre (*skid shoes*) fijados a su parte inferior. Las palas de arrastre se desplazarán sobre el parque de empuje mediante gatos hidráulicos de tiro-empuje incorporados y engranados con los raíles del terreno. Dichos elementos constituyen equipos específicos para 10.000 kN.

Los plazos impuestos para la inauguración de la Expo hacían inviables otras alternativas empleadas en otras construcciones, ya que no se podía depender de las avenidas en el río Ebro. Por ello se han reducido al mínimo los trabajos temporales dentro del cauce del río. Con esta disposición se permite avanzar en la construcción del puente por ambos lados, con el fin de minimizar plazos de ejecución totales. □

Carlos Merino Agüeros y Francisco Javier Rueda Merino
Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos
ARUP

Notas

1. Imagen cortesía de la sociedad ExpoAgua Zaragoza 2008 S.A.
2. Imágenes cortesía de Zaha Hadid Architects.

