

El Pabellón Puente: una intensa experiencia profesional

The Pabellón Puente: an intense professional experience

Francisco Millanes Mato, Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
IDEAM S.A. general@ideam.com

Resumen: Se describen los aspectos más relevantes de las experiencias extraídas de los trabajos de Asesoría Técnica para el Control del Proyecto y Ejecución del Pabellón Puente de Expoagua. La metodología desarrollada para dicho trabajo puede resultar de interés y aplicación en otras obras singulares.

Palabras Clave: Estructuras triangulares; Control del Proyecto; Control de ejecución de estructuras; EXPOZARAGOZA 2008

Abstract: The article describes the more relevant aspects of the Technical Consultancy works for the Project and Construction Control of the Pabellón Puente or Bridge Pavillion at the Zaragoza Expo. The methodology employed for this work may be of interest and application in other special works.

Keywords: Triangular structures; Project Control; Building control of structures; EXPOZARAGOZA 2008

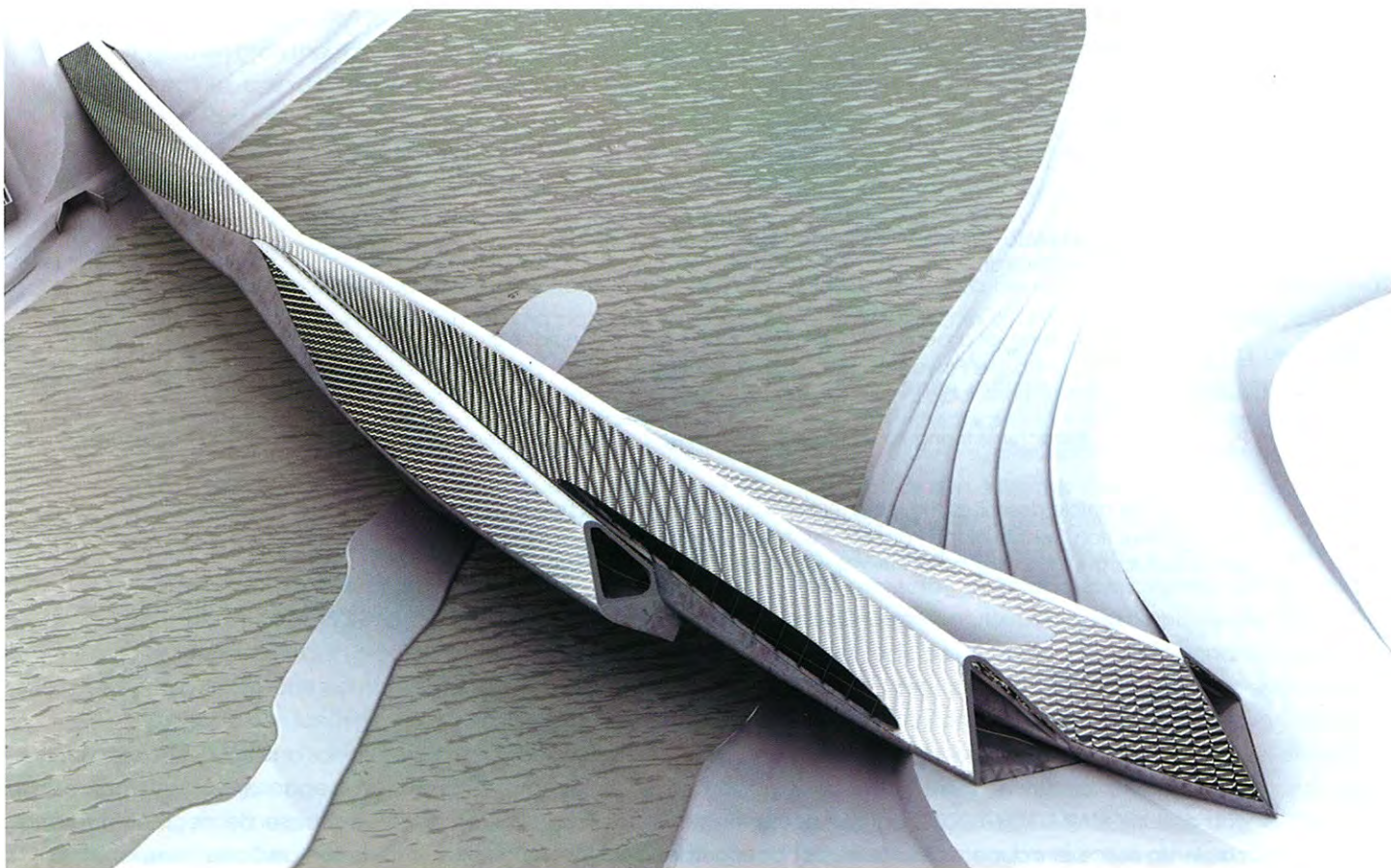
El Pabellón Puente constituye sin duda una de las actuaciones clave más simbólicas, si no la mayor, de EXPOZARAGOZA 2008, por su singular emplazamiento sobre el cauce del río Ebro, por configurarse como puerta de entrada en el recinto de la exposición y por el marcado carácter mediático tanto de la propia obra como de su autora, la reconocida arquitecta iraquí Zaha Hadid.

La propuesta de Zaha Hadid resultó ganadora de un Concurso de Anteproyectos, convocado por la Sociedad ExpoAgua Zaragoza 2008, cuya fase final se restringió a 14 equipos de arquitectos e ingenieros seleccionados a partir de las fases previas. El Concurso de Anteproyectos para el Pabellón Puente se realizó con bastante celeridad, de manera que entre la convocatoria con las bases del mismo y la adjudicación final, en julio de 2005, apenas mediaron cuatro meses.

La propuesta ganadora participa y profundiza en las ideas y conceptos básicos de flujo y fragmentación que subyacen en la búsqueda de nuevas formas y espacios de Zaha Hadid. El resultado es una obra innovadora, de enorme complejidad geométrica, en la que se mezclan, bifurcan y entrecruzan múltiples espacios y volúmenes, estructurados en

cuatro "pods" generados a partir del desarrollo, traslación y bifurcación, según directrices curvas, de una sección transversal base de geometría rombooidal. Los flujos resultantes de tales desplazamientos crean múltiples y muy complejas intersecciones de superficies, volúmenes y espacios cuyo atractivo formal y arquitectónico arrastra y plantea, inexorablemente, problemas resistentes y constructivos que en ningún modo pueden abordarse desde la racionalidad de las concepciones estructurales convencionales.

Desde el punto de vista formal, aunque sin consecuencias extrapolables al diseño estructural, el Pabellón Puente nos retrotrae, en una serie de guiños sugerentes y atractivos, a una de las obras cumbres de la historia de la ingeniería de puentes: el colosal Firth of Forth (1890), proyecto de los ingenieros John Fowler y Benjamín Baker, imponente en su inserción en las aguas y el paisaje del estrecho de Forth en Escocia, cuya robustez, masividad y estética tan poco convencionales resultaron absolutamente revolucionarias en el ámbito del diseño de puentes de su época. No resulta por tanto extraño que Zaha Hadid y su equipo iniciaran la presentación de su propuesta (ver ref. (1)) con una imagen del citado Firth of



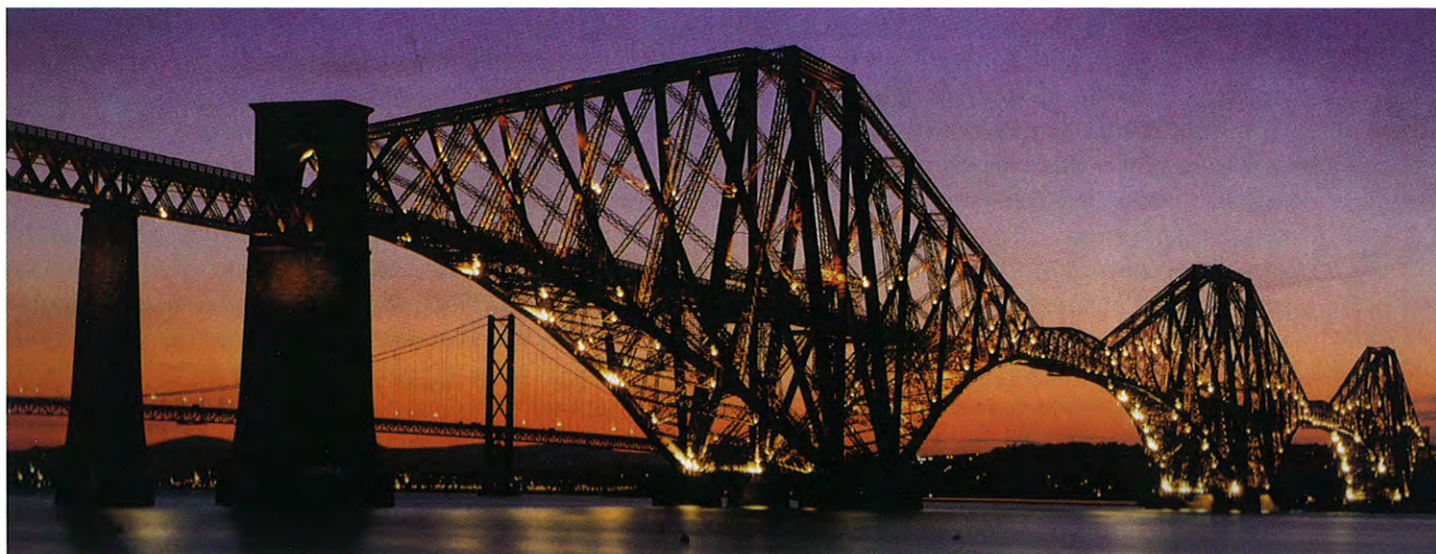
Maqueta del
Pabellón
Puente.

Forth, ni que desarrollaran una solución en celosía espacial para su esqueleto estructural.

El Pabellón Puente se concibió, según las bases del concurso, como un pabellón de contenidos alojado dentro de un puente, que a su vez debía cons-

tituir la puerta principal de acceso al recinto de la exposición desde la zona de la estación del AVE de Delicias, al otro lado del cauce del río Ebro. Se trata, por tanto, de una obra singular que integra un doble concepto: el arquitectónico de un edificio-recin-

El puente
Firth of Forth.



to de espacios de exposiciones, a diferentes niveles, sobre el río y el ingenieril, constituyendo un verdadero puente de 280 m. de longitud, con dos grandes vanos de 125 y 155 metros de luz, a ambos lados de un apoyo central ubicado en el propio cauce del río Ebro. De la citada dualidad, y de la potencia y prioridad de las formas y arquitectura de los volúmenes y espacios internos, se deriva, inexorablemente, la enorme complejidad de la solución resistente y estructural, fuertemente integrada en el concepto arquitectónico y, por tanto, supeditada a múltiples y muy estrictos condicionantes formales.

La Asesoría Estructural Especializada para el control del Proyecto y Ejecución del Pabellón Puente

El calendario en el que debía materializarse la idea de Zaha Hadid, una vez seleccionada en julio 2005, era extremadamente rígido, marcado inexorablemente por la fecha de inauguración de Expo Zaragoza, el 14 de Junio de 2008. Los hitos se sucedían sin margen alguno para desvíos o imprevistos:

- Proyecto Básico en la primera quincena de enero 2006.
- Anteproyecto a mediados de marzo 2006, permitiendo suministrar una primera información a los contratistas seleccionados para participar en el proceso de licitación por sistema restringido.
- Proyecto Constructivo a finales de mayo 2006.
- Licitación a inicios de junio 2006 y adjudicación en la primera quincena de julio 2006.
- Inicio del Proyecto de Detalle de la estructura metálica por el contratista adjudicatario en agosto 2006.
- Finalización de la ejecución de la estructura a finales 2007/inicios 2008, de manera que pudiera, ulteriormente, procederse a la terminación de las obras de los diferentes proyectos de arquitectura, fachadas e instalaciones, así como, finalmente, del proyecto de contenidos y exposiciones del propio Pabellón Puente.

La dificultad de la actuación se acentuaba no sólo por su complejidad y singularidad estructural y geométrica, sino también por los múltiples y estrictos condicionantes derivados de las interrelaciones de la estructura metálica con la arquitectura, fachadas

e instalaciones, cuyos proyectos de detalle debían desarrollarse simultáneamente. Por razones logísticas, el proyecto y ejecución de las cimentaciones del Pabellón Puente, con múltiples pilotes de 2.000 mm. de diámetro y más de 70 m. de profundidad, hasta entonces nunca realizados en nuestro país, debía definirse y abordarse con anterioridad a la propia finalización de la fase de Anteproyecto del conjunto de la estructura del Pabellón Puente...

En el citado contexto de gran complejidad estructural y constructiva, con unos márgenes de plazo muy estrictos, la sociedad ExpoAgua Zaragoza 2008 encargó a IDEAM S.A., bajo la dirección del firmante de este artículo, la Asesoría y Asistencia Técnica especializada para el Control del Proyecto y Ejecución de la estructura del Pabellón Puente, con objeto de asesorar y agilizar la toma de decisiones por la Dirección General de Construcción y la Jefatura del Área de Obras Especiales de la Expo, asegurando no sólo la viabilidad del programa de plazos establecido sino, al mismo tiempo, la calidad y seguridad del proyecto y obras del Pabellón Puente, minimizando el riesgo de imprevistos e incidencias que pudieran poner en peligro no sólo la seguridad de las obras sino, también, la propia viabilidad técnica de la actuación.

Durante la **primera fase de Redacción del Proyecto** debía abordarse el control del Proyecto de Ejecución de Arup S.A., ingeniería consultora asociada a Zaha Hadid en el equipo autor de la propuesta ganadora. Dicho control se planteó de forma rigurosa, en la línea de los **"Independent Checks"** habituales fuera de nuestro país para estructuras singulares o de cierta entidad, mediante un seguimiento preciso a través de modelos paralelos de análisis de contraste, lógicamente más simplificados que los utilizados para el proyecto, pero de suficiente garantía para permitir la evaluación y validación tanto de los esquemas y conceptos estructurales planteados como de los resultados de los complejos modelos de análisis que soportan los dimensionamientos de los diferentes elementos, los diseños de los detalles, la concepción y justificación de los procesos de montaje, especialmente singulares en este caso, y de los planes de instrumentación, seguimiento y control de calidad de la ejecución del contratista y de su propio taller metálico.

Durante la **fase de Licitación de la Obra**, además del estudio y valoración técnica de las diferentes

ofertas presentadas, y del análisis de la idoneidad de los planes de obra, de los recursos materiales y humanos y de los planes de aseguramiento de la calidad propuestos por los licitadores, resultaba asimismo necesario colaborar en el control y la coordinación de la transmisión de información entre los proyectistas, la propiedad y las restantes partes implicadas: empresas constructoras, talleres metálicos, empresas especializadas en el montaje, suministradores de acero, etc., con objeto de permitir el control, por parte de ExpoAgua, de las eventuales afecciones a la seguridad, economía, calidad, arquitectura o plazos, de cuantas variantes o alternativas pudieran suscitarse por los licitadores o sus subcontratistas. Dadas las rigideces y múltiples condicionantes de todo tipo de la actuación se permitiría así orientar las ofertas y sus posibles variantes hacia procesos que no pusieran en riesgo la viabilidad técnica, económica o de plazos de la obra. Resultaba asimismo imprescindible la intermediación y la asesoría a los responsables técnicos de ExpoAgua en la toma de decisiones frente a los eventuales conflictos que pudieran surgir entre las exigencias y planteamientos de los proyectistas y las servidumbres derivadas del cumplimiento de los objetivos de calidad y seguridad de ejecución en los estrictos plazos disponibles para la obra.

Durante la **ulterior fase de Ejecución de las Obras** las tareas y funciones a desarrollar serían básicamente:

- control de la viabilidad técnica del Plan de Obra propuesto por el adjudicatario y seguimiento de sus diferentes hitos, muy condicionados por los condiciones y plazos de suministro del acero, la complejidad del desarrollo de las ingenierías de detalle de planos de taller, montaje y empuje de la estructura, así como las múltiples interferencias con los proyectos de detalle de arquitectura, fachadas, instalaciones, etc.;
- control de la adecuación de los Planes de Aseguramiento de Calidad a los requisitos técnicos del Proyecto, lo que afectaba básicamente al control de los planos de taller, de los procedimientos de control geométrico y tolerancias en los montajes en taller y obra, así como del Plan de Puntos de Inspección de la ejecución de la estructura metálica;
- control de la definición y justificación técnica de cualquier adaptación de los detalles constructi-

vos (uniones, soldaduras, etc.), o de las fases o procedimientos constructivos y de empuje, respecto de lo previsto en Proyecto, así como de las justificaciones técnicas de seguridad de los medios y sistemas auxiliares utilizados;

- informe y valoración de los Proyectos de Instrumentación y Seguimiento de los controles estructurales y geométricos (reacciones, contraflechas, deformaciones, movimientos) durante las sucesivas fases de la ejecución, montaje y empuje de la estructura;
- seguimiento de los resultados de los diferentes programas de control ya reseñados e informe y valoración de los eventuales medidas a adoptar para hacer frente a posibles desvíos respecto a los valores previstos, así como a los inevitables errores e incidencias durante la ejecución de las obras;
- finalmente, lo que resultaba imprescindible en una actuación de esta naturaleza, Asesoría Técnica a ExpoAgua para facilitar la toma rápida de decisiones en caso de incompatibilidades o no confluencia entre propuestas de las diferentes partes implicadas.

En función del alcance reseñado, y de la imperiosa necesidad de garantizar un control y seguimiento preciso de los múltiples aspectos de proyecto y obra, con criterios propios y autónomos frente a las diferentes partes implicadas, el encargo de la Asesoría Técnica a IDEAM S.A., preveía una fuerte asignación de personal especializado, con dedicación completa a la misma, que durante los más de dos años que se prolongaron los trabajos de proyecto y ejecución de la obra, llegó a superar las 11.000 horas de ingeniería cualificada y con elevada experiencia. (1)

La adjudicación de la obra, como luego se tratará, a una oferta que contemplaba una variante estructural a la solución base del Proyecto de Licitación hizo lógicamente necesario prolongar el equipo y tareas de control del Proyecto de Ejecución durante la práctica totalidad del periodo de ejecución de las obras, periodo en el que se desarrolló el Proyecto de Detalle de la variante, en necesaria simultaneidad con el ritmo de ejecución de la estructura, se-

(1). El equipo de IDEAM S.A. asignado a esta Asesoría, dirigido por Francisco Millanes Mato, con la colaboración de Javier Pascual Santos, contó con la dedicación completa de los ingenieros Enrique Bordo Bujalance, Pablo Solera Pérez y Fernando Ruano.

gún la técnica "fase track" cada vez más habitual en obras de esta naturaleza.

El Proyecto de Licitación

El innegable atractivo de la concepción arquitectónica y formal de la propuesta ganadora de Zaha Hadid-Arup no se adaptaba en modo alguno a las tipologías estructurales propias de los puentes. Su descripción detallada (ref. (1) y (2)) puede también encontrarse en otro artículo de esta misma *Revista*. El Pabellón Puente se configura en cuatro grandes cuerpos, denominados "pods". Los dos volúmenes principales, de 125 y 155 metros de longitud, se ubican uno a continuación de otro, a cada lado del apoyo principal de la obra sobre el propio cauce del río Ebro. En el vano de menor luz, a ambos laterales del "pod" principal, surgen, bifurcándose y macizados al mismo, dos nuevos cuerpos o "pods", de algo menor entidad, donde se ubicarán futuros espacios dedicados a funciones expositivas.

Podría decirse, por tanto, que la estructura del Pabellón Puente se configura inicialmente como un dintel continuo con un apoyo central intermedio y dos vanos laterales de 125 y 155 m. de luz. El de mayor luz consta de una sección transversal única cerrada, en sección tubular con geometría básicamente romboidal dividida, a su vez, en dos subsecciones quasi-trianguulares por el forjado intermedio horizontal que conforma la plataforma del edificio Pabellón. La subsección triangular superior constituye el espacio peatonal y expositivo de uso público. La subsección triangular inferior sirve para alojar servicios e instalaciones. El vano de menor luz presenta una geometría espacial más compleja, en la que del "pod" principal surgen, se maclan y bifurcan los dos "pods" laterales, configurándose una sección transversal variable, inicialmente unitubular, que progresivamente se transforma en tricelular, siguiendo un desarrollo según directrices curvas en planta y alzado y manteniéndose un esquema básicamente romboidal para la sección transversal de cada una de las células, análogo al ya descrito para el vano principal.

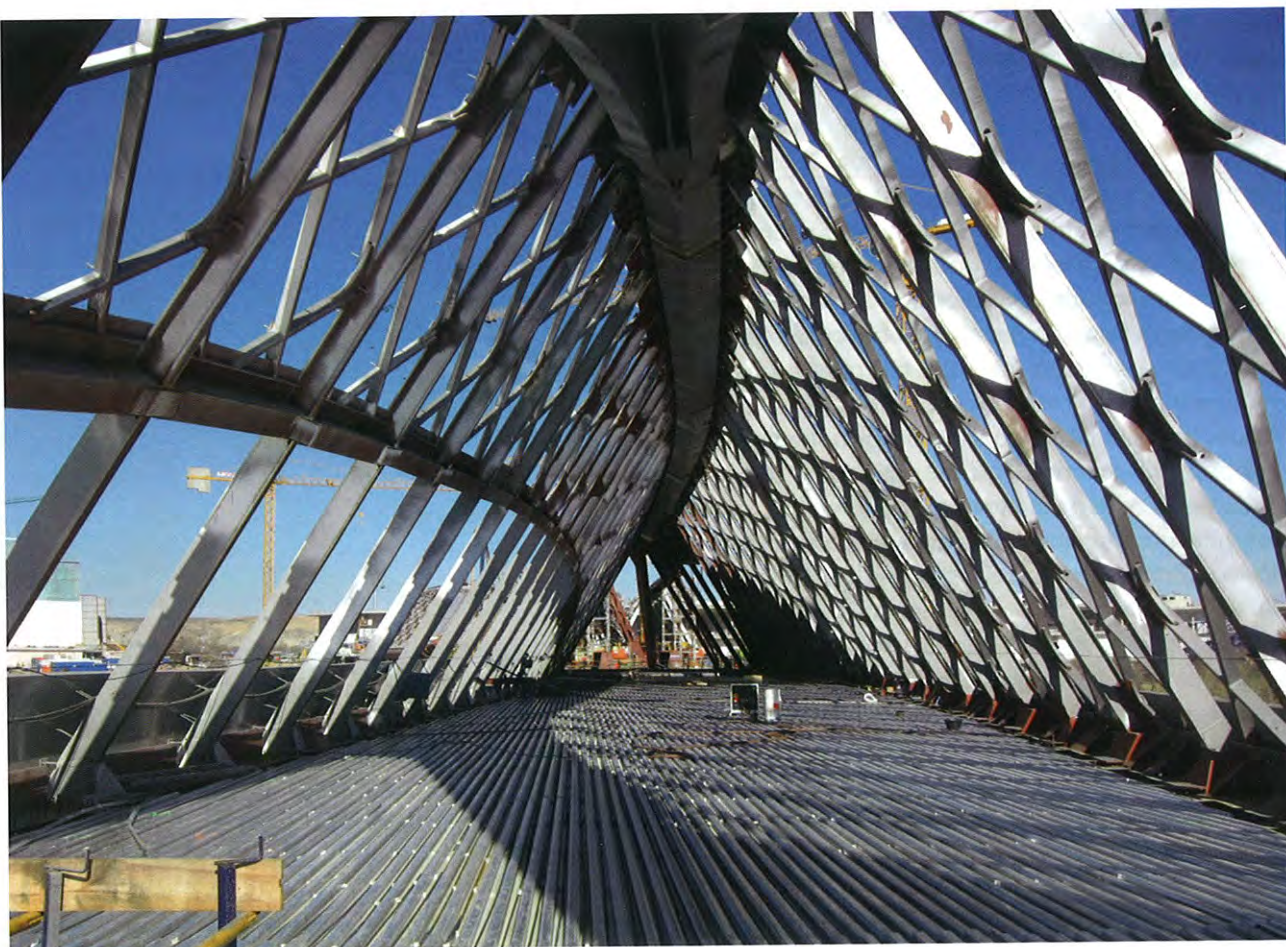
El esquema resistente planteado en la propuesta ganadora, y fuertemente integrado en la concepción arquitectónica de la misma, presentaba un concepto estructural ciertamente singular y hetero-



El Pabellón Puente durante su construcción.

dox, basado en un sistema híbrido de estructura laminar tipo cáscara, constituido por una celosía espacial de diagonales cruzadas, o "diagrid", alojadas en la propia superficie o contorno exterior del Pabellón, con un trabajo fundamental de flexión como dintel continuo de dos vanos y una gran rigidez a torsión como sección tubular, muy eficaz en la respuesta frente a acciones excéntricas y no simétricas. A dicho esquema resistente en celosía espacial se añadía un sistema estructural complementario constituido por unos cordones superiores, más o menos alojados en el vértice superior de la sección transversal romboidal, que en cierto modo colaboraban como cabeza superior de la sección tubular pero que, al mismo tiempo, se separaban de ella en las proximidades de los apoyos intermedios y central a modo de pórticos o arcos que, a su vez, se bifurcaban lateralmente en dos patas al llegar a los apoyos de estribos. Los empujes horizontales de las patas no se transmitían a cimentación sino que se auto-equilibraban mediante un tirante horizontal constituido por la propia estructura del Pabellón Puente, análogamente a los convencionales esquemas de arcos atirantados tipo bow-string. Las condiciones geométricas y arquitectónicas conducían, en cualquier caso, a unas directrices de estos cordones-arco irregulares, ligeramente aporticadas y muy alejadas de la necesaria funicularidad, lo que constituye un requisito básico para la eficacia resistente de este tipo de sistemas y la consiguiente reducción del nivel de flexiones en los mismos.

Detalle
arco/diagrid/
costillas.



Una serie de costillas transversales, moduladas cada 3,60 m. a lo largo de toda la estructura, vinculaban ambos sistemas –celosía y arco– permitiendo asimismo el cuelgue de las cargas actuando sobre el forjado horizontal intermedio del edificio Pabellón.

El esquema resistente descrito suscitó desde el inicio múltiples interrogantes sobre la eficacia de la coexistencia de dos mecanismos estructurales tan diferentes en su rigidez (celosía espacial/arco con directriz deformada) y con múltiples vinculaciones hiperestáticas entre ambos, complicadas a su vez por una concepción arquitectónica del diseño de los detalles de vinculación entre los diferentes elementos (arco/costillas/diagrid) que introducía excentricidades muy significativas respecto a la directriz de los mismos, generando flexiones parásitas que podrían afectar seriamente a su capacidad resistente y, principalmente, a los fenómenos de inestabilidad de los elementos comprimidos.

Durante las fases de Concurso y Proyecto Básico no había sido posible esbozar una evaluación sufi-

cientemente fiable de la citada problemática estructural que, por otra parte, tampoco podía abordarse a partir de extrapolaciones o modelos simplificados avalados por experiencias previas, en este caso inexistentes, dada la novedad y singularidad de la tipología estructural.

Los plazos disponibles, por estrictas razones de calendario, para la redacción del Proyecto de Licitación de la estructura, de escasos 3 a 4 meses, no hacían técnicamente viable abordar todos los análisis estructurales necesarios para una adecuada justificación resistente del dimensionamiento de los diferentes elementos y de la seguridad global del conjunto de la estructura, tanto en fases de servicio como durante las múltiples fases del lanzamiento por empuje del “pod” 4 sobre el cauce del río Ebro. Tampoco resultaba abordable el diseño, dimensionamiento y definición geométrica de los múltiples y complejos detalles estructurales y encuentros entre elementos, cuya propia identificación no resultaba ni siquiera posible dadas las numerosas servidumbres

e interferencias con los proyectos de arquitectura, fachadas, lanzamiento e instalaciones que se encontraban con niveles de desarrollo análogos, o incluso más retrasados, que el propio proyecto de la estructura.

En dicho plazo tampoco resultaba técnicamente abordable el desarrollo de un modelo de análisis tridimensional suficientemente refinado para reproducir adecuadamente toda la problemática estructural planteada y, mucho menos, proceder a su necesario contraste para, posteriormente, abordar el control del dimensionamiento de los distintos elementos y uniones, así como de la seguridad frente a los fenómenos de inestabilidad local y global del conjunto de la estructura. El modelo tridimensional completo, desarrollado por ARUP ingeniería constaba de algo más de 70.000 elementos.

En el citado contexto, los trabajos de Asesoría de IDEAM S.A. se orientaron forzosamente al desarrollo de modelos tridimensionales simplificados de barras que permitieran profundizar en el conocimiento de la respuesta estructural del esquema resistente planteado frente a diferentes hipótesis de carga uniformes y excéntricas, así como durante las fases de lanzamiento del "pod" 4. Se trataba principalmente de identificar:

- a) la interrelación entre los mecanismos resistentes, complejos y poco ortodoxos, del arco y la celosía espacial;
- b) la relevancia de las flexiones parásitas derivadas de las excentricidades entre las alineaciones de los diferentes elementos y los detalles de las vinculaciones entre ellos;
- c) los problemas de inestabilidad de los elementos aislados (arco, costillas, diagrid) así como de zonas o paneles de la propia estructura laminar, especialmente en las zonas de transmisión de reacciones a los apoyos de los estribos y del apoyo central sobre el cauce, zonas en las que se generaban concentraciones localizadas de esfuerzos, muy sensibles a los repartos hiperestáticos entre elementos de diferente rigidez, y, por tanto, susceptibles de desarrollar mecanismos frágiles de inestabilidad de elementos o paneles aislados;
- d) los fenómenos resistentes que pudieran desarrollarse de forma localizada en las numerosas zonas singulares de la estructura (encuentros

en zonas de maclas entre "pods", intersecciones arco-celosía-costillas, nudos de bifurcación entre patas de cordones de arco, zonas de apertura de huecos en fachada, zonas de encuentro entre arcos y tablero, zonas de apoyo por ejemplo), etc.

Dentro de nuestras tareas como Asesoría Técnica abordamos la realización y análisis de numerosos modelos simplificados, en 2D y 3D, orientados fundamentalmente a la identificación y profundización en los problemas estructurales reseñados, para cuya valoración y evaluación resultó imprescindible realizar múltiples análisis de sensibilidad de las respuestas resistentes que nos preocupaban respecto a posibles rangos de variación de los parámetros geométricos y de rigidez relativa entre los diferentes elementos de la estructura.

Las conclusiones de los estudios realizados nos reafirmaron en la eficacia de esta metodología, basada en análisis estructurales de sensibilidad sobre modelos sencillos, para profundizar en la identificación y valoración de los problemas resistentes fundamentales de estructuras de gran complejidad, con esquemas y tipologías poco ortodoxas o no convencionales. En contra, pensamos, de tendencias cada vez más orientadas a abordar desde el inicio innumerables análisis tridimensionales con modelos -de 70.000 (!) elementos en nuestro caso- de estructuras cuyo concepto estructural no se domina o, simplemente, no resulta adecuado.

Las conclusiones de los estudios realizados parecían aconsejar introducir ciertas adaptaciones en el esquema resistente inicialmente planteado en el Proyecto Básico:

- el diseño de una estructura laminar relativamente deformable rigidamente empotrada en el apoyo intermedio sobre el cauce resultaba muy sensible, por su alto hiperestatismo, al juego de rigideces relativas entre la estructura y la cimentación, principalmente bajo la acción de cargas excéntricas o descompensadas entre los dos vanos principales de la estructura, lo que podría afectar seriamente al dimensionamiento de las cimentaciones del apoyo principal de la misma, sobre el cauce del río Ebro, cuya ejecución con pilotes de gran longitud estaba ya contratada y, como se ha indicado, debía terminarse mucho

antes de disponerse del proyecto definitivo de la estructura. Se decidió por tanto modificar el diseño planteando una articulación sobre grandes apoyos tipo pot en dicho apoyo central;

- la articulación de la estructura en celosía espacial sobre el apoyo central eliminaba además el riesgo de materializar, en el caso de empotramiento, un punto duro que pudiera sobresolicitar, o inestabilizar, ciertas zonas o elementos aislados (costillas, paneles del diagrid de fachada) inicialmente concebidos como secundarios. El eventual filtrado de los momentos de continuidad de la estructura hacia la cimentación creaba, por otra parte, un complejo problema de transmisión localizada de esfuerzos de flexión en el nudo espacial cimentación/"pods" muy difícil de gobernar con la fiabilidad exigible;
- la concepción de una celosía espacial, trabajando híbridamente con los cordones-arco alejados de la funicularidad configuraba un esquema resistente altamente hiperestático y poco eficaz, cuyo reparto de esfuerzos entre elementos resultaba muy sensible a diferentes parámetros, e incluso a las propias técnicas de modelización, difíciles de controlar. Los análisis realizados habían resultado muy concluyentes a este respecto, detectando una peligrosa sensibilidad del esquema estructural planteado a las complejas condiciones de rigidez del mismo, con variaciones muy significativas de las reacciones, y por tanto de las sollicitaciones en arcos/patas/celosías de las zonas adyacentes, no sólo en el apoyo central sino también en el apoyo de estribo de los "pods" 1 a 3, donde la fuerte oblicuidad de la alineación en planta de los apoyos, junto a la enorme rigidez a torsión de la celosía tubular, introducían un factor de hiperestatismo suplementario de difícil control;
- las sobresolicitaciones no controladas en la estructura de celosía no podían admitirse por el riesgo de inestabilidad por pandeo de cualquiera de los elementos comprimidos afectados que, en ausencia de respuesta post-crítica garantizable, podría arrastrar un colapso generalizado de amplias zonas de la estructura;
- parecía por tanto aconsejable plantear ciertas adaptaciones en el esquema estructural inicial en la línea de crear elementos de diafragma rígidos que canalizaran una transmisión clara y con-

trolada de las reacciones a los puntos de apoyo, al mismo tiempo que, con carácter general no limitado a las zonas de apoyo, se revelaba también necesario acometer modificaciones en el diseño de la celosía espacial inicialmente prevista, para dotarla de las necesarias garantías resistentes frente a fenómenos de inestabilidad, tanto en fases de servicio como, principalmente, durante el lanzamiento.

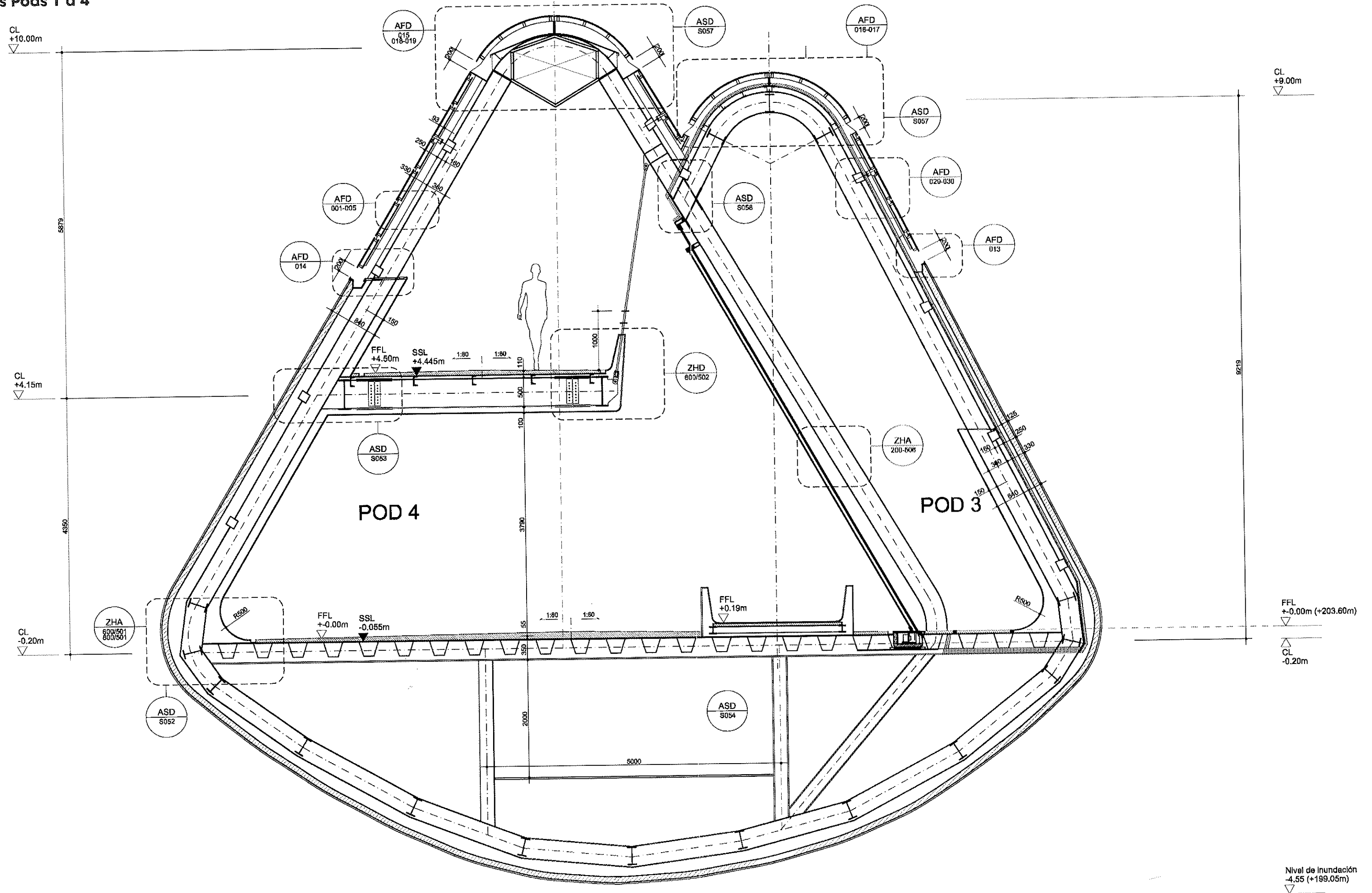
La evolución del concepto estructural en la Propuesta Variante adjudicada

El primer proyecto de la estructura, desarrollado por ARUP ingeniería en poco más de 3 meses, sirvió de base para la licitación de la construcción de la cimentación y del resto de la estructura. En el Concurso de Licitación de las obras de esta última se permitía la presentación de una variante al concepto estructural y al proceso de montaje, dentro del más estricto respecto a las formas, arquitectura y geometría del proyecto de Zaha Hadid.

En la valoración técnica de las ofertas, en las que IDEAM participó activamente dentro de sus tareas de Asesoría a ExpoAgua Zaragoza 2008, se puso especial énfasis en:

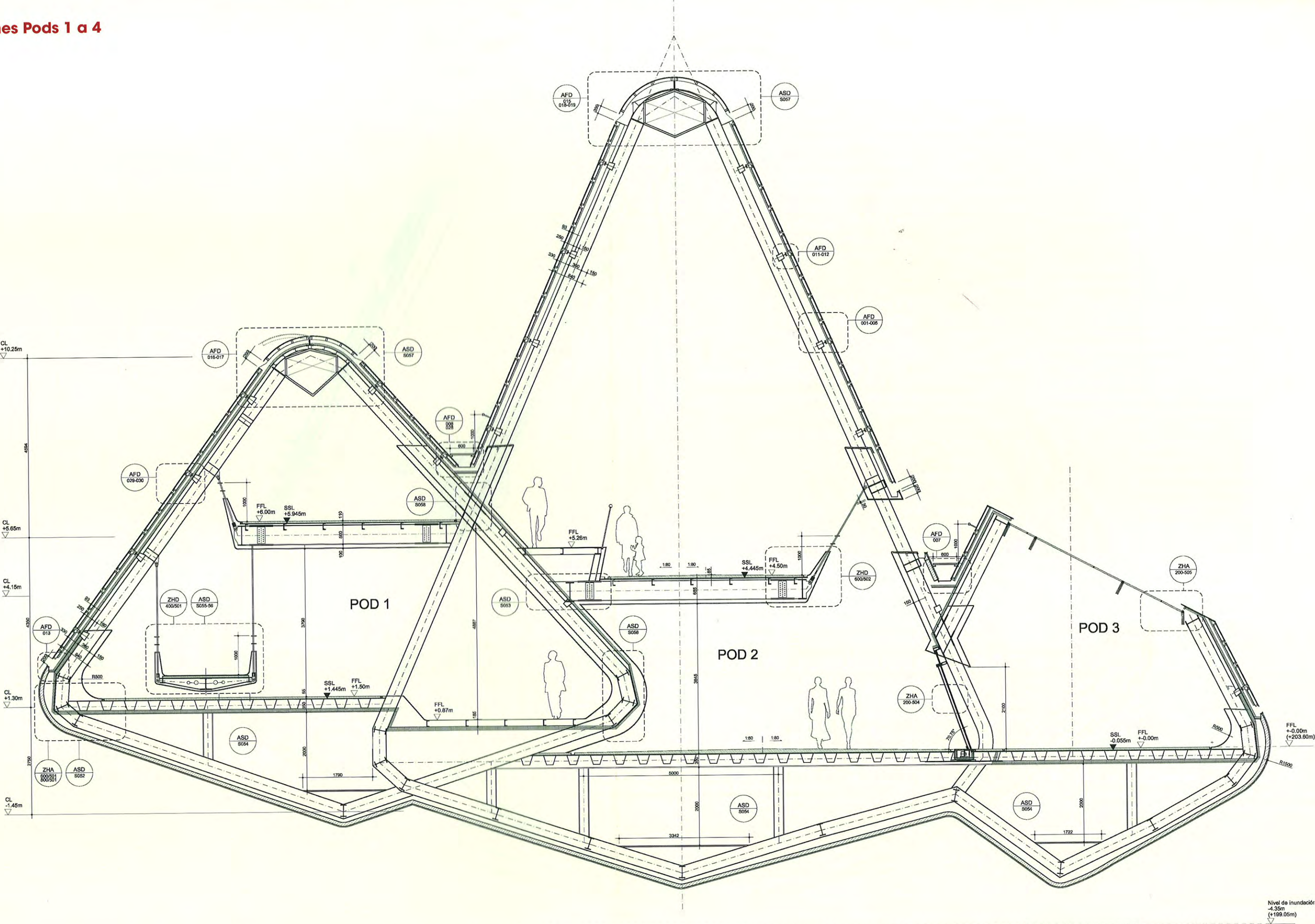
- el análisis realizado por los licitadores de la problemática estructural y constructiva planteada, demostrando un adecuado conocimiento de la misma y planteando soluciones a todos aquellos aspectos relevantes que no habían podido quedar suficientemente resueltos en el escaso plazo disponible para la redacción del Proyecto de Licitación;
- la incorporación en la oferta de unos medios materiales y humanos acordes en experiencia y cualificación a la magnitud de los problemas técnicos a resolver en un plazo máximo de 15 a 18 meses, lo que no se limitaba a los equipos asignados a labores de producción sino también, o tanto más, a los equipos asignados a la ingeniería del proyecto de detalle, a la ingeniería del taller metálico y a la ingeniería del proyecto de lanzamiento. A modo ilustrativo, habíamos estimado que los medios asignados para el desarrollo de la ingeniería de detalles y planos del taller metálico debería ser capaz de dar respuesta a

CL
+10.00m



Nivel de inundación
-4.55 (+199.05m)

Secciones Pods 1 a 4



Esquema
resistente
Propuesta
Variante
(Cortesía de
FHECOR
Ingenieros).

CAJÓN

DIAFRAGMAS INTERIORES

CORDONES SUPERIORES

PATAS

COSTILLAS

PANELES DE FACHADA
RESTO DE ELEMENTOS

*Elementos estructurales que
constituyen la solución propuesta*

Sección del
cordón superior.

no menos de 50.000 horas, previstas inicialmente, y que fueron ampliamente superadas por la realidad de la obra.

Lógicamente se dió prioridad a aquellas ofertas que, respetando estrictamente los condicionantes arquitectónicos, dieran máximas garantías de resolución de los problemas estructurales, constructivos y de montaje pendientes, asegurando la viabilidad técnica, económica y de plazos de la actuación más simbólica de EXPOZARAGOZA 2008, verdadero referente mediático de la misma.

El Concurso de Licitación de los obras de la estructura del Pabellón Puente fue adjudicado, en julio de 2006, a la UTE DRAGADOS-URSSA que incorporaba en su equipo a la consultora FHECOR, autora del Proyecto Variante ofertado, y a la empresa LASTRA, especializada en lanzamientos y procesos de montaje singulares.

La oferta seleccionada desarrollaba una solución Variante al concepto estructural planteado en el Proyecto de Licitación que, sin afectar prácticamente a la geometría, forma, instalaciones y arquitectura del mismo, modificaba drásticamente su esquema resistente que, así lo entendíamos, sentaba las bases para garantizar la adecuada resolución de los problemas estructurales pendientes ya comentados, a la vez que mejoraba sustancialmente el proceso constructivo y de lanzamiento previstos, eludiendo cualquier interferencia con el cauce sobre el río Ebro, así como el proceso de gunitado del sofito, previsto inicialmente por razones archi-

tectónicas –aunque finalmente no ha sido realizado– y que nos suscitaba serias dudas, en cuanto a su viabilidad constructiva y garantías de estanqueidad, si se realizaba sobre la superficie discontinua de la celosía espacial inicialmente proyectada.

La Propuesta Variante consistía, de forma resumida y esquemática, en sustituir el esquema resistente de triangulación espacial de barras del sofito por una chapa continua y rigidizada que permitía materializar un esquema resistente en sección cajón, uni o multicelular según la zona y el tipo de “pod”, en la parte bajo cota de rasante. Este cajón se apoyaba en el encepado de la pila central por una sencilla articulación longitudinal a través de unos enormes aparatos de apoyo tipo pot, y se reforzaba localmente en la citada zona, la más solicitada y exigente desde el punto de vista de la seguridad, mediante doble alma metálica y el recurso a la doble acción mixta con hormigón rigidizador conectado a las chapas comprimidas de acero. El cajón metálico se proyectaba rigidizado en sentido transversal mediante una serie de potentes diafragmas de alma llena, equidistantes cada 3,60 m. coincidiendo con las costillas de la celosía espacial superior, en los que se habían previsto huecos para el paso de las instalaciones. La oferta había incorporado, a su vez, un estudio específico sobre las posibilidades técnicas de ejecución del gunitado que, finalmente, se preveía sobre chapa continua con un espesor medio aproximado de 60 mm. y que, finalmente, fue eliminada por los arquitectos sustituyendo el gunitado por un simple pintado en tonos grises de la chapa del cajón metálico. Por otra parte, la losa ortótropa del tablero en la solución licitada, muy compleja y costosa de ejecución, se había sustituido por un forjado de hormigón armado ligero, con chapa grecada de encofrado perdido, que garantizaba la colaboración con el cajón metálico en la resistencia frente a los esfuerzos de torsión.

En opinión de esta Asesoría, y así se hizo constar en el informe de valoración de las ofertas, la Propuesta Variante de la UTE DRAGADOS-URSSA presentaba un concepto estructural y resistente claro, seguro y muy activo tanto en fases constructivas como una vez terminada su ejecución. El potente cajón inferior, multi-arriostrado transversalmente por el sistema de riortras cada 3,60 m. conformaba una tipología estructural de la máxima rigidez y eficacia, y en cierto modo ortodoxa dentro de su singularidad, cuya respuesta resistente nos resultaba bien conocida y familiar en el ámbito de la construcción metálica.

Vista lateral del diagrid y aberturas de ventanas.



La robustez del cajón metálico inferior lo convertía en el elemento resistente fundamental, permitiendo aliviar el trabajo y la responsabilidad resistente del esquema estructural híbrido de la celosía espacial/cordón-arco/patas inclinadas del Proyecto de Licitación, que se respetaba en la subsección superior por encima de la cota de forjado de la plataforma del edificio Pabellón.

Aunque el nivel de desarrollo de la Propuesta Variante, para el que se dispuso de sólo algunas semanas, sólo podía considerarse como de Anteproyecto Avanzado, en el informe de valoración técnica ya destacábamos que la citada propuesta dejaba adecuadamente planteadas las bases para la solución de las cuestiones y dudas pendientes, garantizando, a nuestro juicio, la viabilidad técnica y constructiva de la misma en los estrictos plazos disponibles. El propio contraste de los valores de las reacciones que se obtenían en los análisis y estudios que acompañaban a la documentación técnica de la oferta con las magnitudes que habían servido de dimensionamiento al Proyecto de Cimentación de los pilotes del Pabellón Puente, que por razones de calendario había sido realizado con anterioridad por Arup ingeniería, y ya estaba licitado y en fase de ejecución, y que estaba siendo objeto de supervisión

dentro de las tareas que tenía adjudicadas IDEAM S.A., no hizo sino confirmar las ventajas del concepto estructural de la Propuesta Variante, mucho menos sensible a las incertidumbres del modelo de cálculo y a factores de difícil control y evaluación.

Ya en dichas fechas podía estimarse que los trabajos pendientes de desarrollo en ingeniería de detalle y cálculos complementarios precisaría de un mínimo de 12/15 meses, lógicamente simultáneos con las tareas de ejecución y, asimismo, de los desarrollos de los Proyectos de Detalle de Arquitectura, Fachadas e Instalaciones, que debían desarrollarse con los mismos plazos.

El propio informe de IDEAM S.A. incidía explícitamente en este aspecto, llamando la atención sobre la circunstancia, fundamental en este caso, de que la ingeniería de desarrollo del Proyecto de Detalle debía incorporarse como un tajo más de la obra, con el fin de hacerlo compatible con el resto de las tareas de definición y despiece de chapas; elaboración de detalles y planos de taller; plazos de pedido y suministro del acero; procesos de elaboración, transporte, montaje y ensamblaje en taller y obra; proyecto de lanzamiento sobre el río, etc., dentro de la Programación integral de la obra donde la ingeniería podría

convertirse en el tajo y camino crítico de los plazos, calidad y seguridad de la misma.

El desarrollo del Proyecto de Detalle simultáneamente a la ejecución de la obra

Los trabajos de esta fase final, de enorme complejidad y envergadura, exigían una metodología clara y bien estructurada que orientara las aportaciones de las diferentes partes implicadas evitando cualquier disfunción e interferencia que pudiera hacer peligrar la viabilidad de la actuación.

Desde el mismo momento de la adjudicación de las obras a la Propuesta Variante ofertada por la UTE DRAGADOS-URSSA, a finales de julio 2006, se establecieron las bases que debían orientar y priorizar las numerosas, y en muchos casos contrapuestas, tareas pendientes. En este sentido, IDEAM S.A. como Asesores de ExpoAgua Zaragoza 2008, participó activamente, en continuo contacto con la Dirección de Obra y los responsables técnicos de la Propiedad, en el establecimiento de dichas bases. Sólo con carácter ilustrativo resumimos seguidamente las principales decisiones adoptadas desde el mismo inicio de la fase final de los trabajos:

- en caso de tener que adoptarse decisiones, en base a criterios o intereses contrapuestos, se daría siempre prioridad a aquellas medidas que permitieran garantizar el cumplimiento de los estrictos plazos de ejecución disponibles, manteniendo siempre los estándares de calidad y seguridad establecidos por las modernas reglamentaciones en el ámbito de la construcción metálica;
- se debían fijar desde el inicio los condicionantes y servidumbres de carácter geométrico o formal derivados de los proyectos de arquitectura, fachadas e instalaciones, a los cuales debía amoldarse, siempre que no pusieran en riesgo la seguridad o el cumplimiento de los plazos, el diseño y dimensionamiento de los elementos estructurales. Se trataba de evitar, en lo posible, los problemas de "feed-back" entre los distintos proyectos involucrados, lo que podría ser fuente de retrasos y problemas de coordinación entre los mismos;
- en el complejo y estricto marco en que debían desarrollarse los trabajos, IDEAM S.A. no podía plantear un procedimiento de control y supervisión convencional, que no hubiera resultado compatible con el

calendario disponible. Así pues, se consensuó de acuerdo con todas las partes implicadas un mecanismo dinámico y flexible de actuación que hiciese viable un ritmo muy intenso en el avance de la definición, dimensionamiento y ejecución de las obras con las garantías exigibles de seguridad y calidad de las mismas. Ello obligaba inexorablemente a la máxima cooperación entre las diferentes ingenierías implicadas, que permitiera explotar la sinergia de la experiencia y especialización de todas ellas:

- Ideam como Asesoría externa especializada de ExpoAgua Zaragoza 2008.
 - Arup como Dirección de las Obras.
 - Servicios Técnicos de Dragados por parte de la UTE.
 - Fhecor Consultores como ingeniería proyectista de la Propuesta Variante adjudicada.
 - Urssa como ingeniería de desarrollo de detalles y planos de taller.
 - Lastra como empresa especializada en el proceso de lanzamiento del pod 4 sobre el río Ebro.
- IDEAM S.A. establecería, desde el inicio, las Bases de Cálculo que deberían seguirse en el proyecto, diseño y dimensionamiento de la estructura metálica, así como el listado completo de los análisis y verificaciones, de acuerdo con los estándares nacionales e internacionales, para garantizar los niveles de calidad de ejecución y seguridad estructural exigibles. Ahora bien, dada la complejidad y envergadura de los análisis necesarios para garantizar dichas condiciones, no resultaba viable proceder en los plazos disponibles a una completa verificación del dimensionamiento mediante múltiples y sofisticados análisis tridimensionales "precisos" del conjunto de numerosas comprobaciones a satisfacer. La necesidad inevitable de proceder a un rápido dimensionamiento de la totalidad de la estructura, que permitiera proceder a un pedido y suministro de la chapas y perfiles metálicos compatible con dichos plazos, obligó a abordar el mismo con modelos simplificados, conservadores, que permitirían una rápida definición de la estructura metálica, condición previa para el inicio del desarrollo de la ingeniería de planos de taller que, a su vez, era también condición previa para el inicio del pedido de suministro de chapas a las siderúrgicas...
 - IDEAM y FHECOR consensuaron, en base a su experiencia, los modelos simplificados "ingenieriles" que

debían permitir el citado dimensionamiento de la estructura metálica, con suficientes garantías para que los posteriores controles definitivos con complejos programas tridimensionales que reflejaran con la mayor precisión -lo que obligaría finalmente a utilizar modelos con alrededor de 57.000 elementos- la compleja respuesta espacial de la estructura completa y sus múltiples fases de lanzamiento, permitieran verificar la exigible seguridad estructural frente a los múltiples fenómenos que no era posible "captar" con los modelos simplificados. A su vez, IDEAM elaboró unos modelos simplificados alternativos a los de FHECOR con los que realizaba simultáneamente cálculos paralelos de contraste que permitieron ir confirmando, día a día, la bondad de las hipótesis simplificadoras asumidas y la ausencia de errores en los dimensionamientos ya realizados, lo que permitía proceder al inicio del desarrollo de los planos de taller de cada elemento. Los cálculos finales definitivos con modelos especiales tridimensionales confirmaron muy satisfactoriamente todos los controles de seguridad efectuados, no habiendo sido necesario proceder a actuaciones complementarias o de refuerzo significativas, lo que permite confirmar lo adecuado del proceso de trabajo planteado, único viable por otra parte en las condiciones de calendario existentes;

- en el estricto plazo disponible para la redacción del Proyecto de Licitación no había sido posible ni siquiera identificar el listado total de detalles a desarrollar. Por tanto, fue necesario abordar desde el inicio toda la ingeniería de detalle y dimensionamiento de la celosía superior, así como de los encuentros con los arcos y patas y los propios detalles de estos últimos. Se trataba, sin duda, del camino crítico de la obra, tanto por la ingeniería de proyecto que implicaba, como por la subsiguiente ingeniería de taller y, finalmente, la laboriosidad y complejidad de su despiece, ensamblaje en obra, soldaduras y control de las mismas, puesto que en esta estructura todos los nudos y encuentros constituían elementos críticos para la seguridad, ya que un fallo en cualquiera de ellos arrastraría importantes daños en una amplia zona adyacente;
- así pues, y con el lógico acuerdo entre todas las partes implicadas, se decidió que el diseño y dimensionamiento de la ingeniería de taller de los nudos y encuentros debía enfocarse buscando:



Detalle del diagrid y costillas.

- a) la máxima homogeneidad en la geometría de detalles (dimensiones y espesores de chapas) que permitiera minimizar el número de diseños o esquemas diferentes;
- b) una holgura suficiente en los márgenes de seguridad para garantizar en lo posible su posterior validación con los modelos espaciales "precisos";
- c) unos diseños con un concepto estructural claro y sencillo que minimizaran cualquier riesgo de afección a su seguridad por desvíos o errores en las tolerancias geométricas de ejecución de las obras;
- d) unos diseños sencillos de ejecución que, respetando los estrictos condicionantes formales y arquitectónicos, permitieran absorber las inevitables tolerancias de ajuste geométrico en obra, así como facilitar unos altos rendimientos en las operaciones de soldeo, garantizando la seguridad de su ejecución sin requerir una ingente, e inabordable, campaña de Controles de Calidad de miles de encuentros y cordones de soldadura.

La magnitud de la ingeniería desarrollada, con cerca de 200 planos de proyecto, 750 planos de taller y 12.000 planos de despiece, junto con los muy satisfactorios rendimientos obtenidos en las complejas operaciones de ejecución en obra y taller, la calidad de los

Proceso de
lanzamiento del
Pod 4.





Montaje de la piel de fachada.

resultados de los controles de calidad de ejecución y de la apariencia final de la obra acabada, con una prácticamente nula presencia de incidentes relevantes en su ejecución fueron, una vez más, la mejor muestra del acierto de los criterios de proyecto, diseño y dimensionamiento planteados;

- el proceso constructivo mediante lanzamiento sobre el río Ebro del pod 4, ayudado por unos cables de cuelgue desde la margen opuesta, era una clara mejora de la Propuesta Variante respecto del Proyecto de Licitación, ya que eliminaba cualquier afección al cauce durante el montaje de dicho tramo. La solución planteada en la oferta resolvía adecuadamente el problema y estaba correctamente justificada en sus magnitudes básicas. No obstante, la definición final de la misma y, por consiguiente, su afección y necesidades de refuerzo sobre la estructura definitiva no podían llegar a definirse en fase de licitación ya que obligaban inexorablemente al desarrollo de un complejo Proyecto de Lanzamiento, con cerca de 50 subfases a analizar y comprobar en sus niveles de seguri-

dad, cuya duración ha llevado finalmente no menos de 9 meses con una elevadísima dedicación de ingeniería de proyecto y sistemas altamente especializada.

El desarrollo de dicho proyecto sólo pudo abordarse de una forma suficientemente precisa, que permitió establecer las necesidades y cuantías de refuerzo en la estructura, una vez que estuvieron definidas completamente:

- a) las servidumbres de ocupación precisa en obra, que podían condicionar el número y alcance de las fases de ripado transversal, lanzamiento y posibles ubicaciones de los puntos de apoyo en la estructura, lo que forzosa-mente influía en las necesidades y diseño de los refuerzos;
- b) el calendario disponible para la operación de lanzamiento, lógicamente muy afectada por la programación final de las obras, que condicionaba a su vez sensiblemente el número de fases de lanzamiento e incluso el tipo y capacidad de los sistemas de apoyo, tiro y retenida;

- c) el Proyecto de Detalle de los sistemas de lanzamiento de LASTRA que en muchos casos se encontraban en situaciones límite de capacidad, con los lógicos márgenes de seguridad disponibles, en una operación de montaje de una magnitud y complejidad –en geometría, dimensiones y pesos– sin ningún antecedente comparable en el ámbito internacional de la ingeniería civil;
- d) finalmente, sólo una vez redefinida y rediseñada la celosía superior, fue posible el análisis de las fases de montaje que permitió establecer el alcance y magnitud de los refuerzos necesarios a dimensionar. En este caso, y a diferencia del proceso seguido para la estructura final, lo delicado y complejo del proceso de lanzamiento del pod 4, con decenas de fases de respuesta estructural diferente afectando a distintas zonas de la estructura, aconsejó a IDEAM Y FHECOR plantear los controles de seguridad sobre un modelo “preciso” espacial tridimensional, cuya elaboración llevó no menos de 6 meses, como única garantía de seguridad en un proceso de tal magnitud y complejidad.

Adicionalmente, y de acuerdo con las premisas ya descritas, todas las partes implicadas acordaron que el Proyecto de Lanzamiento, y las necesidades de refuerzo que de él se derivasen, debía siempre priorizar:

- a) la seguridad de las operaciones, con márgenes holgados de capacidad de respuesta frente a las incertidumbres o incidencias de obra;
- b) la seguridad de los elementos auxiliares de cuelgue, lanzamiento y retenida, muchos de ellos en el límite con los márgenes de seguridad disponibles, frente a las necesidades de refuerzo de la estructura;
- c) la versatilidad del proceso y fases de lanzamiento para hacer frente a incidencias o desvíos de las condiciones inicialmente previstas.

Cualquier fallo o problema durante el proceso de empuje podría tener consecuencias imprevisibles no

sólo desde el punto de vista irrenunciable de la seguridad sino, también, sobre la propia viabilidad del calendario de ejecución de la obra, lo que explicaba y justificaba ampliamente las prioridades adoptadas.

Conclusión

El 21 de diciembre de 2007, justo antes de Navidad, se concluyó con éxito el lanzamiento sobre el río Ebro del “pod” 4 del Pabellón Puente. Quedaban, lógicamente, muchas tareas pendientes antes de la terminación completa de la obra que, como no podía ser de otra forma, tuvo lugar la misma víspera de la inauguración de EXPOZARAGOZA 2008... No obstante, el éxito del cruce sobre el río Ebro, sin el menor incidente reseñable, supuso el cumplimiento de un hito fundamental en el calendario previsto para la obra. A partir de entonces, y a pesar de la envergadura de los trabajos pendientes, en el ánimo de todos se despejaron las dudas sobre las obras del Pabellón Puente, la más emblemática y compleja de la Expo, la que exigió el mayor movimiento realizado hasta la fecha de una estructura tan pesada y de geometría tan irregular, la que seguramente ha batido múltiples récords en el ámbito de la construcción metálica (número de planos de taller, número de planos de despiece de detalles, número de horas de ingeniería, etc.), y la primera que, paradójicamente, abandonó el dudoso privilegio de figurar entre las máximas preocupaciones de los responsables de ExpoAgua Zaragoza 2008 en los meses previos a la inauguración.

La obra acabada, con su impresionante arquitectura y la deslumbrante piel de escamas de su fachada, oculta en su interior una ingente y excelente obra de ingeniería de la construcción metálica y de las técnicas de lanzamiento, fruto de la experiencia, dedicación y trabajo en equipo de un excelente y numeroso grupo de profesionales con el que ha sido un placer poder colaborar y de cuyo buen hacer quisiera dejar testimonio este artículo en el monográfico dedicado a EXPOZARAGOZA de la *Revista de Obras Públicas*. ♦

Referencias:

- (1) Aguiló, M. “Puentes para una exposición. Zaragoza 2008” Abada Editores. 2008.
- (2) Zueco, M.; Corres, H.; Ortega, A. “El Pabellón Puente. Reto Tecnológico”, Revista de Cauce 2000. Número 141. Año 2008.