

# Construcción de dos puentes singulares sobre el río Ebro para el acceso a la Exposición Internacional Zaragoza 2008: Puente del Tercer Milenio y Pabellón puente

GABRIEL MENÉNDEZ-PIDAL SENDRAIL (\*), SUSANA LÓPEZ MANZANO (\*),  
DOMINGO GARCÍA SAGRADO (\*) y VICENTE PÉREZ PÉREZ (\*)

**RESUMEN** Este documento detalla el proceso constructivo de ejecución de dos estructuras especialmente singulares que forman parte de las obras de la Expo de Zaragoza del 2008. El puente del Tercer Milenio es record mundial en arco atirantado de gran tablero inferior en hormigón blanco autocompactante de alta resistencia (75MPa en arco) para tráfico rodado, carril bici y peatones. El Pabellón Puente es una estructura curvilínea compleja arquitectónicamente influenciada en su diseño, con doble función: paso peatonal y recinto expositivo. Ambas estructuras comparten cimentaciones singulares y un complejo proyecto de construcción

## CONSTRUCTION OF TWO SINGULAR BRIDGES OVER THE RIVER EBRO TO GIVE ACCESS TO THE INTERNATIONAL EXHIBITION ZARAGOZA 2008: TERCER MILENIO BRIDGE AND PAVILION BRIDGE

**ABSTRACT** *This document describes the construction method of two amazing Structures especially singulars built as part of the International Exhibition Zaragoza 2008. The Tercer Milenio Bridge is world record in bowstring arch with a wide lower deck made on high-strength, self-compacting white concrete (75MPa) to carry road traffic, bicycles and pedestrians. The Pavilion Bridge is a curvaceous complex structure architecturally influenced in its design as combined building for exhibitions and footbridge. Both bridges share singular foundations and a complex construction project.*

**Palabras clave:** Estructuras singulares, Lanzamiento, Apertura en clave 120000kN, Innovación.

### 1, INTRODUCCIÓN

El Puente del Tercer Milenio se encuentra situado en el meandro de Ranillas, conectando el barrio de La Almozara y la cercana estación de Delicias con el recinto de la Expo; y por tanto, aguas arriba de la ciudad de Zaragoza. Por sus características singulares, supone un hito para la ingeniería española tanto por su proyecto como por el procedimiento constructivo.

El Puente del Tercer Milenio es una obra de repercusión mundial ya que no existe ninguna estructura de tipo arco atirantado de tablero inferior, ejecutada en hormigón y con sus dimensiones. La muy elevada cuantía de armaduras activas y pasivas, la utilización de hormigón blanco autocompactante de alta resistencia, las singularidades del proceso de fabricación y empuje del tablero, el cimbrado y encofrado del arco y pies inclinados y por último la puesta en carga de

péndolas mediante la apertura del arco por medio de gatos son, entre otros, aspectos singulares de la construcción de este puente.

El Pabellón Puente es un caso atípico de pasarela-pabellón con geometría altamente compleja. No sólo constituye una de las entradas peatonales a la Expo sino que es asimismo uno de los pabellones temáticos de la muestra. La enorme complejidad de formas y entronques de la estructura ha requerido para su diseño y construcción medios inusuales en la obra civil, así como también la interacción de la estructura con los servicios y requisitos arquitectónicos. El proceso de lanzamiento de unos 140 metros de estructura que, contruidos en tierra, se trasladaron a su posición definitiva salvando, sin apoyos intermedios, el cauce del río supuso un desafío sin precedentes

En ambas estructuras la ejecución de los pilotes de cimentación, de gran diámetro y profundidad, fue asimismo muy singular dadas las características del terreno y la magnitud de las cargas transmitidas.

(\*) Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos (DRAGADOS, S.A.)



FIGURA 1. Foto aérea de las dos estructuras (pabellón puente: aguas abajo; puente del tercer milenio: aguas arriba).

## 2. PUENTE DEL TERCER MILENIO

### 2.1. BREVE DESCRIPCIÓN FORMAL

El Puente del Tercer Milenio tiene una longitud de 270 metros entre ejes de apoyos extremos, de los que 54 metros corresponden a sendos vanos laterales (27+27) y 216 metros al vano principal sobre el río. Este vano principal está formado por un gran arco central y los pies inclinados que ligan sus arranques al tablero en sus extremos. El puente es recto en planta con alzado de traza circular de 5000 metros de radio.

- Arco y pies inclinados

El arco central, de directriz parabólica de segundo grado, cubre los 144 metros centrales del vano principal mientras los pies inclinados ocupan los 36 metros extremos. La sección tipo del arco, maciza, con forma de diamante, es constante en toda su longitud, con una anchura de 5,40 metros y canto variable, entre 1,20 metros en caras laterales y 1,80 metros en el eje

Los 4 pies inclinados tienen sección rectangular maciza de ancho y canto linealmente variables entre 6,00 x 1,08 metros en su extremo inferior, arranque sobre el tablero, y 3,60 x 1,80 metros en su extremo superior, nudo de unión con el arco central. Ambos pies de cada lado se encuentran unidos, a media altura, por una riostra horizontal de sección rectangular maciza. La distancia entre ejes de pies es 48,00 metros.

La transición de secciones entre arco y pies inclinados, realizada por medio de superficies regladas, se materializa en los 15,00 metros iniciales del arco, en los que la sección es muy variable, dando origen a formas muy complejas.

Tanto el arco como los pies inclinados se realizan con hormigón blanco de 75 MPa de resistencia característica.

- Péndolas

Situadas en planos verticales cada 6,00 metros unen el arco o pie inclinado al tablero, en los extremos de su sección transversal. Hay 32 planos de péndolas de los que los 16 centrales anclan en el arco y el resto en los pies inclinados.

Las péndolas son de cable cerrado de 100 milímetros de diámetro, con 3 capas de alambres con sección en Z galvanizados en caliente. Los terminales de estos cables son de tipo mazarota, siendo pasivos los superiores, con forma de horquilla para su enhebrado y embulonado a través de los palastros dejados al efecto en el arco. Los terminales inferiores, activos, son roscados tesándose desde el paramento inferior del tablero.

- Tablero

Funcionalmente, el tablero dispone de mediana, 6 carriles de circulación y dos pistas para ciclistas, con un ancho total de unos 31 metros; a lo que hay que añadir sendos paseos peatonales exteriores, protegidos, en el vano principal, contra viento y lluvia mediante una cubierta

acristalada de perfil curvo. El ancho total resultante es de unos 43 metros.

En el arranque de los pies inclinados dicho paseo peatonal se ensancha, abrazándolo, de forma que puntualmente el tablero llega a alcanzar una anchura de 68 metros.

La sección transversal del tablero, sin aceras, se estructura en 2 nervios de borde extremos de sección exterior constante, unidos cada 6 metros por diafragmas de canto variable, sobre los que se dispone de una losa de 24 centímetros de espesor. Los cantos varían entre 2,02 metros, en bordes exteriores, y 3,20 metros en el eje del tablero. La anchura del tablero es de 31,18 metros entre aristas superiores y 33,52 metros entre aristas inferiores, formando el paramento inferior un arco circular de radio 139,90 metros.

En la zona de arranque de pies inclinados el tablero se amplía lateralmente con una losa maciza, laja de amarre, de 0,80 metros de espesor que, abrazando dicho arranque, se empotra a media altura en el cercano nervio de borde.

Los nervios de borde son celulares con almas exteriores inclinadas. Cuando la mencionada losa maciza intersecta con los nervios, los atraviesa, salvo en 9 metros a ambos lados de eje de pilas, en que los nervios se transforman en macizos.

El tablero es completamente de hormigón blanco de 60 MPa de resistencia característica.

- Pilas, estribos y cimentación

En cada una de las 2 pilas el tablero descansa sobre 4 apoyos, por medio de aparatos tipo pot: 2 separados 48 metros, situados bajo la base de los pies inclinados, a través de capiteles troncocónicos octogonales, y 2 separados 22,50 metros, situados bajo ejes de almas interiores de los nervios de borde. Cada fuste de pila, recogiendo 2 apoyos y con forma hidrodinámica, se apoya sobre un encepado de 26,35x10,30x2,00 metros. Su cimentación es profunda con 10 pilotes de 2 metros de diámetro y unos 45 metros de profundidad por encepado.

En cada estribo el tablero apoya sobre 2 aparatos de neopreno zunchado situados bajo los nervios de borde, teniendo su cimentación 20 pilotes de 1,50 metros de diámetro.

Mención aparte merecen tanto los pilotes de 2,00 metros de diámetro, hasta un total de 22, que constituyen la cimentación de las pilas provisionales situadas en el río, como los 24 pilotes de 1,20 metros de diámetro de la cimentación del parque de fabricación de dovelas del tablero. Todo ello se describirá con más detalle al describir el proceso constructivo.

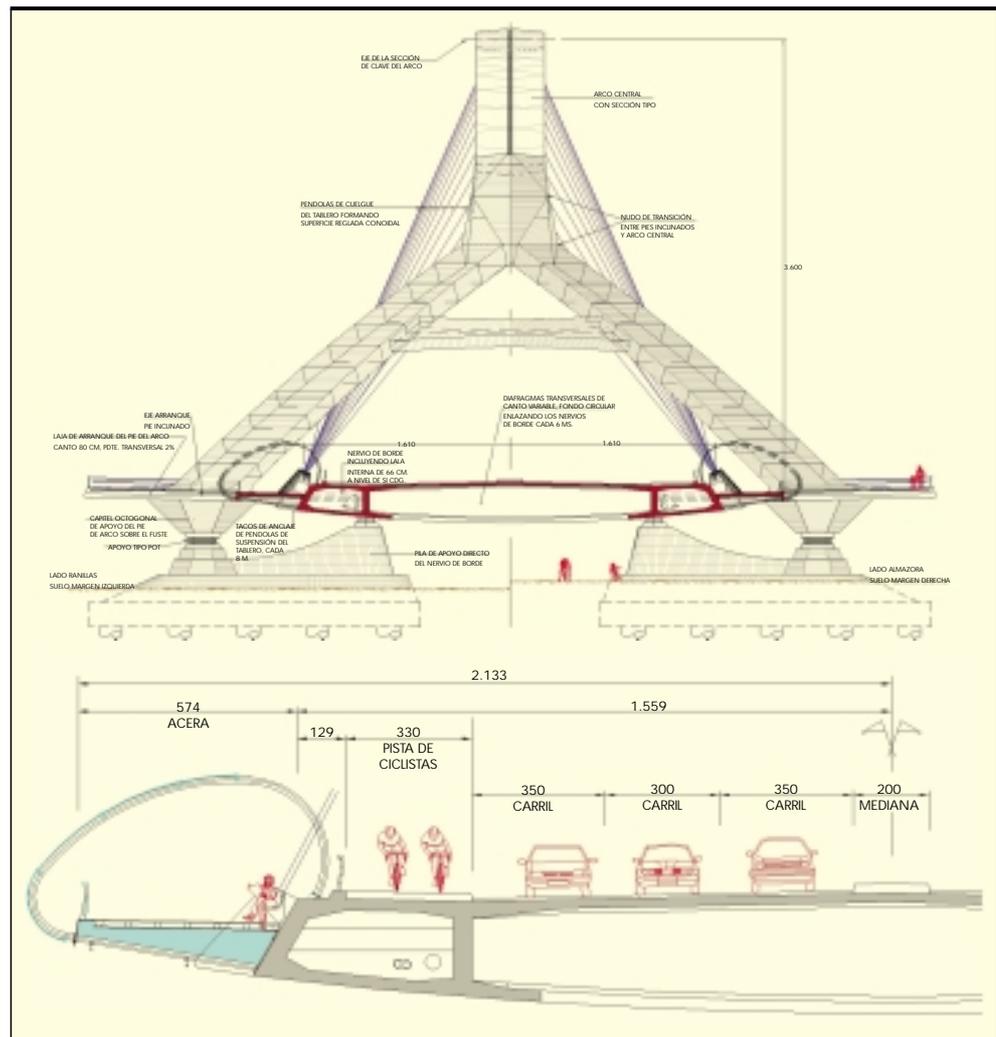


FIGURA 2. Arriba: Sección transversal. Abajo: Semisección tipo

## 2.2. PROCESO CONSTRUCTIVO

A muy grandes rasgos, las fases del proceso constructivo son:

1. Construcción de pilas y estribos.
2. Construcción del tablero mediante empuje desde estribo 2.
3. Construcción de arco y pies inclinados.
4. Colocación y puesta en carga de péndolas.
5. Acabados.

Dadas las características de la obra, la mayor parte de las actividades de este proceso tienen sus singularidades. Se destacan entre ellas: **La ejecución de pilotes, parque de dovelas, hormigones, sistema de empuje, cimbra y encofrado del arco, puesta en carga de péndolas.**

### 2.2.1. Ejecución de pilotes. Construcción de pilas y estribos

La ejecución de las cimentaciones tanto del Puente del Tercer Milenio como del Pabellón Puente fueron objeto de otro artículo publicado en esta revista, en el número 147/2007, titulado "Cimentación con pilotes de gran diámetro y gran longitud en los puentes del Tercer Milenio y del Pabellón Puente de la Expo'08 de Zaragoza. Ensayo de carga estática de 4000t sobre un pilote mediante la célula Osterberg" (páginas 5-25).

En cuanto a la construcción de los alzados de pilas y estribos, el estribo 2 sufrió una pequeña modificación en las fases de ejecución debido al procedimiento de empuje de tablero. En su parte frontal tuvo que realizarse unos retranqueos para anclar la estructura metálica de soporte de los gatos de empuje. Igualmente en la parte dorsal, se modificaron los muros (para el guiado lateral y empuje) y se añadieron dos pilas provisionales similares al resto con pots de deslizamiento.

Igualmente la pila 2 se realizó sólo hasta el pedestal, ejecutándose una pila provisional con sus pots provisionales de empuje.

La ejecución final de alzados de pilas y estribos se fue adaptando en cada etapa de avance de la obra.

### 2.2.2. Construcción del tablero mediante empuje desde estribo 2 **Parque de dovelas**

El tablero consta de 12 dovelas de 24 m de longitud cada una, salvo las dos extremas, la primera de 24,875 metros y la última de 5,125 metros, ambas medidas a ejes de apoyo en estribos. La ejecución de estas dovelas se ha realizado en una instalación fija, "parque de dovelas", situada tras el estribo 2, lado Almozara.

El ciclo de una dovela consistía en:

- Colocación de diafragmas y prelosas (zona central).
- Abatimiento de encofrado de fondo y zona de paso de grúa pórtico hasta cota.
- Colocación de tapes y módulos de ferralla de tacos (incluidos tubos para péndolas) y de nervios de borde previamente prefabricados en bancadas de hormigón aledañas al encofrado de fondo.
- Colocación armadura de conexión entre módulos prefabricados y elementos de pretensado interior inferior y exterior.
- Enfilado vainas y colocación de encofrados de celdas de nervios de borde (incluidos los negativos de pasos de hombre e instalaciones).
- Hormigón en primera fase: Losa inferior y tabiques.
- Desencofrado primera fase y colocación encofrado de losa superior.
- Ferrallado de losa superior y colocación de vainas, desviadores y elementos de pretensado interior longitudinal superior.

- Enfilado de vainas de pretensado superior y colocación de elementos para instalaciones.
- Hormigón en segunda fase: Losa superior.
- Tesado transversal de diafragmas y tesado pretensado interior longitudinal de empuje.
- Instalación de elementos de empuje (lanzas de tiro).
- Desapeo de diafragmas y encofrado de fondo.
- Empuje de dovela.

Para permitir los máximos rendimientos en el ciclo de ejecución de cada dovela, los **diafragmas y las prelosas** del tablero (**zona central de la sección**) se hormigonaban independientemente del resto de la sección. Para ello se fabricaron (en la parte trasera del parque, centrados con el eje de la estructura) 2 moldes metálicos, con 4 fondos previamente anclados y nivelados, para la ejecución de los 4 diafragmas las 8 prelosas nervadas, de 5,32 x 8,40 m. y espesor mínimo 7 cm., correspondientes a cada dovela. El desplazamiento de estos elementos a su posición final en el encofrado de la dovela se realiza por medio de pórtico grúa de 24,94 metros de luz y 50 t de capacidad. El manejo de las prelosas ha sido muy cuidadoso, dadas sus dimensiones, utilizando para ello un balancín con un sistema de fijación de la prelosa que garantiza el reparto equitativo de su peso entre 10 puntos de cuelgue.

El hormigonado de la sección se realizaba en **tres fases**: en las dos primeras se hormigonaba la losa inferior y almas de cada uno de los nervios de borde y una última que comprendía la losa superior de la sección completa del tablero.

El encofrado propiamente dicho del parque estaba formado por 2 encofrados independientes, uno para cada nervio de borde. Cada uno de ellos constaba de un **fondo** que reproducía la curvatura del fondo del tablero. Las vigas y forro de madera apoyaban sobre una estructura metálica sobre soportes birrotulados que, por medio de sistemas hidráulicos, permitía mover verticalmente el conjunto, de un modo guiado, para las operaciones de encofrado y desencofrado de forma rápida y automática. También contaba con un paño abatible de eje horizontal, en toda su longitud, que permitía disponer un hueco longitudinal necesario con una triple función:

- Permitir el paso de los soportes del pórtico grúa para la colocación de diafragmas y prelosas, operación primera del ciclo de fabricación de las dovelas. Una vez colocados estos elementos se cerraba dicho paño para iniciar la colocación de ferralla.



FIGURA 3. Parque prefabricados (fondo). Colocación de diafragmas.



FIGURA 4. Parque de empuje. nervio de borde in situ.

- También permitía el acceso de los operarios a las pilas provisionales situadas en el parque para la colocación de almohadillas durante el empuje.
- Finalmente permitía el paso de los puntales de tiro traseros, durante el empuje del tablero.

Los **encofrados laterales** de celdas se realizaron metálicos. Constaban de diferentes paños que reproducían fielmente la geometría y curvaturas de las celdas. Estos paños se montaban y desmontaban gracias a un pórtico que era

izado por las 2 grúas torre móviles (una a cada lado) del parque de dovelas.

El resto de encofrados se realizaron en madera y fenólico de forma artesanal en el taller de carpintería situado cerca de la pila 2.

La **ferralla** se prefabricó lo máximo posible, que resultó ser sólo una pequeña parte, habida cuenta de su complejidad y cuantía. En particular se hizo la armadura de tacos y la sección tipo en U. Se establecieron, junto a ambos nervios,



FIGURA 5. Armado nervio borde dovela: Superior izquierda: Colocación módulos prefabricados ferralla. Superior derecha: Unión módulos prefabricados. Inferior izquierda: Ferrallado nervio borde antes de hormigonado. Inferior derecha: Desencofrado nervio de borde antes de losa superior.



FIGURA 6. Panorámica parque de empuje.

áreas para dicha prefabricación que reproduzcan la curvatura y geometría de la sección.

Las **grúas torre móviles** cubrían toda la planta de la dovela así como las áreas de prefabricación de ferralla y de acopio de encofrados.

#### **Sistema de empuje**

Los factores determinantes para su diseño fueron:

- El peso total a empujar, unas 20000 t, y el peso máximo de dovela, unas 2000 t.
- Las pilas provisionales en el cauce: 8 x 2, de forma que la separación uniforme entre ellas era 24 metros.
- El deslizamiento del tablero debía producirse a lo largo de las almas verticales, interiores, de los nervios de borde.
- Dada la curvatura del paramento inferior, la pendiente transversal del tablero a lo largo de las líneas de deslizamiento era de un 8%. Asimismo la pendiente longitudinal era variable, horizontal en centro de tablero y un valor máximo de 3,7% en parque de dovelas.
- La distancia, 5,51 metros, entre el eje de deslizamiento y la arista exterior del nervio de borde, que imposibilitaba un guiado convencional.



FIGURA 7. Vista dorsal empuje dovela.

Un sistema de deslizamiento de dovelas en parque a través de chapas deslizantes con la dovela sobre carriles no era admisible dada la elevada carga a transmitir a los carriles, sin olvidar los elevados rozamientos en parque que produce. Para evitar estos problemas se dispuso de 4 apoyos adicionales, 2 por línea de deslizamiento, con sus almohadillas, dentro del parque de forma que la dovela se hormigonaba directamente sobre las almohadillas. Posteriormente el movimiento del paño abatible del encofrado de fondo anteriormente descrito permitía el acceso de personal a dichos apoyos para las maniobras de empuje.

Para el empuje del tablero se decidió un sistema de tiro directo con barras de alta resistencia, sistema del que se disponía amplia experiencia, aunque con magnitudes menores. Cada línea de deslizamiento coincidía con el eje de las almas verticales de los nervios de borde. Se establecieron 2 ejes de tiro a 0,80 metros de cada línea de deslizamiento, separación acorde con la distribución de armadura, en cada uno de los cuales se disponía de una capacidad de 300 t de tiro, por medio de 2 gatos hidráulicos. Se había estimado, con coeficientes de rozamiento teflón - inoxidable de 0,05, un tiro máximo necesario del entorno de 1000 t. La realidad es que dichos rozamientos resultaron bastante más bajos, incluso en arranque (en estático), en el momento de puesta en movimiento del tablero.

Los gatos de empuje iban situados sobre 4 estructuras metálicas ancladas al estribo, sobre un paramento vertical (provisionalmente se realizó un retranqueo en el alzado del estribo). El anclaje de las barras al tablero, situadas a corta distancia bajo la tabla (losa) inferior se realizaba por medio de soportes metálicos muy robustos que, reaccionando horizontalmente contra las tablas superior e inferior, equilibraban la fuerza de tiro con su excentricidad. La situación de estos soportes variaba según se encontraran por el lado interior o exterior de las líneas de deslizamiento.

Los apoyos de empuje en pilas, estribos y pilas provisionales, fueron tipo pot fijo con bandejas superiores en cuña tanto longitudinal como transversal, definiéndose su superficie en función de la carga máxima prevista, con una longitud mínima derivada del proceso de llegada a pila del pescante, la aplicación del gato de recuperación de flecha y el recorrido necesario de éste para tener el espacio necesario para la inicial colocación de almohadillas. Es decir, el tablero se empujó sobre apoyos que por su misma disposición dificultaba el movimiento transversal del tablero durante el empuje.



FIGURA 8. Vista frontal empuje dovela con nariz lanzamiento.

El guiado transversal durante el empuje se realizó por el interior del nervio de borde, a lo largo del canto de la tabla inferior, dada la gran distancia existente entre apoyos y borde exterior de tablero. Este guiado se interrumpía al llegar a los diafragmas, por lo que se dispuso una estructura metálica embulonada a la pila que permitía su abatimiento.

Por último el pescante lo formaban 2 cuchillos metálicos de viga armada situados en líneas de deslizamiento y orientados según la normal al plano de apoyo. Su canto era el del tablero en ese punto y su longitud de 11,10 metros. Iba cosido al frente de la primera dovela mediante un sistema complejo de barras pretensadas encajadas en la cuajada cuantía de armaduras.

### 2.2.3. Cimbra y encofrado de pies inclinados y arco

Una vez empujado el tablero, se procedió a la sustitución de apoyos provisionales por apoyos definitivos en la sección de pilas definitivas y colocación de apoyos de neopreno zunchado en zona de estribos. Para la sustitución de apoyos en pilas se habían ejecutado 2 pilas de hormigón armado rectangulares a cada lado de la sección del pot definitivo a sustituir. Sobre dichas pilas se colocaron varios gatos hidráulicos previamente nivelados y de forma simétrica. Se actuó casi simultáneamente en zona de estribos y en pilas definiti-



FIGURA 9. Pilas definitivas, laja y arranque arco.

vas controlando la carga y levantamientos en escalones hasta liberación de almohadilla de empuje. Una vez retirado el pot antiguo se sustituyó por el pot definitivo y se descargaron los gatos de las pilas rectangulares y del estribo siguiendo el proceso inverso.

Simultáneamente se trabajó en el cimbrado de las lajas de amarre y en el ferrallado de la misma que tenía la singularidad de la conexión de armadura pasiva y activa con las dovelas correspondientes del tablero ya empujado y de la intersección del capitel y arranque del pie del arco.

La concepción de la cimbra del arco se basa en una estructura soporte a base de perfiles pesados de alta capacidad portante sobre los que se dispone cimbra tupida. Sobre esta última se colocan correas y forro que conforman el encofrado de fondo de pies y arco. Esta estructura soporte, parcialmente en la zona de pies, se diseña para permitir el acceso de vehículos desde cualquier estribo a cualquiera de las 2 calzadas.

Se han considerado en diseño múltiples hipótesis de trabajo conjugando las sucesivas fases de hormigonado con la aplicación más desfavorable de cargas de viento o excentricidad mínima de acuerdo con las recomendaciones vigentes. Las cargas horizontales longitudinales derivadas de las presiones de hormigón fresco son transmitidas al hormigón ya endurecido de las tongadas anteriores, mientras las transversales reajustan las cargas en los soportes, que se anclan al tablero.

El apoyo de la cimbra del arco sobre el tablero se realiza de forma que las cargas vayan directamente a los diafragmas. Este mismo criterio se sigue para la definición de los caminos de rodadura de las 2 grúas torre a instalar sobre el tablero para la ejecución del arco.

Las cargas a transmitir son muy elevadas dadas las secciones de pies y arco. En la zona central del arco, valor mínimo, el peso alcanza unas 20 t/m. La medición total de hormigón es de 2660 m<sup>3</sup>, siendo la altura del eje de la sección de clave del arco sobre el tablero es de 36,00 metros.

Especial mención tiene el diseño y el posterior montaje de la cimbra y encofrado en la zona del nudo o entronque de los dos pies del arco con la zona de arco central, fundamentalmente por sus superficies alabeadas, por el cambio de geometría, las inclinaciones y el reparto de cargas mayores entre la cimbra de la zona aperticada de los pies y la cimbra del arco propiamente dicha.

También es de reseñar el encofrado de arranque del arco en zona de laja. En un mismo nudo se concentraba capitel



FIGURA 10. Montaje cimbra arco. Cimbra patas arco.

de laja, laja propiamente dicha y arranque de arco, por lo que el encofrado de forro tipo fenólico reforzado y la ferralla tuvo que colocarse con precisiones más estrictas que en construcciones convencionales de hormigón para asegurar la buena alineación de las patas del arco. Esta pieza se hormigonó a la vez que la laja para evitar tener una junta horizontal en el arranque del pie.

Durante toda la obra se contó con el taller de carpintería que realizaba encofrados a medida para zonas concretas, como la zona interior de los arranques de los pies, forros de encofrados de arco, etc.

El desmontaje de la cimbra (después de la puesta en carga de péndolas) es más limitante que el montaje debido a la restricción del espacio por los planos de péndolas ya en carga y la continuidad de trabajos de remates de galerías y acabados del puente. El desmontaje se realiza comenzando por las patas del arco para continuar con las torres que se abatirán hacia el exterior sin poder abandonar la franja del eje central del puente debido a los planos de péndolas y de forma simétrica, transportando módulos de cimbra cuajada y módulos de torre para agilizar el tiempo de desmontaje.

Para colocar las péndolas se tuvo que abrir un "hueco" de unos 80cm de ancho en el encofrado de fondo, por lo que antes del montaje se estudió la modulación de ciertas correas y elementos del encofrado que se verían afectados por la colocación y enhebrado del anclaje superior tipo horquilla de cada péndola. Aún así, en obra se realizó alguna modificación con su cálculo justificativo correspondiente. Además, previamente antes del hormigonado, ya se había realizado un hueco en el fenólico para el paso de los elementos llamados "palastros" que servirían de conexión de la péndola y el arco, diferente para cada uno de los 64 planos de péndolas.

#### 2.2.4. Colocación y puesta en carga de péndolas:

Se colocaron inicialmente 52 péndolas de las 64 empleando unos balancines metálicos tipo C para el enhebrado de la horquilla superior, y unos caballetes de enfilamiento metálicos para el emboquillado con el tubo dejado en los tacos del tablero donde se alojaría el anclaje inferior. Mediante un puente de tesado y gatos de 60t se dio una carga mínima (de unas 20t) para hacer poco apreciable el efecto de la catenaria.

La carga del tablero que inicialmente estaba sobre pilas provisionales casi en su totalidad debía traspasarse a las



FIGURA 11. Armadura arco.



FIGURA 12. Vista general arco. Hormigonado.

péndolas, produciendo por tanto el desapeo del tablero. Para ello se consideró "la apertura de la clave del arco" (se dejó sin hormigonar un pequeño trozo en clave de 1,65 metros de longitud), por medio de gatos hidráulicos con 12000 t de capacidad total. Al aplicar la carga, con la apertura y levantamiento de los labios de la junta, se producía automáticamente la puesta en carga de las péndolas. Esta carga de 12000t es la máxima que se podía aplicar, incluso dejando perdidos los gatos, dada la geometría de la sección de clave, sin llegar a la óptima, unas 15000 t. Esta última hubiera implicado que todas las péndolas adquirieran su carga final y el práctico desapeo del tablero. El hecho de aplicar una carga menor implicaba que posteriormente, una vez cerrada la clave, se realicen ajustes finales en las tensiones en péndolas.



FIGURA 13. Colocación péndolas.

Esta operación sin precedentes se realizó en 19 escalones y requirió de los siguientes sistemas:

- Fabricación de equipos hidráulicos específicos.
- Adaptación labios de dovela de cierre en clave con elementos de refuerzo.
- Sistema de instrumentación de péndolas y secciones de arco.
- Sistema de control topográfico con los equipos más precisos hasta el momento.

- **Sistema hidráulico.** Se fabricaron 7 gatos (uno de reserva) de 2000t de capacidad de empuje (ensayados para 3000t), 825mm de diámetros exterior y 350mm de carrera. Para la maniobra se colocaron 6 cilindros de empuje centrados en los **chaponos de refuerzo** (más de 90mm de espesor) diseñados con cunas de apoyo para la fácil colocación de los mismos (**adaptación de dovela de cierre**). Estos chaponos se colocaron en las caras frontales de las dovelas de cierre de los semiarcos con los anclajes y refuerzos correspondientes. La maniobra se controló por movimientos de carrera de los 6 gatos agrupados en 3 parejas, de forma sincronizada. Esta sincronización se realizó a través de la central hidráulica de 700b conectada a un cuadro eléctrico que albergaba los elementos de potencia y el sistema de mando automatizado. Este equipo estaba compuesto principalmente por una bomba hidráulica que alimentaba cuatro circuitos individuales (3 estuvieron operativos durante la maniobra). Cada uno de estos circuitos individuales transfería el fluido a dos bloques de pilotaje. Estos bloques mediante una serie de válvulas permitían que los cilindros efectuasen los movimientos. Mediante sensores de posición se conocía en todo momento la carrera de los gatos. Mediante traductores de presión (0-1600b) se conocía la presión que aparecía en la pantalla táctil de la central. Antes de cada escalón de maniobra de apertura, se controlaba mediante introducción de parámetros, la sincronización entre cilindros y la sincronización entre parejas de cilindros, de tal manera que existían alarmas de aviso y alarmas de parada cuando se sobrepasaba algún nivel, por lo que se evitaba cualquier posible descompensación.

La central hidráulica se colocó en clave, próxima a los gatos, a 36m de altura desde tablero. Seis operarios (uno por cilindro) controlaron la sincronización del "apriete" de tuercas de seguridad.

- **Sistema de instrumentación.** Según comentado anteriormente, de las 64 péndolas que constaba el puente, se colocaron 52 (12 péndolas se colocarían después de la apertura) y se instrumentaron con bandas extensométricas creando puentes de Wheatstone completos. También se instrumentaron varias secciones del arco dejando las bandas embebidas en el hormigón para conocer la tensión tanto en pies, como en zonas medias del arco central, además de las dovelas de clave. También se colocaron en las caras frontales 2 clinómetros para conocer giros en plano vertical. Toda la información de la instrumentación se recogía en un ordenador central colocado en una caseta en el centro de tablero. Esta información se conocía a tiempo real. Asimismo se introdujeron parámetros de aviso y alarma, que se enviaban a la central hidráulica para mejor control de toda la maniobra.

- **Sistema de topografía.** A fin de garantizar el seguimiento permanente del comportamiento geométrico de las dos secciones de la clave durante todas las fases de la apertura, así como los nudos y sección intermedia de arco central se planteó la utilización de un sistema automático de medición que permita la obtención de las medidas necesarias en forma de coordenadas de todos los puntos de control establecidos para cada fase. Este sistema estuvo formado por cuatro estaciones totales de alta precisión, dotadas de herramientas de



FIGURA 14. Sistema hidráulico apertura clave. Foto superior: Chaponos de refuerzo en dovela de cierre. Foto central: gatos en posición. Foto inferior: Apretando tuercas de seguridad.



FIGURA 15. Instrumentación péndolas.

autorreconocimiento de los objetivos, mecanismos de autocontrol, mecanismos de auto-orientación y transmisión de los datos recogidos mediante telecomunicación con un ordenador central que procesó la información (junto con el ordenador de la instrumentación). Se colocaron puntos de reconocimiento con prismas en zona de clave, zona intermedia de arco central y zona de nudo de entronque de las patas del arco, de tal forma que cada estación leía 3 prismas más uno auxiliar de "autocorrección".

Con este sistema se pudo conocer movimientos (en eje longitudinal, transversal y en cota) además de combinaciones (apertura, desviaciones en diferentes ejes), así como giros en x, y giros en z casi a tiempo real.

Por otro lado se realizaron inspecciones visuales de posible aparición de fisuras en diferentes partes del tablero y arco, así como capiteles de pilas y apoyos pots. Además se apoyó con topografía mediante estaciones totales el posible asiento de pilas definitivas.

Esta maniobra se realizó en un día con rotundo éxito. Mediante la aplicación de 12000t se abrió lo esperado, unos 180mm, y en cota vertical se levantó unos 80mm.

Después de la apertura, se siguió manteniendo el sistema de instrumentación en péndolas para el seguimiento de los ajustes finales de tesados y desapeos de pilas provisionales.

Para el hormigonado de la dovela de cierre (1.65m de longitud), se dejaron los cilindros, pero se substituyó el aceite hidráulico por lechada de cemento.

Después de la maniobra de apertura se simultanearon las operaciones de enfilado de pretensado exterior con el tesado de ajuste de péndolas y con el consiguiente desapeo de pilas provisionales que estaban en el río. Además a medida que se fue retirando la cimbra de los pies del arco se pudieron instalar las 6 parejas de péndolas que se dejaron sin instalar antes de la apertura.

También se trabajaba encima del tablero en los tajos de colocación de barandillas, montaje del piso de madera en zona de galerías, la retirada de grúas torre sobre tablero, y diferentes remates antes de echar el aglomerado. Bajo tablero se trabajaba en tajos de demolición de pilas provisionales y acondicionamiento de cotas de terreno finales y en zona de accesos en conexión de instalaciones, remates de muros con la estructura colindante Puerta del Parque en el estribo 1, etc.



FIGURA 16. Galerías.



FIGURA 17. Galerías vista general.

### 2.2.5. Otras singularidades:

#### **El Hormigón en el Puente del Tercer Milenio**

Las cuantías medias de armaduras pasivas y activas en el tablero eran muy elevadas alcanzando valores de 345 y 85 kg/m<sup>3</sup> respectivamente. En la laja de amarre la cuantía media de armadura pasiva llega a ser de 390 kg/m<sup>3</sup>. Con estas magnitudes era evidente la dificultad existente para realizar una compactación adecuada del hormigón, máxime tratándose de un hormigón de elevadas prestaciones, con resistencias características de 60 y 75 MPa. A ello se unía la dificultad de acceso para el vertido y vibrado del hormigón a determinadas zonas dentro del encofrado y los reducidos espesores de las piezas.

Para evitar estos problemas, se recurrió a la utilización de hormigones autocompactantes con un tamaño máximo de árido de 12 mm.

No se tenía experiencia previa del uso de hormigones autocompactantes en estos volúmenes y para las resistencias características especificadas. Por ello se procedió a la realización de múltiples ensayos de caracterización y dosificación para obtener no sólo las resistencias precisas, sino también el mantenimiento de sus características autocompactantes a través del proceso de transporte, bombeo y vertido, el suficiente tiempo para poder ligar adecuadamente las distintas tongadas del hormigón. Hay que destacar que el riesgo más importante en la utilización de estos hormigones se produce como consecuencia de la pérdida "súbita" de las características de la mezcla, que puede suponer la aparición de juntas frías. Asimismo se realizaron ensayos para determinar su comportamiento reológico. Se realizó ensayo de fluencia donde se ensayaron varias probetas durante 8 meses, estando unas bajo carga de 100MPa y otras a 300MPa. Se determinaron fórmulas de "invierno" y de "verano" adaptando además los aditivos específicos para cada fórmula. Se han conseguido valores de resistencia y módulo de elasticidad totalmente equiparables a los correspondientes al hormigón vibrado.

Por último queda indicar que el acabado con el que han quedado estos hormigones es magnífico.

### 2.2.6. Ensayo del túnel del viento

Una característica específica más de diseño que desde el punto de vista constructivo es el ensayo del túnel del viento.

Se estudió la respuesta frente a la acción del viento mediante el ensayo de un modelo seccional (escala 1:70) y un



FIGURA 18. Acabados hormigón. Vista frontal desde estribo 2, lado almazara y vista general arco desde tablero.



FIGURA 19. Maqueta túnel del viento y vista general puente del tercer milenio construido.

modelo aeroelástico integral de la estructura en túnel de viento de capa límite a escala 1:125.

Los ensayos incluyeron la determinación de cargas pseudoestáticas, identificación de fenómenos aeroelásticos, el estudio de sensibilidad al amortiguamiento además de la innovadora medida del campo de presiones en ambas caras de las galerías peatonales, con el que se pudo estimar las cargas de viento con reducciones significativas frente a los valores recomendados por la Normativa.

Este estudio se realizó en el Túnel de Viento de Capa Límite I del Centro Andaluz de Medio Ambiente (Universidad de Granada) y en el Túnel II, del Boundary Layer Wind Tunnel Lab. De la Universidad Western de Ontario.

Los resultados de estos ensayos fueron muy satisfactorios, no encontrándose fenómenos significativos de inestabilidad. La cuidada forma aerodinámica de las galerías resultaron muy favorecedoras para la respuesta del tablero, asegurando el confort exigido en servicio para estos espacios.

### 3. PABELLÓN PUENTE

#### 3.1. BREVE DESCRIPCIÓN FORMAL

El Pabellón Puente es una estructura que cumple doble función, por un lado sirve de entrada al recinto de la Expo 2008 en Zaragoza, y por otro, sirve de recinto expositivo dispuesto en varios niveles. La primera de las complejidades de esta estructura reside en su propia descripción. Los conceptos convencionales de tablero, pilas y estribos quedan fuertemente integrados en el concepto arquitectónico.

La estructura, metálica, de unos 280 metros de longitud entre extremos más alejados, consta de dos vanos de unos 125 y 155 metros. El apoyo central se encuentra en una pequeña isla existente en el cauce.

El volumen del Pabellón Puente se distribuye según 4 módulos llamados PODS (vainas en inglés). Los PODS 1 a 3

se encuentran en la margen izquierda, lado Expo, y el 4 en la derecha. Los PODS 2 y 4 (centrales) tienen continuidad interior permitiendo principalmente el paso peatonal de comunicación con la Expo. Los PODS 1 y 3 (laterales) constituyen el núcleo expositivo del pabellón. Disponen de varios niveles con rampas de conexión.

Los elementos estructurales principales son cuatro: cajón, cordones superiores, costillas y fachada.

El cajón inferior es metálico y de planta curva irregular, con anchura variable entre 12 y 29 metros y canto asimismo variable entre 3.30 y 5.55 m. En su interior lleva diafragmas transversales cada 3,60 m. en los que se disponen huecos para paso de las instalaciones del puente. Este cajón alcanza su canto máximo sobre el apoyo central, teniendo fondo horizontal según una superficie de borde curvo que engloba el encepado, prolongándose el cajón posteriormente con unos faldones curvos que abrazan y ocultan el encepado.

Los cordones superiores siguen el vértice superior de cada pod ramificándose en las correspondientes intersecciones complejas entre pods. En ambos extremos del puente, cada uno de estos cordones se bifurca en dos perfiles curvos que llegan a los apoyos de estribo.

Las costillas son los elementos inclinados que unen estructuralmente cajón y cordón superior. Al igual que los diafragmas, se sitúan cada 3.60 m.

La fachada está formada por paneles de perfiles rectangulares ortogonales de 160 x 80 milímetros y espesores variables (diagrid), situados entre cada dos costillas en sentido longitudinal.

Toda la estructura se organiza esquemáticamente según 76 secciones transversales paralelas entre sí separadas 3.60 metros y numeradas en sentido norte - sur.

La estructura está concebida asemejando el comportamiento al de una viga de dos vanos de sección transversal variable. El cajón realiza la función de la cabeza inferior,

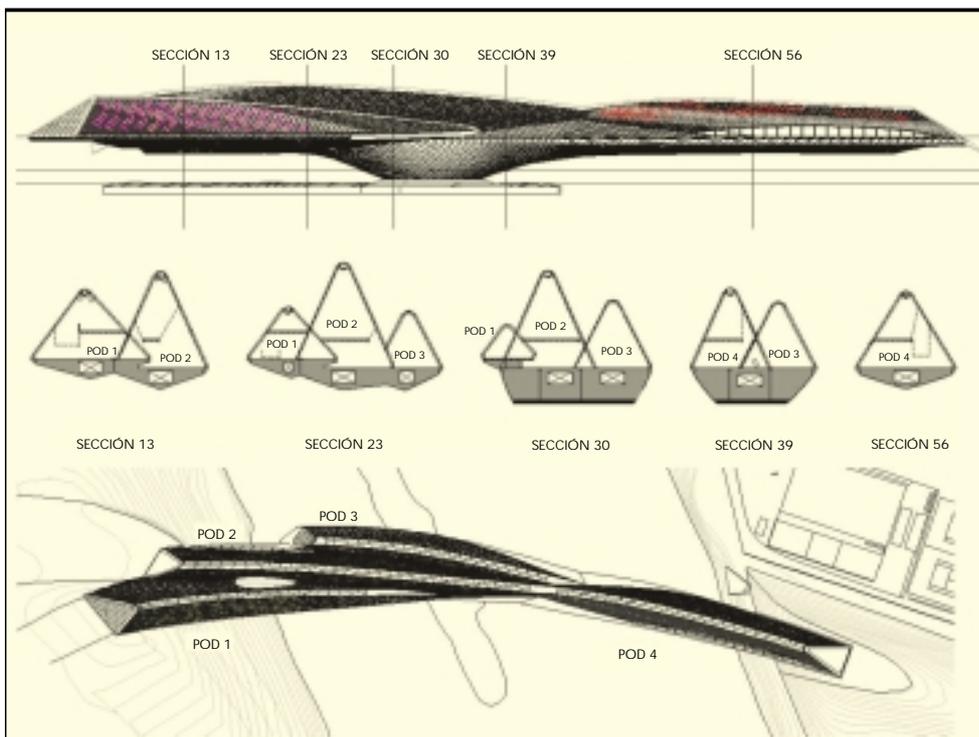


FIGURA 20. Planta, alzado y secciones transversales tipo.

traccionada en los centros de vano y comprimida sobre el apoyo central. Los cordones superiores realizan la función de la cabeza superior, comprimidos en los centros de vano y traccionados sobre el apoyo central. La fachada, encargada de la transmisión de esfuerzos cortantes, realiza la función del alma. La introducción en el mecanismo resistente global de las cargas aplicadas en el tablero la realizan, en primer lugar, los diafragmas transversales del cajón y, en segundo lugar, las costillas.

La geometría es extraordinariamente variable y compleja. Las uniones entre los distintos elementos son distintas y complicadas, haciendo imposible en la mayoría de los casos la definición de "uniones tipo".

### 3.2. PROCESO CONSTRUCTIVO

La ejecución de esta estructura se realizó en un proceso mixto:

- La parte de la estructura denominada en el proyecto de arquitectura como POD 1, POD 2 y POD3, situada entre el encepado central y la margen izquierda (estribo norte), se construye in situ mediante una península provisional creada entre la orilla izquierda y la isla central.
- La parte de estructura denominada en el proyecto de arquitectura como POD 4, situada desde el apoyo central hasta la margen derecha (estribo sur), se construye en la explanada que se realiza en la margen derecha sobre apeos provisionales. El lanzamiento de esta parte hasta su posición definitiva fue una maniobra compleja, delicada y espectacular que marcó todo el proceso constructivo.

En resumen, el proceso constructivo fue el siguiente:

- Construcción de cimentaciones, estribos y pilas.
- Fabricación y montaje de estructura metálica sobre apeos.
  1. POD 1, POD 2, POD 3: montaje in situ.
  2. POD 4: montaje en explanada zona sur.
- Lanzamiento zona sur.
  1. POD 4: Lanzamiento hasta posición definitiva
- Conexión tramo fijo con tramo lanzado y desapeo final.
- Instalaciones y Acabados.

#### 3.2.1. Fabricación y montaje estructura metálica

La fabricación de la estructura metálica ha requerido un enorme y complicado trabajo en el desarrollo de los planos de taller, habida cuenta de las complejidades formales de las distintas piezas y sus distintas conexiones.

- En la margen izquierda (zona norte) el montaje se realizó sobre una península artificial que llegaba hasta el encepado central. Estos 3 PODS eran los más complejos. Su montaje se realiza sobre pórticos de apeo separados 3.6 m. coincidiendo con las secciones y cimentados directamente sobre zapatas corridas. No obstante ante el posible riesgo de que una riada pudiera descalzar dichas cimentaciones se reforzaron notablemente uno de cada 6 pórticos mediante pilotes prefabricados y diseñándolos de forma que permitiera recoger el peso de estructura correspondiente a los 6 pórticos.

Esta península artificial se realizó de forma amplia para permitir la circulación perimetral de los medios de transporte, grúas y plataformas necesarios para la manipulación y soldadura de los distintos elementos en que se ha fabricado en taller la estructura. Asimismo se colocaron tres grúas torre, una de ellas móvil, fundamentalmente para el montaje del revestimiento de fachada.

- En la margen derecha (zona sur) el montaje de la parte de estructura a lanzar del POD 4 se realiza sobre un relleno situado totalmente fuera del cauce y desplazado 123 metros de su posición definitiva. Del mismo modo que en la otra margen, los pórticos de apeo van separados 3.6 metros coincidiendo con las secciones y cimentados directamente sobre zapatas corridas.

Debido a la compleja maniobra de empuje de la parte de estructura del POD 4, fue necesario la fabricación y montaje de una serie de refuerzos no sólo en la parte lanzada (zona sur), sino también en la parte fija (zona encepado central). Los refuerzos eran de tres tipos: aquellos que se retiraban una vez acabado el lanzamiento (nariz lanzamiento, orejetas, triangulaciones entre secciones 41-45, etc.); otros se retiraban al concluir alguna etapa del lanzamiento; y otros refuerzos permanecían incluso después de terminar el lanzamiento.



FIGURA 21. Vista aérea montaje cajón visto desde SE.



FIGURA 22. Montaje cajón tramo fijo (tramo norte).



FIGURA 23. Diferentes fases montaje tramo lanzado (tramo sur).

### 3.2.2. Lanzamiento zona sur:

La solución adoptada para el lanzamiento consistía básicamente en lanzar el tablero sin necesidad de apoyos intermedios utilizando una torre provisional (mástil) de tiro situada sobre el encepado central en el tramo fijo y un sistema de cables de tiro y de retenida anclados al tablero.

El eje de deslizamiento quedaba definido por la línea que unía el centro de gravedad del tablero a lanzar con el centro del encepado central, línea que marcaba asimismo la orientación de las patas del mástil y de sus cables traseros de tracción. Debido a problemas de interferencia con terrenos colindantes fue preciso montar la estructura desplazada lateralmente 9m respecto a su eje final previendo pues un ripado transversal dentro de las etapas de lanzamiento previa a la colocación de los sistemas de cables de tiro y retenida.

Como consecuencia de las características del tablero en la zona central, sobre encepado, se consideró que la separación óptima de las líneas de deslizamiento, y por tanto, la separación entre las patas del mástil era 9m., conjugando asimismo la estabilidad transversal de la maniobra. En cambio, los cables de retenida en la parte trasera del tablero (viga retenida estribo sur) se dispusieron solo separados 3.5m ya que una separación mayor implicaba grandes dificultades para la ejecución del dado de cimentación por la presencia de interferencia con instalaciones además del condicionante del diseño de la viga de retenida. El eje de lanzamiento quedaba prácticamente fuera de la sección en esa

zona trasera, indicando una aparente excentricidad, pero solo aparente porque el eje de tiro así como todos los elementos del sistema estaban alineados en un mismo eje que pasaba a su vez por el centro de gravedad de la parte de puente empujada garantizando el equilibrio de la maniobra.

Tras desapear la zona de tablero a lanzar, la estructura quedó apoyada sobre 4 patines delanteros y otros 4 traseros. En esta posición se realizó un avance longitudinal de unos 44m hasta agotar el recorrido posible hacia el río de los patines delanteros. Una vez realizado dicho avance, se conectó el sistema de cables de tiro y retenida que permanecerá hasta el final del lanzamiento.

Durante el resto de los avances se va procediendo a cambiar la posición de los patines delanteros y traseros utilizando un apeo auxiliar en posición fija situado delante del estribo. Este cambio de patines buscaba conjugar que en ningún momento las cargas en patines superaran las limitaciones impuestas por el análisis estructural de las distintas fases de la maniobra. Además, las cargas máximas en pilotes de encepado central no debían superar los valores límites prefijados como consecuencia del momento inducido por la carga de los cables de tiro. Todos estos condicionantes determinaron una secuencia de operaciones muy estudiadas en las que, los equipos hidráulicos, la capacidad resistente de los elementos auxiliares (como el mástil) se encontraban dentro de límites razonables.

El resumen de valores limitativos totales en las distintas fases del proceso se refleja en la tabla 1.

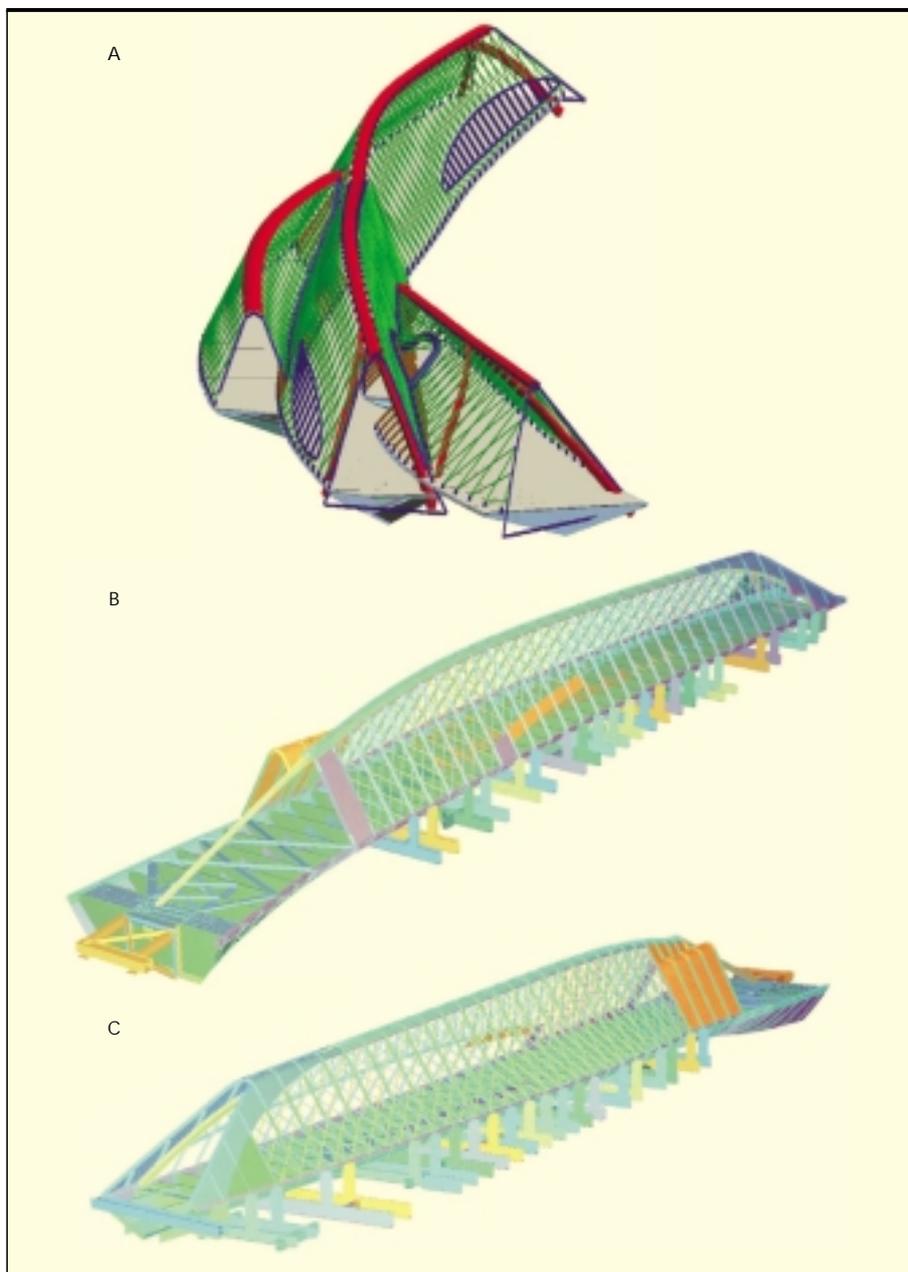


FIGURA 24. A. Perspectiva esquemática de la estructura, B. Tramo lanzado. Modelo de cálculo. Vista desde NW. Secciones de apoyo, C. Tramo lanzado. Modelo de cálculo. Vista desde SE. Secciones de apoyo.

ELEMENTO		VALOR MÁXIMO	VALOR MÍNIMO	CAPACIDAD EQUIPOS
Momento en el encepado	M	550000 kNm	-	
Reacciones en Apeo delantero	R1	11000-13000 kN	2000 kN	20000 kN
Reacciones en Patín Delantero	R1	11000-13000 kN	2000 kN	40000kN
Reacciones en Patín Trasero	R2	11000-13000 kN	2000 kN	20000kN
Tensión máxima total de Tiro	T	14000kN		17000kN
Retenida máxima	R	9000kN		10000kN
Compresión total en Mástil	CO	26000kN		
Tracción total retenida Mástil	TR	18000kN		20000kN

TABLA 1.

En resumen, la secuencia de maniobra que se realizaron fueron las siguientes:

- Sobre patines delanteros y traseros y sin sistema de cables de tiro y retenida. Configuración isostática.
  1. Desapeo de la estructura, pesaje y obtención c.d.g.
  2. Deslizamiento longitudinal de 27m.
  3. Ripado transversal de 9m.
  4. Deslizamiento longitudinal de 17.46m.
- Sobre patines delanteros y traseros y con sistema de

cables de tiro y retenida. Configuración hiperestática.

5. Deslizamiento longitudinal de 54m.
- Sobre patines traseros y con sistema de cables de tiro y retenida. Configuración "isostática".
6. Deslizamiento longitudinal 25m.
- Con torres de gateo en estribo sur y con sistema de cables de tiro y retenida.
7. Descenso final de 2.70m y posicionamiento de la estructura.

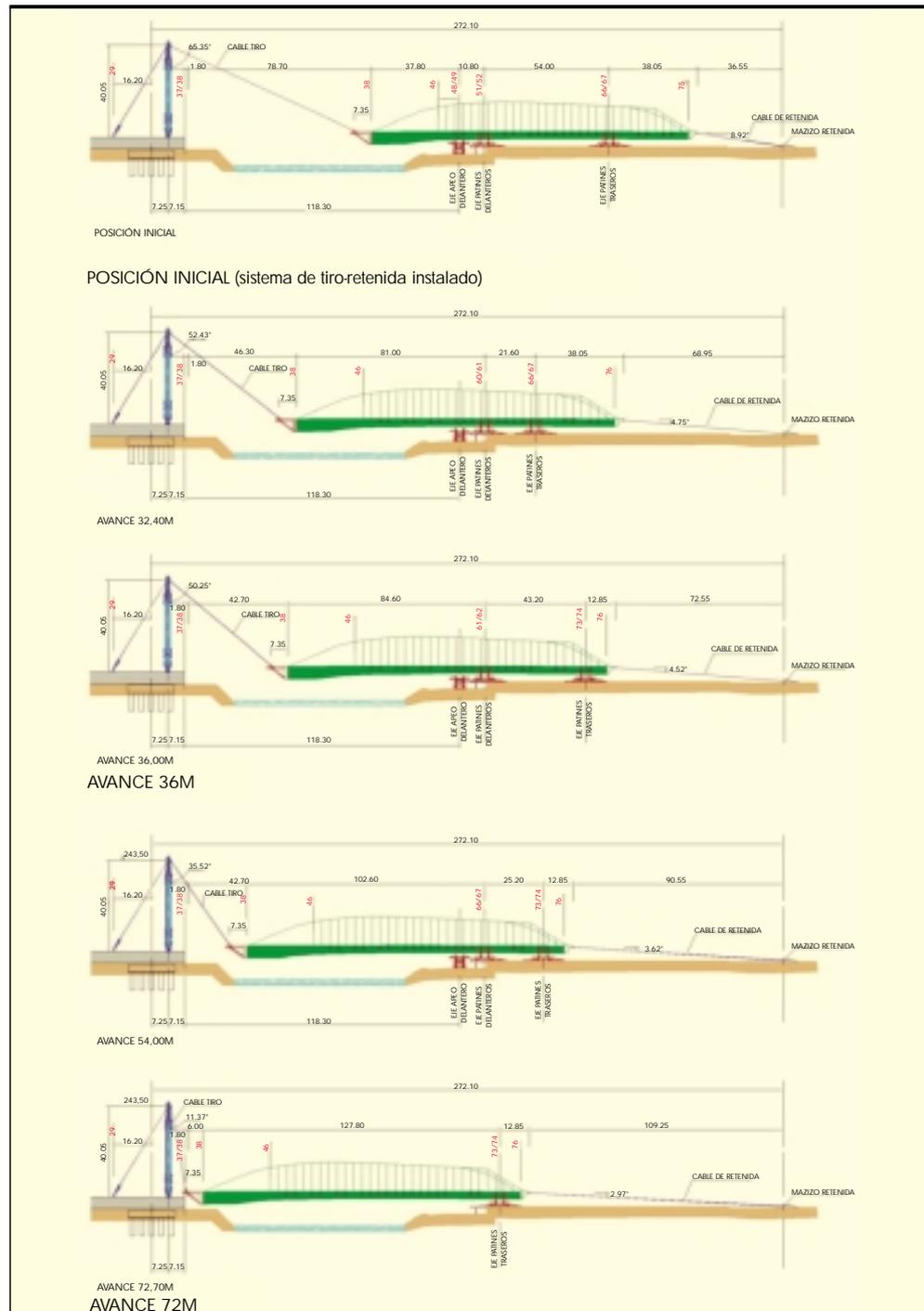


FIGURA 25A. Croquis secuencia avance lanzamiento con tiro-retenida.

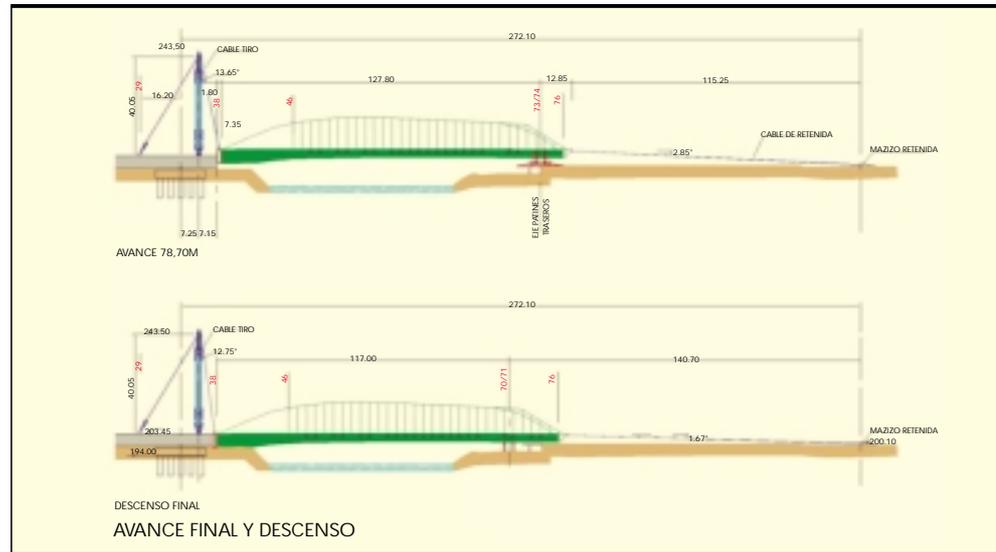


FIGURA 25B. Croquis secuencia avance lanzamiento con tiro-retenida.

El equipo a utilizar para esta maniobra comprendía:

- 2 unidades de izado de 850t (tiro-suspensión) en mástil y frente zona lanzada con 55 cables de diámetro  $\square$ 18mm cada unidad; 4 unidades de 500t de retenida de mástil, y 2 unidades de 500t de retenida en la parte trasera de la zona lanzada con 48 cables de diámetro  $\square$ 16mm cada unidad; 2 unidades de 70t de retenida de viento.
- Sistemas de deslizamiento: 4 conjuntos de patines de 1000t cada uno (patines delanteros) unidos 2 a 2 y 4 conjuntos de 500t cada uno (patines traseros) unidos dos a dos, con sus respectivos gatos de empuje horizontal (4 en total).
- Sistema de apeo fijo formado por estructura soporte metálica y 4 gatos de 500t con sus carcasas correspondientes.
- Sistema de gateo formado por 4 gatos de 500t con cabeza basculante y 4 columnas de vigas rigidizadas montadas alternas en forma de castillete que permitían descensos de 500mm en 500mm.



FIGURA 26. Apeo delantero, viga soporte, patitas y muñones.

Las estructuras auxiliares a utilizar comprendían:

- Mástil de 40m de altura formado por columnas tubulares de 2200mm de diámetro debidamente rigidizadas y arriostradas. Patas de estabilidad para montaje del mástil.
- Marcos de retenida y elementos de apoyo.
- Estructura de estabilización viento patines traseros.
- Estructuras soporte situadas sobre patines y apeo delantero formadas por vigas y "patitas". Estas estructuras verticales estaban situadas en los bordes laterales de la estructura. Para que éstas se adaptasen a la forma del puente fue necesario instalar unos elementos de transición entre el puente y las "patitas", que se denominaron "muñones". El contacto entre patita y muñón se hizo mediante neoprenos zunchados. Se diseñó un sistema de neoprenos de pequeño tamaño de modo que, según la magnitud de las cargas a las que se iba a someter a la patita en las diferentes fases de lanzamiento, se colocaron un número variable de neoprenos para garantizar que las tensiones máximas y mínimas se encontrasen dentro de los límites habituales de 2 - 15 MPa. Las "patitas" tenían puntales inclinados sobre las vigas para resistir las posibles fuerzas horizontales debidas al viento.

#### 1. Desapeo de la estructura, pesaje y obtención c.d.g.

Después del desapeo de la estructura, ésta se encontraba apoyada en el conjunto de patines delanteros y patines traseros. Previo a ningún movimiento se realizó una maniobra de pesaje que ayudara, por un lado a determinar el "peso" de la estructura a lanzar y por otro, la posición real del centro de gravedad.

Dada la complejidad de la estructura, en este caso la determinación del c.d.g. adquiría una enorme importancia dado que los esfuerzos a los que se someterían tanto la estructura como los elementos auxiliares durante el lanzamiento dependían en gran medida de la estimación teórica de su posición.

La estructura a lanzar tenía unas 2100t de peso y el c.d.g. coincidió prácticamente (diferencias de tan sólo 8cm) con lo estimado.



FIGURA 27. Vista aérea antes ripado transversal.

**2. Configuración isostática. Deslizamiento sobre patines sin sistema de cables de tiro-retenida.**

Los patines delanteros estaban separados unos 54m de los patines traseros. Se deslizaban por sus respectivas líneas de carriles sobre las que se disponía una cama de teflones previamente engrasados. Los patines en estas fases del lanzamiento eran empujados por unos gatos horizontales que se anclaban a unos dispositivos alojados en los carriles que favorecían el movimiento longitudinal.

Después de una primera etapa de avance longitudinal de 27m, se procedió a realizar el ripado transversal de 9m por lo que hubo que liberar los patines de carga, transfiriendo ésta a otros gatos auxiliares situados de forma excéntrica y girarlos 90°, orientándolos en sentido perpendicular. Esta maniobra se realizó 2 veces para conseguir colocar de nuevo los patines en sentido de avance longitudinal, pero esta vez en la alineación definitiva de lanzamiento. En esta nueva posición se avanzaron otros 17m aproximadamente hasta que los patines delanteros alcanzaron el extremo más próximo al río de los carriles de deslizamiento y fin de su trazado, cuando el tramo a lanzar se encontraba todavía a 79 m de su posición final.

**3. Configuración hiperestática. Deslizamiento sobre patines con sistema de cables de tiro-retenida.**

Para continuar con el movimiento, en esta fase era necesario retrasar la posición de los patines delanteros sin variar la posición del puente para que éstos volvieran a tener carril por el que poder deslizarse.

Al retrasar el patín delantero, la posición del c.d.g. cambiaba situándose por delante de los apoyos de los patines, por lo que era necesario utilizar un pescante y un sistema de cables de tiro y retenida.

Para el cambio de posición de patines era necesario previamente apea el tramo lanzado sobre el apeo fijo situado por delante del estribo sur.

Una vez liberados los patines delanteros y retrasados en la nueva posición determinada para el siguiente movimiento, se transfería la carga desde el apeo delantero hacia los patines delanteros manteniendo el equilibrio con la ayuda de los cables de tiro y retenida.

Para continuar el movimiento era preciso garantizar el equilibrio durante el empuje por lo que era necesario que el camino de rodadura coincidiera con el eje del sistema de tiro y retenida (conjunto de cables de retenida de la torre-> torre-> cables de tiro-> cables de retenida trasera-> macizo de

retenida), y que además estuvieran alineados con el centro de gravedad de la parte de puente empujada.

Partiendo de una situación de equilibrio entre tiro y retenida, el movimiento se conseguía soltando cable en la retenida del puente de forma muy controlada manteniendo el valor del tiro asignado durante toda la etapa correspondiente, de forma que el puente avanzaba la misma magnitud que el cable que se soltaba. Durante el movimiento los gatos horizontales de empuje de los patines no actuaban, sino que los patines se comportaban de forma pasiva, sólo como apoyos.

Mediante el sistema electrónico digitalizado de manipulación y control de los elementos de tiro-retenida, se establecía entonces un "equilibrio sincronizado" entre la fuerza de tiro y retenida para mantener un movimiento casi constante del tramo empujado.

Esta fase se dividió en etapas o subfases. Para cada etapa o subfase se definían los tiros objetivo del sistema tiro-retenida y las reacciones previstas en los patines de apoyo del puente. Durante el avance cambiaba la geometría, y con ella las condiciones de los puntos de control, por lo que se estudiaban las condiciones iniciales y finales en las diferentes secciones de apoyo necesarias, así como los "muñones" correspondientes que, como ya se ha comentado anteriormente, eran los elementos de contacto entre el puente y los patines de apoyo.

**4. Configuración isostática. Deslizamiento sobre patines con sistema de cables de tiro-retenida.**

Cuando se han avanzado aproximadamente los 54m en la fase anterior, es necesario suprimir el apoyo de los patines delanteros, avanzando los últimos casi 25m con el sistema de tiro-retenida y patines traseros, en condiciones de configuración "isostática".



FIGURA 28. Fase hiperestática sistema tiro-retenida. Vista lateral y vista tramo lanzado desde NW.



FIGURA 29. Lanzamiento con tiro-retenida. Llegada península.



FIGURA 30. Llegada y descenso.

El movimiento se realiza de la misma manera que en la fase anterior soltando cable de retenida y manteniendo el tiro buscando una "sincronización" de los dos sistemas. También se activaron los sistemas de tiro de viento.

El lanzamiento se realizó en 15 etapas que supusieron 18 configuraciones de apoyo distintas.

##### 5. Descenso 2.70m y posicionamiento final.

Se definió la cota de deslizamiento la +2.70m para permitir la instalación de los elementos auxiliares (carriles, patines, vigas soporte, patitas, muñones, etc.) necesarios para el deslizamiento bajo la estructura lanzada.

Cuando había concluido el movimiento longitudinal era necesario descender la estructura los 2.70m indicados.

La maniobra se complicaba por el esviaje de la parte trasera. Instalada la estructura de gateo diseñada por delante del estribo sur, se fueron realizando descensos, soltando el cable de tiro en la parte delantera y permitiendo apoyar la parte trasera sobre gatos o alternando sobre la estructura metálica durante los diferentes escalones de 500mm en que se realizó la maniobra de descenso.

Esta maniobra requería de un control de los sistemas de tiro y retenida en concordancia con las cotas de los apoyos de los gatos en la parte trasera para evitar giros indeseables y torsiones inducidas en el tablero.

##### Sistemas de control durante el lanzamiento

El cambio en las condiciones de apoyo además del avance del movimiento a tiro constante provocaba un cambio en la configuración estructural, pues manteniendo constante el valor total del tiro, la componente vertical del mismo aumentaba mientras que la horizontal disminuía. En cada ocasión que se producía un cambio en la configuración estructural,

se calculó el modelo verificando la seguridad de todos los elementos estructurales. Por consiguiente era preciso realizar controles durante el lanzamiento en cada cambio de la configuración estructural, de modo que se validaran los resultados teóricos obtenidos del modelo de cálculo.

Se establecieron los siguientes parámetros a controlar:

- **Reacciones obtenidas en patines**, mediante lectura en manómetros digitales en los gatos y en las centrales.
- **Deformaciones de la estructura**, mediante un sistema de **auscultación topográfica** automática que permitía la obtención de las coordenadas de todos los puntos de control establecidos para cada fase de empuje. Este sistema estaba formado por 4 estaciones totales de alta precisión, dotadas de herramientas de autorreconocimiento de los objetivos, mecanismos de autocontrol, de auto orientación y transmisión de datos recogidos mediante la telecomunicación con un ordenador central donde se procesaban los datos.
- **Fuerzas en elementos singulares**, mediante un sistema de instrumentación de los soportes ("patitas") donde actuaban los patines, empleándose bandas extensométricas. También se instrumentó la pata delantera de la estructura por ser un elemento con comportamiento lineal cuyo axil se relacionaba fácilmente con el tiro aplicado.

Los datos eran registrados por un ordenador central que procesaba los datos en tiempo real.

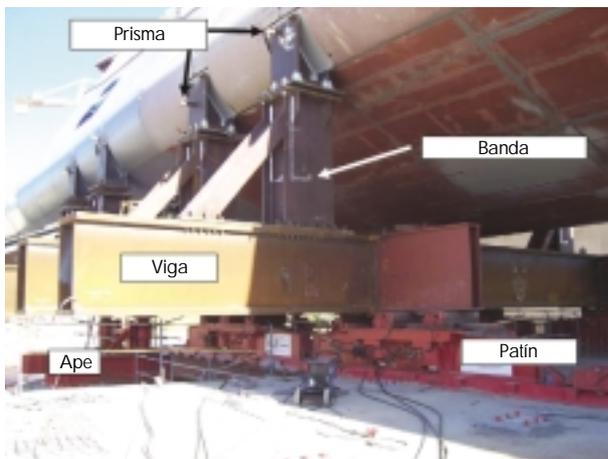


FIGURA 31. Instrumentación sección apoyo.

Además de estos elementos, se controló en todo momento de forma monitorizada y continua las carreras y las cargas de las unidades de tiro y retenida, tanto para los cambios de posicionamiento de patines, así como para buscar ese “sincronismo” en el sistema tiro-retenida, manteniendo el tiro constante, que era la máxima que regía el movimiento.

También se controló topográficamente la verticalidad del mástil en cabeza durante las etapas de montaje, de puesta

en carga de los elementos de tiro así como durante el movimiento. También se controlaron puntos en tablero fijo en varias secciones. A nivel de cimentaciones se comprobaron en determinadas etapas los macizos de anclaje de retenida trasera del puente y de viento.

Estos controles descritos anteriormente venían acompañados de controles visuales de zonas de estructura así como elementos auxiliares previamente estudiados según cada condición de apoyo y tiro en cada etapa del lanzamiento.

En cuanto a la previsión meteorológica, se tenía información 3 veces al día y en avance, por lo que se planificaban las maniobras en función de estos resultados.

Todos los controles se registraban en unas elaboradas fichas de trabajo previamente contrastadas con el modelo de cálculo.

### 3.2.3. Conexión tramo fijo con tramo lanzado y desapeo final

Una vez que el tramo lanzado se encontraba apoyado en los pots definitivos en estribo sur y en estructura auxiliar en tramo fijo, se procedió a la conexión de ambos tramos. Se había estudiado una sección de menos de 1m de longitud sin armar para permitir cierta holgura de corrección y ajuste de soldadura entre la parte lanzada y la fija. El lanzamiento fue un gran éxito y se consiguió dejar el tramo lanzado bien alineado respecto al fijo, por lo que la labor se desarrolló con rapidez comenzando por el cajón, continuando por la estructura superior, cordón superior y paneles de fachada.

Concluida la unión, se procedió a la eliminación de los últimos apeos en la zona fija, así como a completar los muros de estribo, el cáliz de la zona encepado central, etc.



FIGURA 32. Unión tramos.



FIGURA 33. Interiores



FIGURA 34. Generales puente construido.

#### 3.2.4. Acabados e instalaciones

Lo que más ha caracterizado sin duda la ejecución de esta obra tan singular ha sido el plazo de ejecución de 18 meses para el proyecto de construcción, fabricación y montaje de obra civil, (incluido lanzamiento), fachadas, instalaciones, acabados, etc.

Se realizó un gran esfuerzo para compaginar la instalación de servicios, remates de obra civil, instalación de elementos de fachada etc. realizando todos estos trabajos dentro de un marco de seguridad excepcionales.

### 4. AGRADECIMIENTOS

#### 4.1. PUENTE DEL TERCER MILENIO

Promotor: ZARAGOZA ALTA VELOCIDAD 2002 S.A.  
 Proyecto: ARENAS & ASOCIADOS, INGENIERÍA DE DISEÑO S.L.

Autor del Proyecto: JUAN JOSÉ ARENAS DE PABLO, ICCP.

Dirección de Obra: UTE ARENAS & ASOCIADOS-SERS S.A.

Obra: DRAGADOS S.A.

#### 4.2. PABELLÓN PUENTE DE LA EXPOSICIÓN INTERNACIONAL ZARAGOZA 2008

Promotor: EXPOAGUA ZARAGOZA 2008 S.A.

Proyecto: UTE ZAHA HADID LIMITED Y OVE ARUP & PARTNERS S.A.; FHECOR INGENIEROS CONSULTORES (proyectista de la variante estructural)

Dirección de Obra: OVE ARUP & PARTNERS S.A.

Empresa Consultora: UTE ZAHA HADID LIMITED Y OVE ARUP & PARTNERS S.A.; IDEAM S.A.

Obra: DRAGADOS S.A.-URSSA, S. Coop.