

Puente atirantado «Puerta de Las Rozas» sobre la A-6, Madrid

The «Puerta de las Rozas» cable-stayed bridge over the A-6, Madrid

Juan José Arenas de Pablo. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Arenas&Asociados. jjarenas@arenasing.com
Guillermo Capellán Miguel. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Arenas&Asociados. gcapellan@arenasing.com
Pascual García Arias. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Idom Internacional. pga@madrid.idom.es
Miguel Sacristán Montesinos. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Arenas&Asociados. msacristan@arenasing.com
Emilio Merino Rasillo. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Arenas&Asociados. emerino@arenasing.com

Resumen: Desde el verano de 2007 está en servicio el nuevo puente atirantado "Puerta de las Rozas" que vuela sobre la A-6 creando un nuevo acceso a la ciudad de las Rozas. Esta nueva y reconocible imagen para los muchos usuarios de la carretera de la Coruña en su entrada a Madrid es el fruto tres años de trabajo en sus distintas fases de encaje, concurso, proyecto y ejecución. Se trata de un puente atirantado asimétrico de 102 m de luz con un ancho de tablero de 20 m, suspendido por 9 parejas de tirantes de un único mástil formado por dos células triangulares que incluyen los tirantes rígidos de contrarresto anclados a contrapeso.

Palabras Clave: Puente atirantado asimétrico; Las Rozas; Mástil triangular único, Tirantes rígidos

Abstract: The new "Puerta de las Rozas cable-stayed bridge, set over the A-6 motorway has been in service since the summer of 2007 and creates a new access to the suburb of Las Rozas. This new and instantly recognizable image for many of the users of the Coruña motorway at its approach to Madrid, is the result of three years work from the original ideal stage, through to tender, design and construction. The bridge is a 102 m span asymmetric cable-stayed bridge with a 20 m wide deck, suspended by nine pairs of cables from a single tower formed by two triangular cells which include the rigid restraints anchored to a counterweight.

Keywords: Asymmetric cable-stayed bridge; Las Rozas; Single triangular tower; Rigid restraints

Introducción

El puente "Puerta de las Rozas" conforma un nuevo paso superior sobre la Autopista de la Coruña y el conjunto de viales anexos, con el objeto de crear un nuevo acceso al término municipal de las Rozas y mejorar también la comunicación entre los barrios a uno y otro lado de la A-6. El cruce se produce a escasos 20 Km. del núcleo urbano de Madrid en una zona de tráfico intenso, con una planta esviada 20º respecto a la autopista, lo que, unido al futuro ensanchamiento de la A-6, da lugar a la luz de 102 m en la estructura.

El puente es el resultado de un concurso de ideas promovido por el Ayuntamiento de las Rozas en

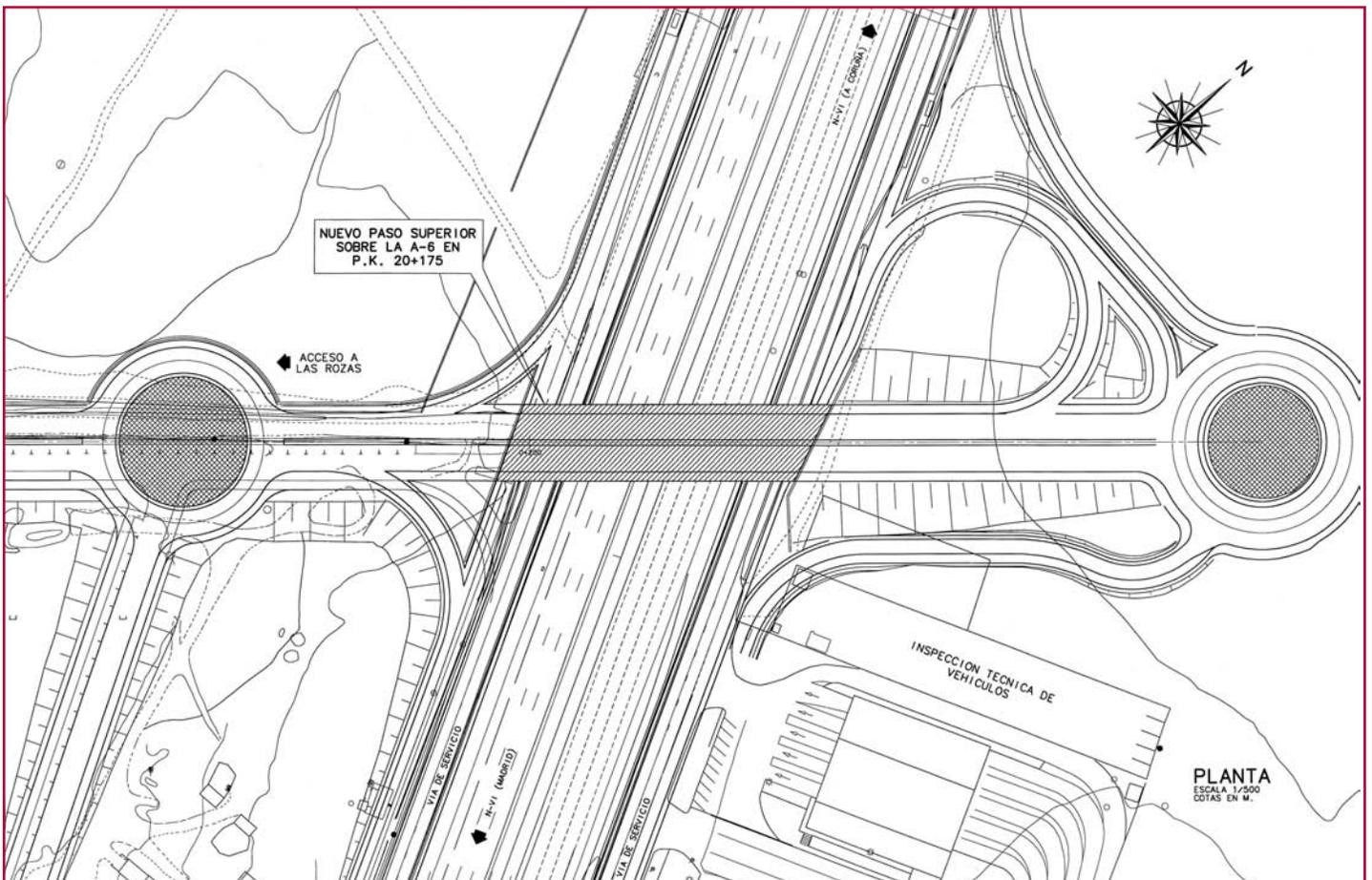
Enero de 2005, en el que resultó ganador el diseño presentado por **Arenas & Asociados** formando equipo con la ingeniería **Idom** para desarrollar también el conjunto de viales de conexión en ambas márgenes y su urbanización. El proyecto del nuevo puente se planteaba desde el ayuntamiento con este objetivo funcional de mejorar la comunicación del municipio, y con la finalidad simbólica de convertirse en una imagen o icono que marque el acceso a Las Rozas y que pudiera asociarse con la ciudad. Tras el resultado del concurso, el Proyecto de Construcción se terminó en Junio de 2005, iniciándose las obras a principios de 2006, para finalizar en Junio de 2007.

Han sido los condicionantes del **emplazamiento** los que han marcado las posibles soluciones de dise-



Foto 1. Vista del puente desde la A-6 en dirección Madrid.

Fig. 2. Planta general de la propuesta de cruce.



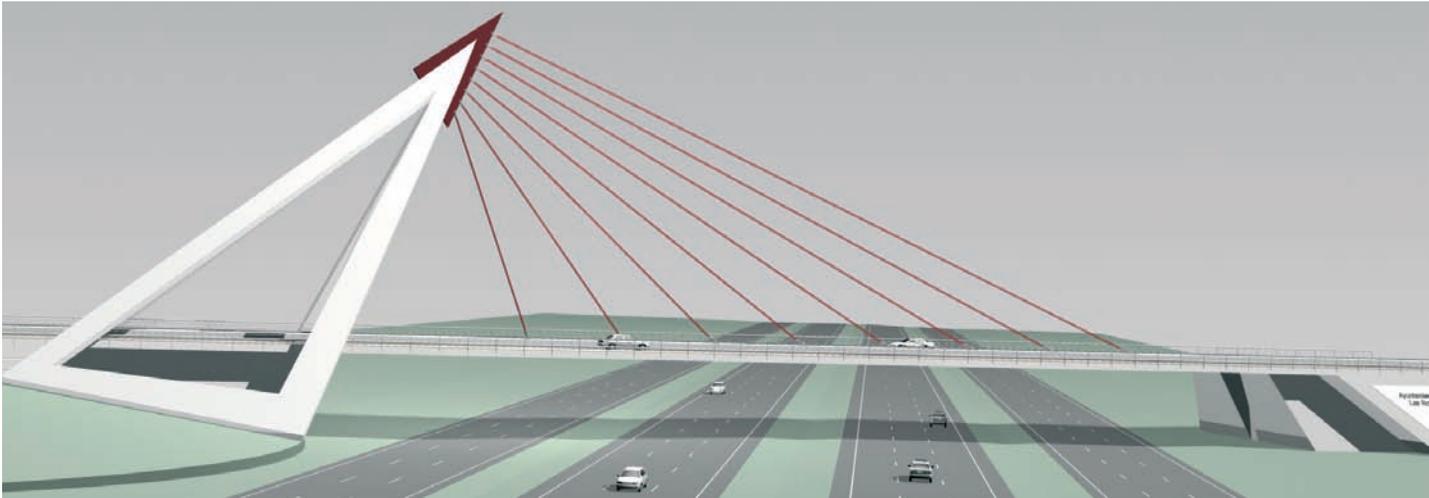


Fig. 3. Infografía del diseño para el Concurso de Ideas.

ño como vemos a continuación, en el análisis realizado para la elección y desarrollo de la tipología y los esquemas resistente y formal del puente.

El **cruce** consiste en un paso superior sobre la N-VI y sus viales de servicio con un esviaje en planta de unos 20° y luz estricta total de unos 84 m. La primera decisión es la de evitar apoyos intermedios y saltar esta luz con un único vano, y ello para eliminar la posible afección a la N-VI con la ejecución de pilas intermedias, y las limitaciones que éstas impondrían al aumento y modificación de las plataformas de calzada de los viales previstas. De igual forma, la mencionada búsqueda de un hito paisajístico con la construcción del nuevo puente requiere esta decisión de salvar con un trazo único el obstáculo que suponen los viales. La luz se aumenta hasta los 102 m para dotar de desahogo visual al tráfico, lo que supone también una ventaja fundamental y una mejora de las condiciones de seguridad durante la ejecución y en la posterior vida útil de la estructura, como lo es el propio hecho de no disponer pilas en medianas o tercianas. Permitiendo también la luz de 102 m situar los estribos perpendiculares al cruce.

El **diseño** elegido es el de un puente atirantado asimétrico de 102 m de luz, cuyo elemento principal es el mástil metálico formado por dos pórticos triangulares inclinados, que incluyen los tornapuntas comprimidos y los tirantes rígidos de contrarresto anclados al contrapeso, más las piezas de base que atan los arranques de los primeros. Estos dos grandes cartabones alcanzan una altura de 45 m sobre el terreno, constituyendo el foco de atención principal a la hora de percibir la estructura.

Ya desde la fase de concurso parece evidente que el entorno de la N-VI en que va a insertarse la estructura, con un tránsito de gran ajetreo y en un entorno semi-industrial con grandes carteles publicitarios elevándose sobre la carretera así como edificios comerciales y de oficinas reclamando la atención del usuario, supone que cualquier elemento que no supere cierta altura o dimensión va a ser percibido en un segundo plano de importancia. Por tanto, si se desea que la estructura sea un elemento visible del paisaje, su geometría y el diseño de sus formas han de contar con ello, aunque desde luego, evitando soluciones fuera de escala o faltas de gracia en sus proporciones.

El **encaje** se ve afectado de forma importante tanto por el esviaje como por las condiciones de la rasante y el trazado de los accesos. Los viales de acceso partiendo de la autopista poseen un espacio reducido para ganar cota y cruzar con el galibo necesario la vía principal. Como consecuencia, el tablero ha de tener un canto que resulte de verdad mínimo para evitar incrementar innecesariamente la pendiente de los accesos. Esto justifica también la elección de la tipología atirantada que resuelve con un canto máximo de 1.72 m los 102 m de luz, lo supone una esbeltez de 1/60, en tramo con mástil único. Aún así la pendiente en accesos alcanza el 8%, lo que da lugar a una rasante fuertemente alomada en el tablero, que sin embargo resulta muy expresiva en el plano estético. Además existe una diferencia de cotas entre uno y otro margen que supone una pendiente entre estribos del 2.3% que afecta a la percepción del conjunto.



Foto 4. Vista inferior del conjunto de mástil y atirantamiento frontal.

El esviaje ya comentado del paso respecto a la carretera de La Coruña, junto con la pendiente longitudinal de la rasante, hace que los intentos por encajar una solución en arco elevado no resulten satisfactorias y se desechen en la fase de encaje. Ya que estas soluciones, de carácter principalmente simétrico, se adaptan con dificultades a los condicionantes del esviaje y la pendiente entre estribos, que le dan un cierto carácter asimétrico al cruce. Además la altura de una solución arco, de unos 13 m sobre la rasante (1/7-1/8 de la luz), hace que no alcance el umbral de percepción marcado por el entorno, condenando al puente a no ser visible a partir de una cierta distancia.

La **solución atirantada** con mástil asimétrico responde correctamente a los condicionantes del emplazamiento adaptándose de forma adecuada a la pendiente global y al esviaje. Además el mástil único inclinado aporta una cierta direccionalidad a la estructura, lo que en un caso, en que como éste, se

busca un elemento que marque el acceso a Las Rozas parece del todo interesante. Por otro lado y a pesar del esviaje del cruce se decide no realizar el apoyo en estribos esviados respecto al tablero, pues esto afectaría negativamente a la configuración del atirantamiento y el mástil. Se opta por trabajar sobre el diseño de los estribos para que su condición oblicua respecto a la carretera no suponga un punto duro del encaje, sino aprovechar este hecho para dar lugar a formas y perspectivas que enriquezcan el cruce.

Los cables frontales de **atirantamiento**, aún si se plantean en parejas para reducir la potencia de cada tirante individual, se sitúan en la mediana del tablero, en dos planos centrales verticales paralelos y muy próximos, para evitar el efecto negativo de la confusión visual que se engendraría con un doble plano de atirantamiento lateral a causa del esviaje. Teniendo siempre en cuenta que la vista principal de la estructura es el alzado oblicuo que se observa



Foto 5. Vista de la acera central con pavimento de madera desde el lado Norte de la Autopista A6.

desde la A-6. Debido también al carácter asimétrico del paso, con el mástil retenido por tirantes dorsales a un contrapeso de contrarresto, se abandonan soluciones de tirantes paralelos o en arpa, más adecuados a configuraciones simétricas. Optando por la configuración de tirantes en "abanico" que se adapta mejor al cruce, dando lugar a un alzado de gran dinamismo. El atirantamiento en mediana supone alcanzar una esbeltez de 1/60 respecto a una posible esbeltez de hasta 1/100 en caso de disponer doble atirantamiento lateral, en uno y otro borde del tablero, por tener que hacer frente en éste a mayores momentos torsores y de flexión transversal. En este caso, sin embargo, consideramos más ventajoso el orden visual del atirantamiento central respecto a una posible reducción, en el caso de doble atirantamiento, del canto del tablero de hasta unos 50 cm.

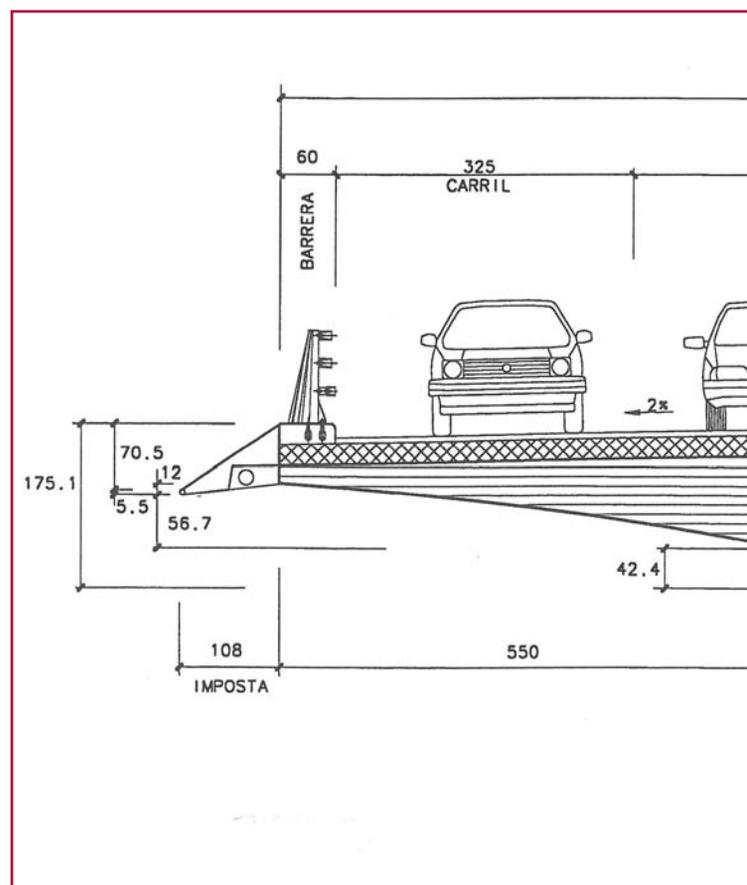
Son todas estas consideraciones las que nos llevan a elegir el diseño y la solución estructural de este puente atirantado, cuyo desarrollo técnico se detalla a continuación en la descripción de cada uno de sus elementos.

Descripción

Como ya se ha visto la estructura consiste en un puente atirantado asimétrico de 102 m de luz con los elementos de contrarresto anclados a un estribo-contrapeso semienterrado. El tablero se suspende desde el atirantamiento central de un mástil inclinado formado por dos células triangulares que incluyen los tirantes rígidos de retenida.

Inicialmente, la **sección tipo** del puente debía albergar dos carriles por sentido, aceras y mediana, dando lugar a un tablero de 22 m de ancho. Durante el estudio de ejecución del proyecto en obra se planteó la variante de sustituir las dos aceras laterales por una acera central en mediana. Esto se percibió como una ventaja para los usuarios pues realizarían el cruce más protegidos del tráfico de la A-6 en una acera central, de ancho doble, que se continúa hasta las rotondas existentes en cada uno de los extremos del vial del puente. Como resultado se consiguió reducir el ancho de la sección a 20 m, con calzadas de 6,50 m, acera central en mediana de 5 m, y barreras exteriores ocupando 60 cm. Esta reducción del ancho de un 10% permitió de igual

Fig. 6. Sección transversal tipo.



forma aminorar las cargas y la potencia de tirantes, así como parte de los espesores de chapas de la estructura metálica. El paseo central que de este modo se crea se pavimenta con madera de elondo, madera tropical de alta calidad, lasurada como protección adicional y ranurada para hacerla antideslizante.

El resultado es un **tablero** de sección mixta formado por una losa de hormigón de 22 cm sobre estructura metálica formada por un cajón central con voladizos, de 150 cm de canto máximo. El cajón central de 9 m de ancho máximo posee un fondo curvo, almas laterales inclinadas y dos almas centrales paralelas y verticales, coincidentes con los planos de suspensión de tirantes. Se dispone un rigidizador longitudinal por alma y tres por semifondo curvo de cajón central. La estructura posee dos platabandas superiores laterales y una central. Los diafragmas se disponen cada 3 m, distinguiéndose los diafragmas ultra rígidos dispuestos cada 9 m coincidentes con los planos de suspensión de los diafragmas marco tipo formados por rigidizadores transversales

da 9 m por una pareja de tirantes centrales separados transversalmente 72 cm, con la excepción del primer tirante desde el estribo E1 de mástil y contrapeso que se coloca a 18 m del apoyo.

Los **tirantes** están formados por unidades de cordones de acero de pretensado de 7 alambres de 0,6", con una potencia máxima de 31 cordones por tirante. La carga máxima de trabajo en servicio de un tirantes es de unos 350 Mp, lo que supone un 42% de su carga de rotura. Los cordones de acero disponen de tripe protección frente a corrosión formada por la vaina individual de polietileno de alta densidad (PEAD), la inyección de cera interior, y la vaina helicoidal PEAD general. Esta vaina se crea con un reborde helicoidal que permite disminuir la influencia de los vórtices de excitación aerodinámica sobre la vibración de los tirantes. Los terminales que hemos diseñado para esta obra se definen con rótula en su anclaje superior e inferior eliminando cualquier posible problema de garrotes o quiebras angulares en anclajes por errores de construcción. El terminal de anclaje activo es el inferior, y el tesado se

realiza así por encima de tablero, lo que plantea evidentes ventajas constructivas y de mantenimiento. Los terminales diseñados permiten el acceso para el enfilado y el tesado con gato unifilar en el caso de los terminales activos.

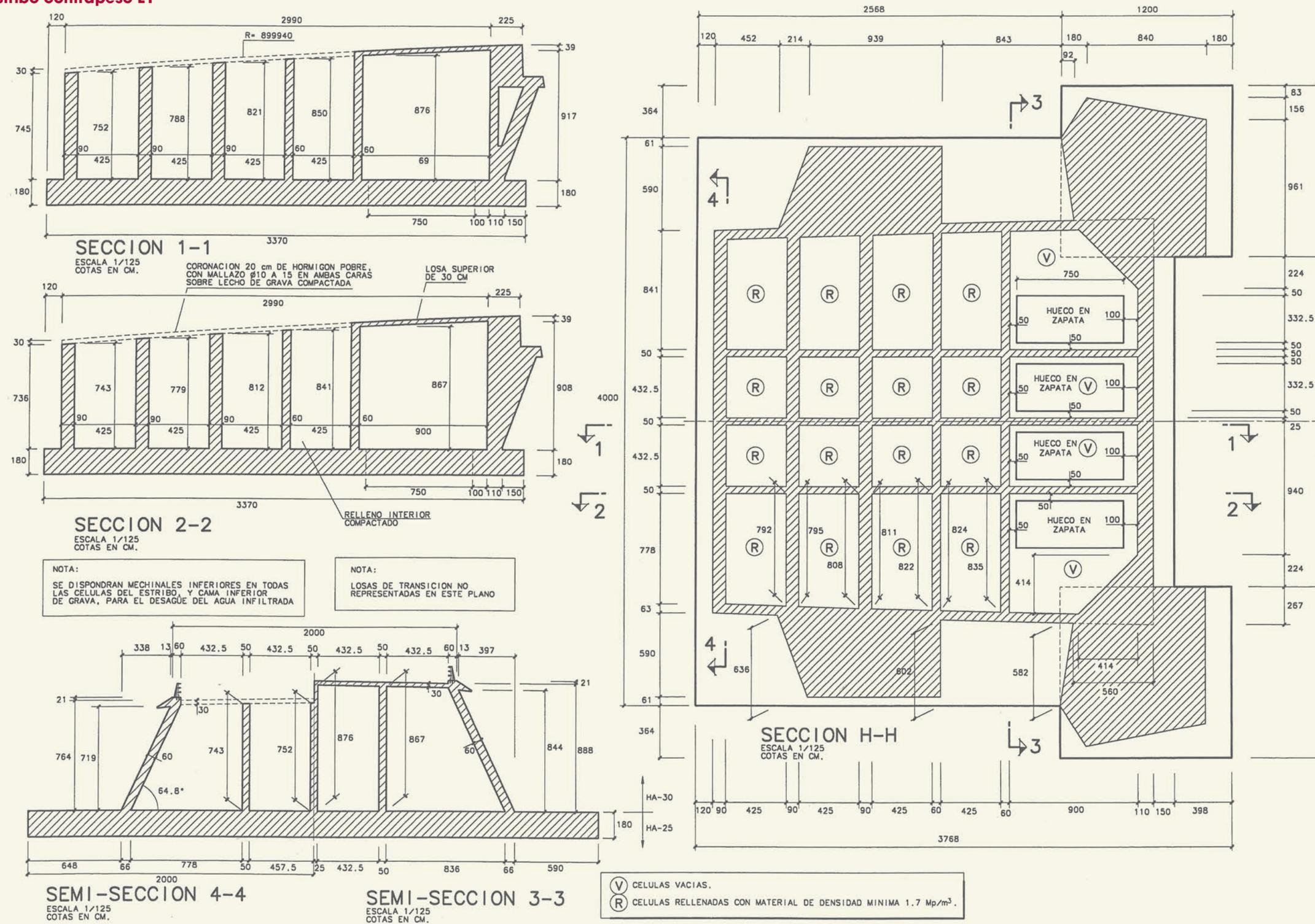
Los tirantes se anclan al **mástil** por medio de dos grandes chapas triangulares de 60 mm de espesor dispuestas en la dirección del tiro. Estos elementos triangulares forman un elemento principal distintivo del diseño a la vez que concentran toda la carga de tirantes y la transmiten al mástil a través del nudo que se crea entre chapas.

El mástil consta de dos pórticos triangulares o "cartabones", pórticos que están formados por un elemento comprimido inclinado hacia el frente que conforma la biela del mástil, y un elemento tendido traccionado que constituye el tirante rígido de contrarresto que compensa de modo pasivo la carga de los tirantes de tablero anclándola al contrapeso. Ya que la cimentación recibe fundamentalmente cargas verticales, existe una compensación de cargas horizontales que da lugar a una compresión en-

Foto 8. Vista posterior del mástil.



Secciones del Estribo contrapeso E1



Puente atirantado «Puerta de Las Rozas» sobre la A-6, Madrid



Foto 9. Encofrado frontal del Estribo E1.

tre el apoyo de la biela y el anclaje del tirante. Esta compresión la asumen de forma solidaria el alzado del estribo contrapeso y el puntal inferior que cierra el "cartabón" y que hace evidente al exterior este circuito cerrado de fuerzas. A su vez, la carga horizontal de los tirantes del tablero viaja comprimiendo la sección mixta y se transmite al estribo en el apoyo. Para esto la sección transversal de apoyo, articulada, dispone de dos placas de neopreno zunchado de 450x600 mm para transmitir la carga vertical en el estribo, comparativamente pequeños con los 6 aparatos de apoyo de 700x800 mm que transmiten la carga horizontal al estribo, sin dar lugar a flectores de empotramiento en el extremo del tablero, o sea, en la sección de apoyo en estribo.

Las células triangulares que conforman el mástil se colocan en dos planos inclinados transversalmente hacia el nudo superior lo que les permite salvar el ancho de tablero en la base y unirse en el vértice, donde se intersecan con los chapones triangulares de tiro dando lugar al nudo. Estos pórticos triangulares están formados por elementos de ancho levemente variable en ambas direcciones pero de sección simplemente rectangular, elegida de forma expresa para conseguir crear elementos de absoluta potencia y contundencia que se materializan en acero S355J2G3, y S355K2G3 para chapas de más de 25 mm. La sección metálica comprimida de la biela está rellena de hormigón en más de la mitad de su altura lo que consigue aumentar su capaci-



Foto 10. Vista del estribo E2 durante las obras.

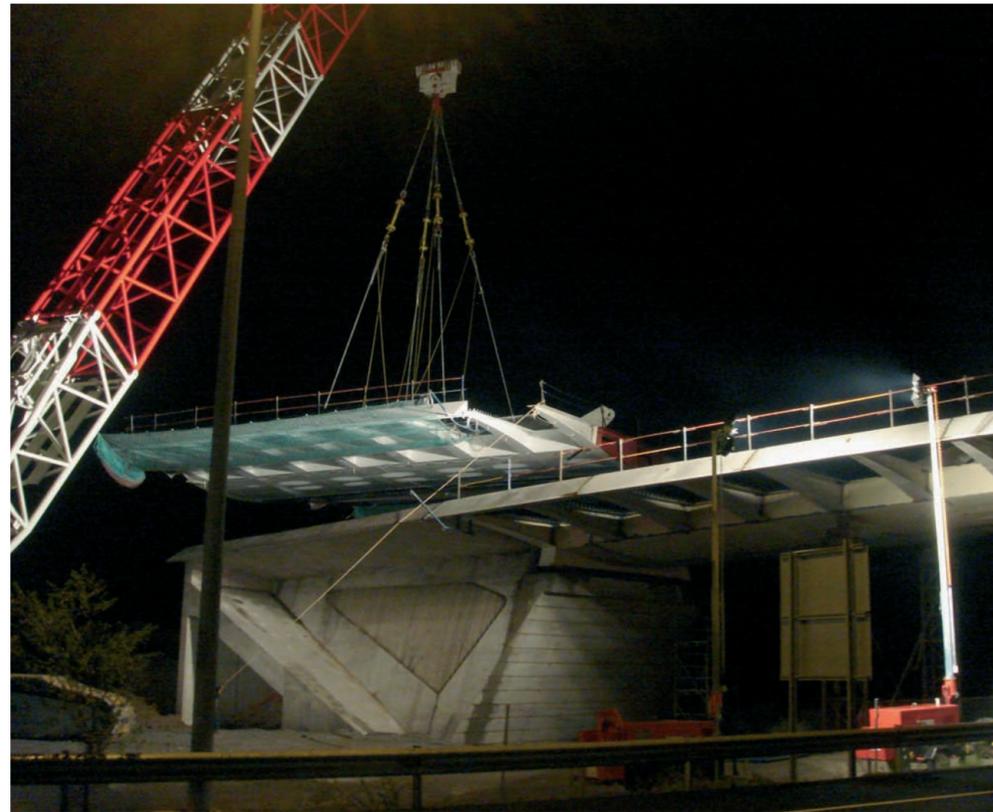
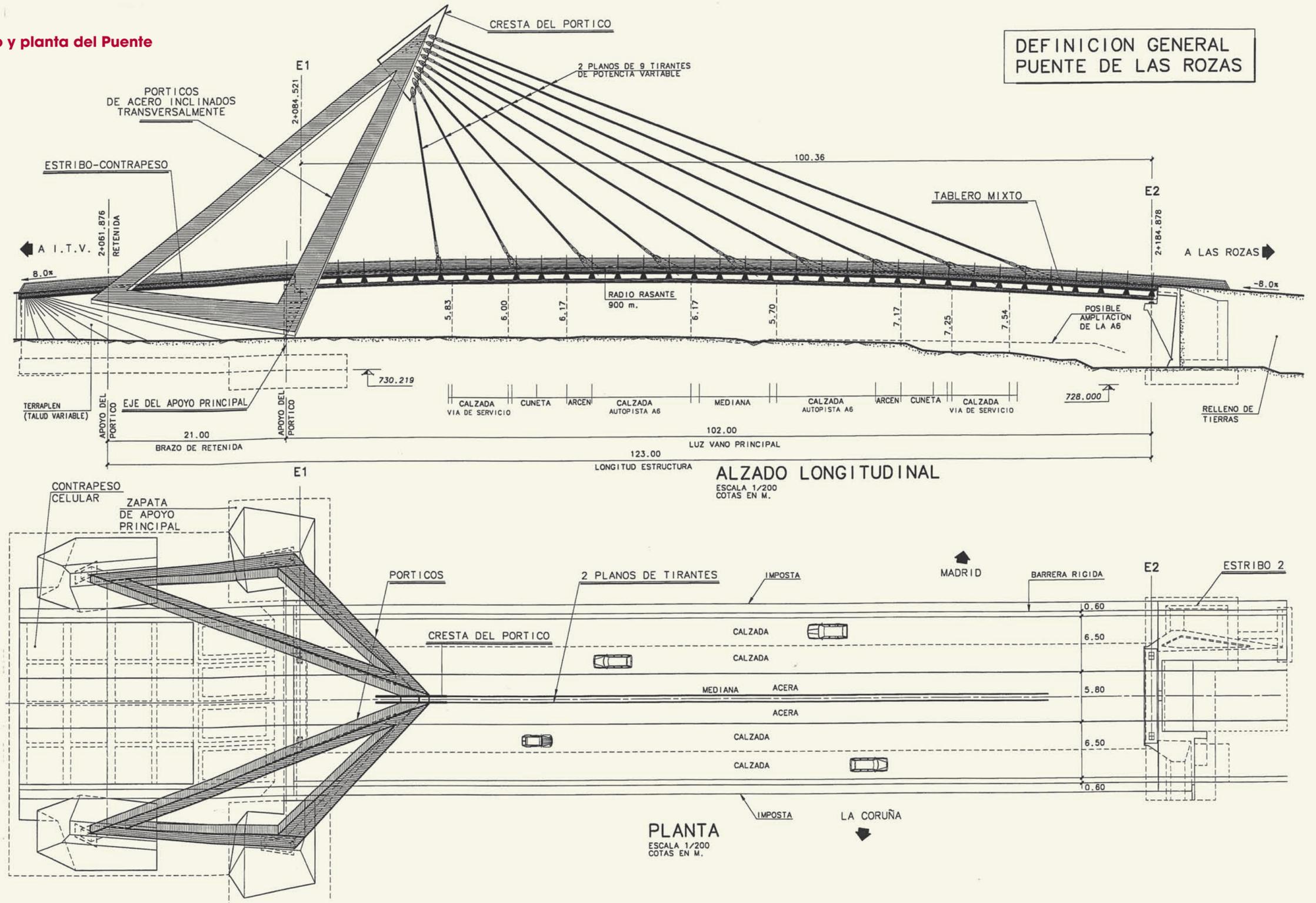


Foto 11. Izado nocturno del segundo tramo de tablero.

dad resistente y su rigidez reduciendo el espesor de chapas de forma importante. Para ello se disponen conectadores flexibles en toda la altura que aseguran la transmisión de fuerzas en la conexión acero-hormigón, y un potente conectador rígido en el punto alto de la sección mixta capaz de transmitir la compresión correspondiente a la sección de hormigón de forma localizada y poder contar con la sección completa a apenas un canto de la conexión.

El anclaje de cada uno de los tirantes rígidos al estribo debe ser capaz de transmitir el tiro de retenida que puede alcanzar los 6.000 Mp en estado límite último, para los que se disponen 50 barras pretensadas de 50 mm en la dirección del tirante. Hasta otras 50 barras pretensadas son necesarias para anclar la componente vertical en la zapata del contrapeso y zunchar transversalmente el macizo de an-

Alzado y planta del Puente





Fotos 12 y 13.
Montaje de la
estructura metálica
de tablero sobre
apeos provisionales.

claje de la retenida a los alzados inclinados del estribo que transmiten la componente horizontal del tiro.

El **estribo 1** sirve a la triple misión de dar apoyo al tablero, recoger las cargas de los apoyos de bielas y anclajes de retenida de los pórticos metálicos que conforman el mástil, y materializar el contrapeso que compensa el tiro vertical de los elementos de contrarresto. Para esto el estribo se configura como un gran cajón de paredes laterales inclinadas dividido en 20 células rectangulares. Las 16 células traseras con una dimensión aproximadamente cuadrada de 430 cm y una altura de más de 7 m se rellenan con terreno compactado sobre una gran losa de hormigón de 180 cm. El conjunto de elementos de hormigón y el peso de tierras permite hacer frente a un tiro total de hasta 12.000 Mp transmitiendo la carga del contrapeso a los puntos de anclaje de los tirantes de contrarresto. Las cuatro células frontales de mayor tamaño son sin embargo huecas buscando descargar el apoyo frontal de mástil y tablero. Al gran cajón mencionado se le adosan en los laterales zócalos de caras inclinadas para recibir los apoyos y anclajes del pórtico metálico, y en el frente un cuerpo central inclinado sobresale para recibir el apoyo del tablero, subrayándose las líneas horizontales por medio de rehundidos en este elemento frontal.

El otro **estribo, E2**, en la margen sur tiene que resolver la confluencia geométrica de la llegada de las rampas de acceso y salida adosadas y recibir el apoyo del tablero sin que su esviaje con respecto a la A-6 con un ancho superior a 20 m cree un volumen pesado y un punto duro en el diseño. La configuración del estribo se resuelve con un cuerpo central inclinado hacia el frente para recibir el apoyo de la estructura y voladizos laterales dando continuidad a los voladizos de tablero, que se prolongan de forma asimétrica hasta interrumpirse en su encuentro con las rampas adosadas. El resultado es un volumen que genera interesantes puntos de vista convirtiendo el esviaje en una ventaja en vez de un inconveniente de partida.

Proceso Constructivo

La ejecución de la estructura propiamente dicha corrió a cargo de Ferrovial y tuvo una duración de 12 meses, siendo superior el plazo total de las obras debido a la construcción de los viales y la urbanización asociada al proyecto de la estructura.

La ejecución comenzó con construcción de ambos **estribos**, teniendo en cuenta que el estribo E1 contiene en sí el apoyo y cimentación del mástil, así



Foto 14. Izado de una de las dos piezas del mástil desde posición horizontal.



Fotos 15 y 16. Apeo provisional del mástil durante el montaje.





Fotos 17 y 18. Tesado de cables desde el tablero.

como el anclaje de la retenida y el sistema de celdas del contrapeso. La cimentación en todos los casos es directa a más de 2 m de profundidad sobre la arena de miga compacta que se encuentra en el sustrato. El apoyo de cada una de las bielas del pórtico triangular se produce en una zapata cuadrada asociada al estribo de 12 m de lado, con el fondo levemente inclinado en dirección transversal para reducir la tracción que se produce en el frente del estribo a causa de la inclinación transversal de los pórticos triangulares. Una vez completo el sistema de celdas dentro del estribo se procedió a su relleno y compactación para conformar el cuerpo central del contrapeso.

De forma paralela, en taller metálico se desarrollaba la fabricación de los elementos que conforman el tablero. Para el **montaje de su estructura metálica** se previeron 5 planos de apoyo provisional formados cada uno por dos apeos metálicos de 1 m

de lado, disponiéndose estos en los espacios de mediana y tercianas de la A6, y también anexos a los viales de servicio, siendo 22,85 m la luz mayor entre apeos. El tablero se izó con grúa en cuatro tramos de 24 m con la sección completa incluyendo el cajón central, los voladizos e incluso la imposta metálica, que habían sido ensamblados y soldados previamente en la superficie anexa a los estribos. Para evitar cualquier afección a la A-6 los tramos de tablero se montaron de forma nocturna utilizando una grúa móvil de cadenas de 700 ton.

Una vez completo el montaje y unión mediante soldadura de los cuatro tramos de tablero metálico se procedió a la colocación de prelosas y al posterior armado y **hormigonado de la losa de tablero**, descansando el peso del tablero completo en esta fase sobre los 5 pares de apeos provisionales y los apoyos definitivos en estribos.



Fotos 19 y 20. Operaciones de tesado de cables.

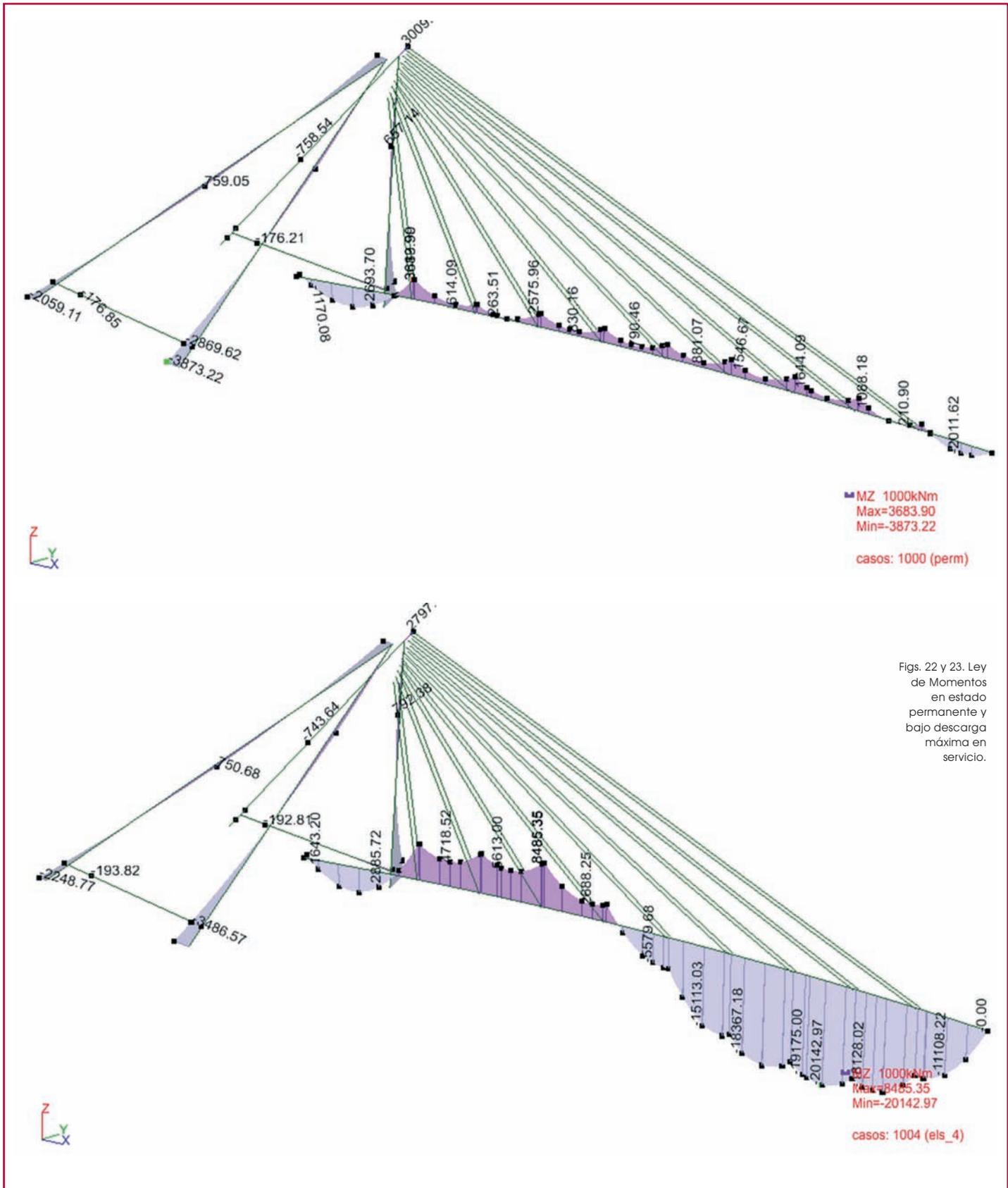


Foto 21.
Iluminación
nocturna de la
estructura.

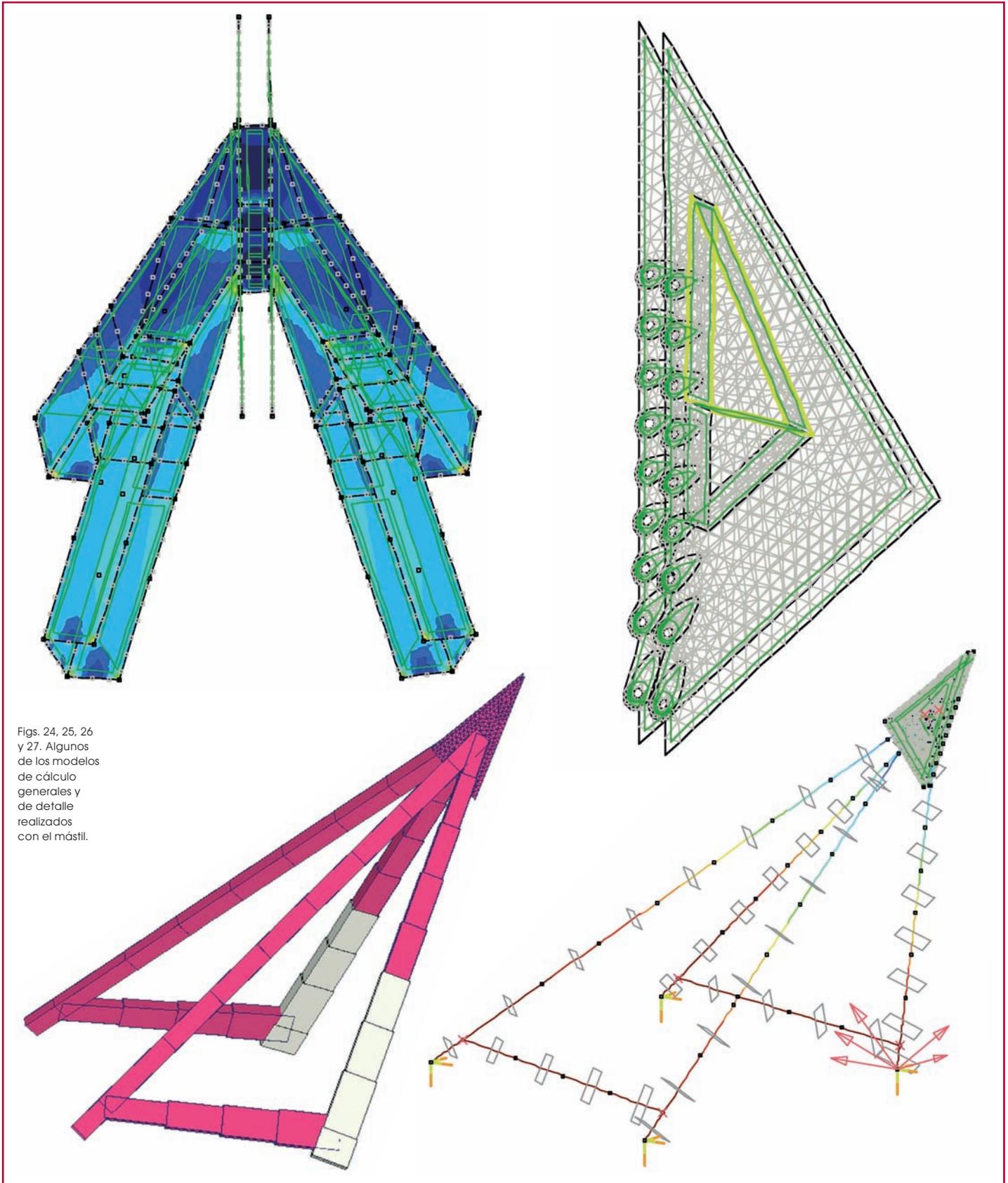
Las siguientes operaciones de la construcción tienen el objetivo de materializar los pórticos triangulares mediante el **izado del mástil**. Cada una de las dos partes que lo conforman, incluyendo una de las células triangulares y unos de los chapones superiores de cuelgue de tirantes, se ensambló y soldó sobre bancadas en los terrenos anexos a su situación definitiva. El izado de cada uno de estos "cartabones" con un peso de 250 ton se realizó en una sola operación de izado utilizando 3 grúas de gran tonelaje, en concreto una grúa de cadenas de 800 ton y dos grúas telescópicas de 400 y 250 ton. Si bien la grúa mayor tenía capacidad para tomar todo el peso de la pieza era necesario el uso de las otras dos grúas para izarla desde la posición horizontal y realizar los tres giros de abatimiento, ro-

tación e inclinación necesarios para llevarla a su posición definitiva.

Una vez izada cada una de las piezas necesitaba del apoyo vertical en un apeo provisional situado sobre el estribo para alcanzar la estabilidad debido a su inclinación transversal, a la espera de materializar la unión entre ambas piezas en el nudo superior que las hace autoestables. Los perfiles que permiten este apoyo son elementos provisionales que se eliminan una vez retirado el apeo. El apoyo se produce en una superficie horizontal con lámina de teflón para asegurar que la reacción es sólo vertical, realizándose a través de dos gatos de 150 ton, lo que permite desapear la pieza una vez materializada la unión en cabeza. La reacción en este punto alcanza prácticamente la totalidad del peso de la



Figs. 22 y 23. Ley de Momentos en estado permanente y bajo descarga máxima en servicio.



Figs. 24, 25, 26
y 27. Algunos
de los modelos
de cálculo
generales y
de detalle
realizados
con el mástil.

pieza izada por la proximidad del apeo al centro de gravedad de cada uno de estos elementos triangulares.

Las siguientes operaciones consisten en el montaje y **tesado de los tirantes**. Los 18 tirantes agrupados en 9 parejas tienen una longitud variable entre 20 y 75 m. Para su instalación es necesario el montaje de un andamio de trabajo para acceder a los anclajes superiores de tirantes y realizar de forma segura las operaciones de enfilado y sellado de los tirantes. El izado de cada uno de los tirantes requiere la colocación de un cable guía, el izado de la vaina general y el posterior enfilado cordón a cordón utilizando el cable guía. Durante las operaciones de enfilado, cada uno de los cordones se tesa con una fuerza inicial de una tonelada para asegurar el correcto funcionamiento de las cuñas de anclaje.

El **tesado de los tirantes** se realizó por medio de gatos unifilares siguiendo el procedimiento de isotensión. La fabricación y tesado de tirantes corrió a cargo de la empresa Tecpresa. En esta operación se utilizaron dos gatos unifilares y una única central de presión actuando sobre ellos de forma que se aseguraba aplicar siempre la misma carga a los dos tirantes de una misma pareja. El procedimiento de isotensión se realizó colocando una célula de carga al cable patrón cuyo valor se iguala en el tesado de cada cordón al valor de la célula de carga del gato unifilar, de forma que se consigue que la fuerza sea en todo momento la misma en todos los cordones e igual a la fuerza objetivo después de tesados todos los cordones que forman el tirante.

Para realizar la instrumentación del proceso de tesado se colocaron galgas extensométricas en la estructura metálica del mástil, en cuatro secciones en bielas del mástil y cuatro secciones en tirantes de retenida, así como en los apoyos de los apeos provisionales, y se mantuvieron las células de carga en los tirantes durante todo el proceso. La empresa encargada de la instrumentación fue Metiri, y la instalación realizada permitía un seguimiento on line de los valores medidos en tiempo real. Las medidas realizadas permitían controlar el valor de la descarga de los apeos y el momento en que se producía la descarga total de uno de ellos, así como también el seguimiento de esfuerzos en las chapas del mástil integrados a partir de las tensiones medidas en cada sección, de cara a compararlos con los esfuerzos esperados según el modelo teórico. De igual forma las

células de carga mantenidas durante todo el proceso permitían controlar la evolución de las cargas en tirantes durante el tesado de los otros tirantes comparándola con la esperada de acuerdo al procedimiento de tesado. El orden de tesado recogido en el procedimiento calculado por Arenas & Asociados se estableció de forma que no se produjera la sobrecarga de ninguno de los apeos ni tirantes durante ninguna de las fases del tesado. A medida que los tirantes entran en carga descargan los apeos provisionales hasta que en un momento avanzado del tesado el tablero se despega de estos apoyos provisionales para alcanzar una contraflecha de 9 cm suficiente para hacer frente a las cargas permanentes aplicadas en la siguiente fase. El resultado del tesado fue muy satisfactorio realizándose el proceso en una sola pasada de tirantes con desviaciones respecto a la carga objetivo menores del 3% como se comprobó en el pesaje final para la retirada de células de carga.

Una vez completa la estructura resistente del puente se aplica la **carga permanente** de la superestructura formada por el pavimento en calzadas, las barreras y barandillas y el pavimento de madera en aceras.

La última comprobación del correcto funcionamiento de la estructura tuvo lugar durante la **prueba de carga** llevada a cabo con distintas situaciones de carga sobre el tablero alcanzando el nivel del 60% de la sobrecarga de cálculo en servicio. El comportamiento de la estructura reflejado en las medidas de flechas en cada caso de carga fue muy satisfactorio, observándose deformaciones siempre por debajo de las esperadas, y del orden del 85% de las flechas teóricas para esos casos de carga.

Como parte fundamental de los acabados y del propio diseño cabe destacar la **iluminación** instalada que realza la estructura y permite disfrutar de ella durante la noche. La iluminación funcional de viales y acera en mediana se realiza por medio de luminarias encastradas en las barreras exteriores y en la barandilla peatonal evitando de esta forma tener que disponer báculos de luminarias sobre el tablero que tendrían un efecto negativo sobre la estética del conjunto. En este sentido se diseñó de forma expresa un pasamanos para la barandilla con una sección diamante capaz de albergar luminarias fluorescentes encastradas iluminando tanto la acera en mediana como la calzada. De igual forma se de-

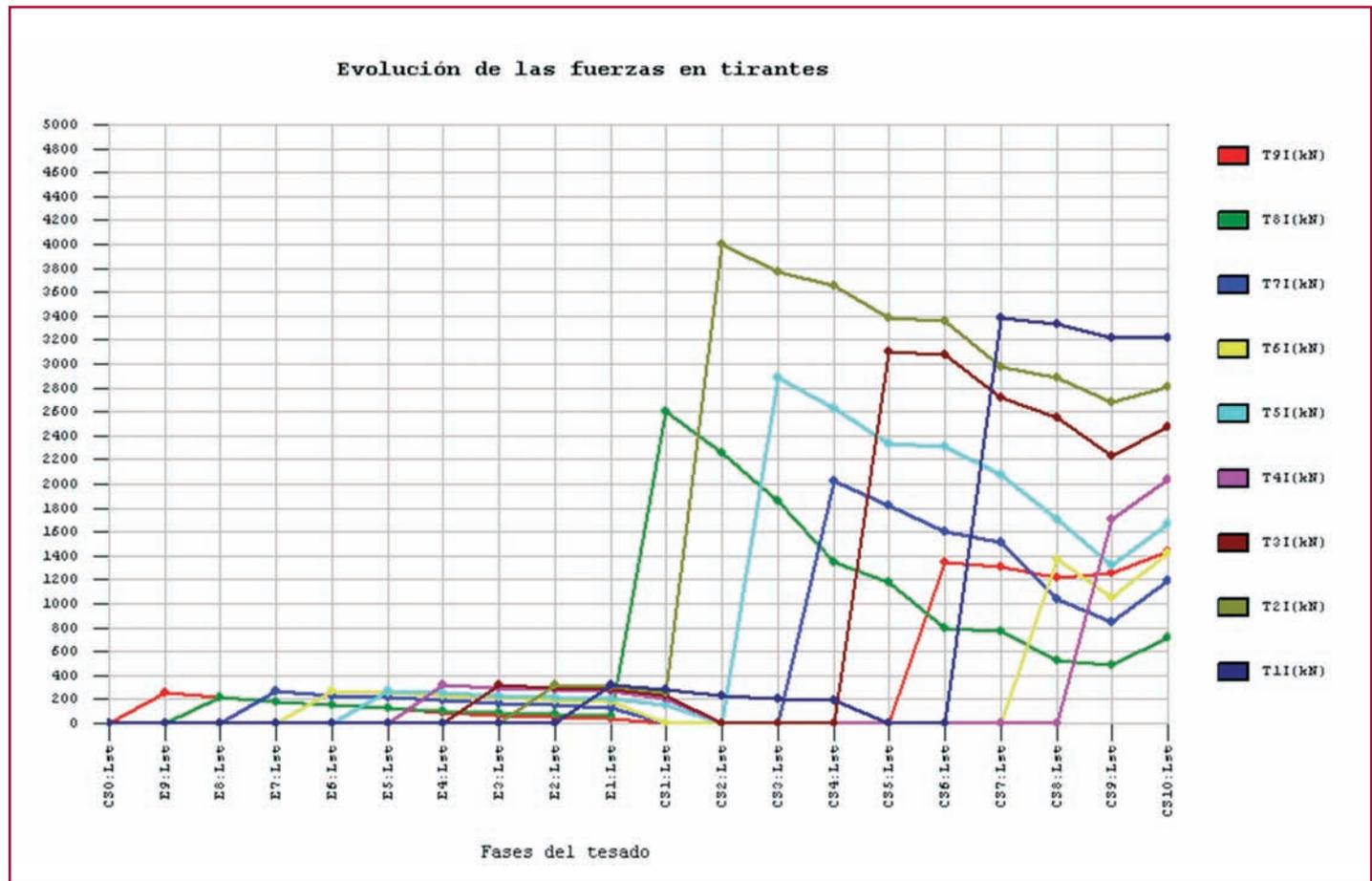


Fig. 28. Evolución de fuerzas en tirantes prevista en el Procedimiento de tesado.

terminó de forma cuidadosa la posición de los puntos de luz buscando iluminar tanto los planos de tirantes como el pórtico metálico del mástil, los estribos y tablero permitiendo una percepción global y harmónica del puente, tras las pertinentes pruebas de iluminación.

Cálculo estructural

Dentro del trabajo de cálculo y análisis estructural llevado a cabo durante el Proyecto y la asistencia técnica a la Dirección de Obra del Puente atirantado "Puerta de las Rozas" resaltamos el modelo global del puente en servicio, el cálculo evolutivo del tablero durante el proceso constructivo, los modelos globales y de detalle del mástil, así como el cálculo en fases realizado para determinar el procedimiento y fases de tesado.

El modelo global del puente y el cálculo evolutivo del tablero durante la ejecución y a lo largo de

su vida útil permiten realizar las comprobaciones normativas y asegurar el correcto funcionamiento de la estructura. Cabe destacar que la determinación del estado inicial de cargas de tirantes, de entre las múltiples soluciones posibles, parte de las condiciones impuestas sobre la deformada en estado permanente, limitada en el rango entre 0 y 1 cm positivos, y la búsqueda de los menores momentos sobre el tablero, manteniendo los valores de las cargas de tesado siempre por debajo de la carga admisible del tirante. Además, y para evitar momentos iniciales parásitos en el mástil, se ajustan las cargas de forma que su resultante pase por el centro de gravedad del nudo del mástil. En este sentido es muy importante la correcta evaluación de los pesos y rigideces reales de los elementos del tablero, pues pequeñas diferencias dan lugar a cambios sensibles, en especial en la deformada del tablero obtenida en el cálculo.

La comprobación del tablero en estado límite último requiere la reducción de la sección mixta esbelta

de acuerdo al método elastoplástico buscando obtener el momento último, aplicado a cada sección en análisis en el caso de momento positivo o negativo.

Para el cálculo del mástil se realiza un modelo global para la comprobación seccional en tensiones, y la comprobación de abolladura de las chapas comprimidas. Resulta necesario realizar modelos de detalle de elementos finitos en las zonas de concentración de cargas como en el caso del nudo superior, en el anclaje de retenida, el apoyo principal de la biela, y el conector rígido en la sección rellena de hormigón de la biela.

El análisis del procedimiento de tesado se realizó de acuerdo a un cálculo evolutivo por fases. Dicho cálculo se realiza a la inversa desde el estado final de tesado retirando cada uno de los tirantes y buscando obtener en cada caso la carga de tesado inicial del tirante. El cálculo evolutivo se realiza a continuación según el sentido de avance del proceso de ejecución para realizar los ajustes necesarios en las cargas teniendo en cuenta las condiciones de contorno de los apoyos provisionales que se eliminan del modelo tan pronto se descargan por completo. Las fases resultan-

tes, que se corresponden de forma realista con lo ejecutado en obra, permiten conocer todos los parámetros a nivel de esfuerzos, reacciones y cargas de tirantes en cada una de las fases del proceso. Esto se ha podido comprobar en obra a través de la instrumentación de la estructura, siendo el resultado obtenido en todos los casos que la precisión del cálculo era siempre muy alta, y por lo general superior a la de la propia instrumentación.

De igual forma las especiales condiciones de los estribos debidas a su geometría, y a las singulares casos de carga actuantes en el caso del estribo contrapeso que reciben los esfuerzos de los pórticos metálicos así como del tablero, requieren el desarrollo de modelos de cálculo detallados con elementos finitos superficiales fieles a la geometría de proyecto.

Conclusiones

A la vista del resultado construido pensamos que nuestras reflexiones durante el encaje se han visto refrendadas por la correcta integración del puente

Fig 29. Modelo de cálculo del estribo 1 de contrapeso.

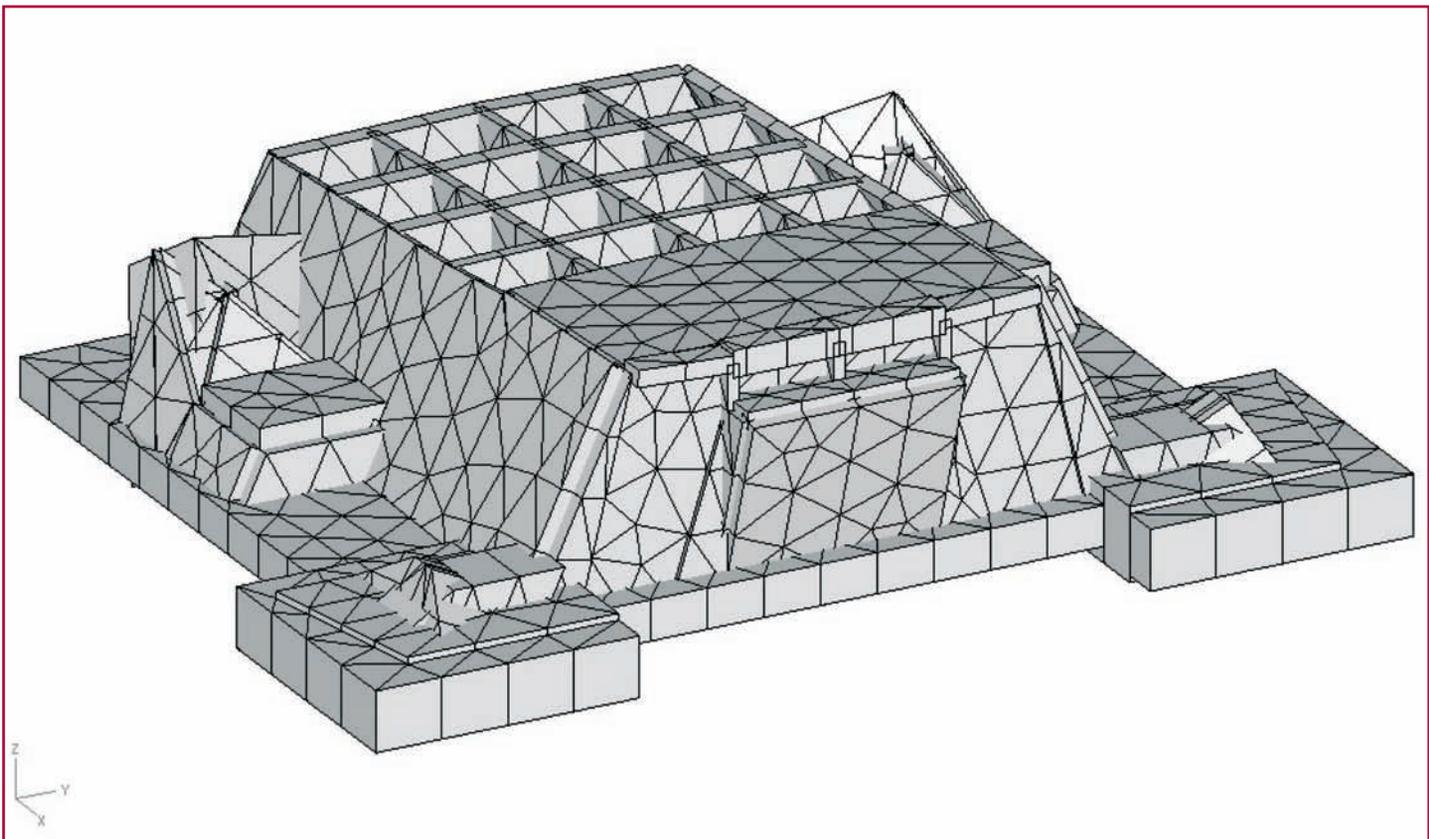




Foto 30. Vista del puente terminado tras su apertura al tráfico.

en su entorno, logrando constituir el hito simbólico deseado de puerta de entrada a las Rozas. Las formas, simples pero llenas de potencia de los triángulos que conforman el mástil, que son percibidas por el usuario de la autovía, así como los pórticos de entrada a las Rozas que configuran en la otra dirección los planos inclinados coronados por la cuña de anclaje para los que cruzan la estructura, hacen de esta propuesta una imagen reconocible que los usuarios podrán asociar a la ciudad de Las Rozas. Y gracias a los estándares de calidad aplicados durante el proyecto y la ejecución y las medidas de protección adoptadas en este puente atirantado, deberá seguir siéndolo en un futuro lejano.

Por otro lado es necesario resaltar que este resultado, del que estamos orgullosos, no es en ningún

caso casual sino que es el fruto de casi tres años de intenso trabajo en las distintas fases de concurso, proyecto y ejecución, y que implica a un gran número de profesionales y empresas, así como a la administración del Ayuntamiento de las Rozas sin cuyo entusiasmo este proyecto no hubiera sido posible, y es precisamente por ello que queremos dejar patente desde aquí nuestro agradecimiento y reconocimiento para todos ellos. ♦

Propiedad: Ayuntamiento de las Rozas de Madrid

Proyecto de Estructura: Arenas & Asociados. J. J. Arenas, G. Capellán y Javier Martínez

Contratista: Ferroviál-Agroman, Roberto Carrasco

Dirección de Obra: Idom-Arenas & Asociados. Pascual García Arias (Idom)

Fecha fin de Ejecución: Junio de 2007