

# PUENTE ARCO SOBRE EL RÍO GUADALQUIVIR EN PALMA DEL RÍO

**Francisco MILLANES MATO**

Dr. Ingeniero de Caminos

IDEAM S.A.

Presidente

general@ideam.es

**Miguel ORTEGA CORNEJO**

Ingeniero de Caminos

IDEAM S.A.

Jefe de Proyectos

miguel.ortega@ideam.es

**Antonio CARNERERO RUIZ**

Dr. Ingeniero de Caminos

## Resumen

El nuevo Puente Arco sobre el río Guadalquivir se encuentra en la nueva variante de Palma del Río (Córdoba) recientemente construida por GIASA. El proyecto debía plantear una solución singular sobre el río Gadalquivir, priorizando, la estética e integración paisajística de la solución. La propuesta de IDEAM que resultó seleccionada contemplaba un puente arco metálico atirantado (tipo bowstring) de 130 m de luz con un tablero inferior mixto.

La estructura portante principal está constituida por dos arcos atirantados inclinados laterales en perfiles tubulares de acero S355-J2G3, de 90 cm de diámetro, tanto para el arco como para el tirante, y espesores de chapa máximos de 50 mm en los arranques de los arcos. La extrema esbeltez de arco y tirantes ( $C/L = 1/144.4$ ) se consigue gracias a un sistema de péndolas inclinadas con múltiples cruces y cables cerrados, tipo Network que minimiza drásticamente las flexiones en arco y tirante así como los efectos del pandeo en el arco.

Los múltiples cruces entre péndolas se resolvieron con un original dispositivo que permitía ordenar el esquema de cables y minimizar el impacto visual de los citados cruces.

**Palabras Clave:** Puente arco, bowstring, metal, péndolas en sistema Network, dispositivos de cruce de péndolas, viaducto de acceso, autocimbra.

## 1. Descripción de las estructuras del tramo

Las principales estructuras que se incluyen dentro de la actuación de la nueva variante de Palma del Río son las siguientes (Fig. 1):

- Glorieta de enlace de la N-431 con la N-453
- Viaducto de acceso Norte
- Puente arco sobre el Río Guadalquivir
- Viaducto de acceso Sur

La glorieta son dos losas curvas isostáticas postesadas de canto constante, y el viaducto de acceso norte cruza sobre el ferrocarril mediante un tramo de dos vanos isostáticos constituido por un tablero prefabricado con dos artesas, prelosas prefabricadas resistentes de hormigón y losa superior "in situ".

Las dos estructuras principales de la actuación son el Puente arco sobre el río Guadalquivir, objeto central de este artículo, y el Viaducto de acceso Sur, del cual se realizará una breve descripción.

## 2. El Viaducto de Acceso Sur

El Viaducto de acceso Sur se sitúa a continuación del Puente arco que salva el río siguiendo el sentido creciente de los PKs. Se trata de un viaducto continuo de 436 m dividido en catorce vanos de longitudes 26+12 x 32+26, realizado mediante una losa postesada ejecutada con autocimbra autolanzable. Este viaducto se encuentra localizado en toda la llanura de inundación del río Guadalquivir, viniendo gobernada su longitud total por este motivo (Fig. 1).



*Fig. 1: Vista aérea en primer plano del Viaducto de acceso Sur, del Puente arco, del Viaducto de acceso Norte y de la glorieta.*

La anchura total del puente es de 11 m, dividida en dos carriles de 3.5 m, dos arcenes de 1.5 m y dos barreras laterales de 0.5 m. El diseño del puente se ha realizado pensando en su futura ampliación hasta 16 m, anchura que es la que posee el Puente arco sobre el río, y con la que quedaría una distribución final en 4 carriles centrales de 3.5 m, dos arcenes de 0.5 m, y dos barreras laterales de 0.5 m cada una.

La posible futura ampliación del viaducto de acceso sur se realizará mediante la ampliación de los voladizos por medio de costillas metálicas laterales cada 5 m, que se empalman en unas placas debidamente diseñadas en los extremos de la losa del tablero y el posterior hormigonado de una losa superior de 0.25 m de espesor para materializar la plataforma, resultando una sección transversal igual a la del Viaducto de acceso Norte, y el Puente arco, los cuales si se ejecuta directamente con el ancho de 16 m. En este caso, y a diferencia del otro viaducto de acceso, la longitud elevada del puente y la posibilidad de llevar a cabo en el futuro la ampliación de la calzada sin excesivas complicaciones, fueron la clave para decantarse por la solución de calzada no ampliada.

La losa del tablero queda dividida en dos nervios simétricos de 4.5 m de ancho, y unidos entre sí mediante una losa intermedia de 2 m de anchura y de espesor variable: 0.25 m en su unión con los nervios y 0.27 m en el punto central del tablero de puente (Fig. 2a).

El fondo de la losa de hormigón es curvo, de radio 60 m. El canto máximo de la losa es de 1.5 m, medido en el eje del tablero, lo que hace que en los vanos centrales tipo de 32 m la relación luz / canto sea de 21.6, aunque al ir reduciéndose el canto a medida que nos alejamos del eje de la sección debido a la forma curva del fondo, hace que el canto medio sea del orden de 1.30 m y la relación luz / canto pase a ser de 24.6.

El interior de los dos nervios se encuentra aligerado mediante la colocación de cuatro piezas de porexpan en cada nervio, que recorren la totalidad de la estructura excepto la zona de los mamparos de apoyo sobre pilas y estribo. El hormigón de la losa es HP-35.

En las secciones de apoyo sobre estribo y pilas, el hueco interior de separación entre los dos nervios se maciza para lograr una viga riostra transversal que permita transmitir todos los esfuerzos de la sección a los aparatos de apoyo.

El pretensado de la sección está formado por 10 tendones, cinco por nervio, formado cada uno de ellos por 24 torones de 0.6 " de acero activo de resistencia a rotura superior a 19000 kg/cm<sup>2</sup> y límite elástico superior a 17100 kg/cm<sup>2</sup>.

El trazado del pretensado a lo largo del puente es prácticamente parabólico. Dado que el puente se ejecuta vano a vano, en cada fase tipo el pretensado parte del anclaje activo de la fase anterior situada a una distancia de 6.4 m del eje de pila, donde se dispone un acoplador y acaba en el frente del voladizo de la nueva fase, desde donde se realiza el

tesado de todos los tendones. El recorrido de los tendones en alzado es común, adaptándose cada uno de ellos al canto de la sección longitudinal del puente en la que se encuentran situados.



*Fig. 2a y 2b: Vistas durante la ejecución del viaducto de acceso sur con autocimbra*

El sistema de aparatos de apoyo del puente ha venido condicionado por dos factores adicionales a las cargas verticales: en primer lugar, por los movimientos que experimenta el tablero por efectos reológicos y térmicos como consecuencia de la elevada longitud del Viaducto, 436 m, y en segundo lugar, por la necesidad de recoger las fuerzas horizontales, y muy en concreto las fuerzas generadas por la masa del tablero en la hipótesis de que se presente un sismo. De acuerdo con el primer factor se han dispuesto aparatos de apoyo de neopreno teflón en las pilas extremas P-5, P-6, P-7, P-15, P-16 y P-17, que son las que soportan mayores movimientos, y aparatos de apoyo de neopreno zunchado en las 7 pilas centrales P-8 a P-14. Con respecto a las fuerzas sísmicas, en sentido longitudinal al puente quedan recogidas por las pilas centrales a través de sus aparatos de apoyo, mientras que quedan libres frente a esas fuerzas las pilas que presentan teflones. En sentido transversal, las fuerzas sísmicas procedentes del tablero pasan a las pilas mediante topes trasnversales incorporados en todos los aparatos de apoyo.

La ejecución del tablero del puente se realizó siguiendo el proceso constructivo planteado en el proyecto mediante el procedimiento de vano a vano sobre autocimbra, ya que la longitud del puente hacía posible la amortización de la autocimbra, existiendo además en el mercado español, bastantes autocimbras que permitían la construcción de un puente como este, con luces y anchuras moderadas (Figs. 2a y 2b).

### **3. El Puente arco sobre el río Guadalquivir**

La condición básica de salvar el río Guadalquivir sin colocar pilas dentro del cauce, obligaba a plantear soluciones de luces en el tramo principal del puente entre 120 y 140 m. Bajo esta condición, dos fueron los factores principales que condicionaron el posicionamiento del puente.

El primero de ellos, fue el tratar de mantener el puente centrado respecto el cauce. Esta condición, que a priori parece evidente, no lo es si tenemos en cuenta que el perfil de las márgenes derecha e izquierda del río son muy diferentes. Mientras que el margen derecho (lado norte) presenta unas pendientes pronunciadas con una variación de altura de unos 10 m en 25 m de longitud, el margen izquierdo (lado sur) tiene pendientes muy suaves que ganan lentamente altura a medida que nos alejamos del río y penetramos en la vega. Resulta imposible realizar un encaje simétrico del puente respecto el río para todas las posibles cotas de agua, por lo que se trató de encajar la solución para el nivel de aguas medias.

La segunda condición venía impuesta por la elevada altura que presenta la rasante en su cruce sobre el río por la necesidad de salvar el cruce con la carretera N-431 y con las vías de ferrocarril, con gálibo suficiente, y que determinan un valor medio de altura de pilas de aproximadamente 20 m. Dado que las características geotécnicas del terreno no son buenas, y que nos encontramos en una zona donde es necesario considerar los efectos derivados de las acciones sísmicas, resultaba muy conveniente reducir la altura de las pilas al máximo posible para no encarecer el coste de éstas y sus cimentaciones. Aprovechando que la margen derecha del río gana rápidamente altura, se desplazó ligeramente el

vano central hacia este lado con el fin de disminuir la altura de la pila de apoyo en este punto y materializar en ella, el punto fijo frente a movimientos horizontales del tablero.



*Fig. 3: Vista aérea del Puente Arco sobre el río Guadalquivir*

La tipología escogida para el tramo central fue la de doble arco simétrico con 130 m de luz, situando cada arco en un plano inclinado  $68.8^\circ$  respecto de la vertical y apoyados entre sí en clave (Fig. 3). Con esta solución se perseguía a la vez que dotar a la estructura de un especial dinamismo y originalidad, reducir la longitud de pandeo de cada uno de los arcos disponiendo el menor número de arriostramientos transversales entre ellos.

El funcionamiento estructural [1] es completamente similar al de un arco situado en un plano vertical, con un único efecto añadido en los extremos, donde es necesario equilibrar la componente de fuerza horizontal en sentido transversal al eje del puente que genera la inclinación de los arcos.

### 3.1 Arcos

Como sección transversal para los arcos (Fig. 4a), se optó por perfiles tubulares de sección constante y 90 cm de diámetro buscando la mayor sencillez de formas a la vez que de fabricación. Estos tubos se encuentran directamente en el mercado, siendo necesario realizar exclusivamente un proceso de curvado para darles la geometría prevista, con lo que el número de operaciones de fabricación es mínima y la longitud a soldar también.

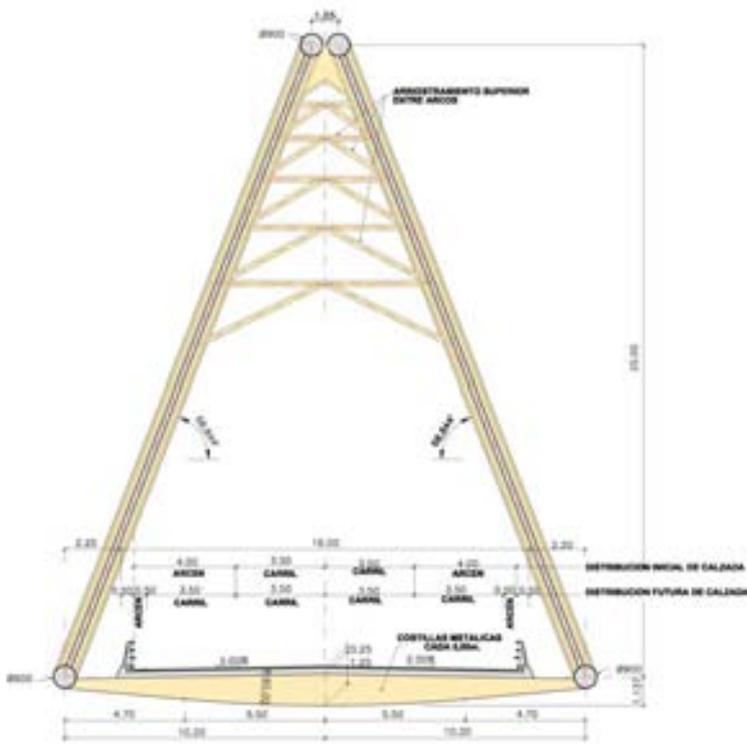
La directriz que se planteó fue parabólica, antifunicular de las cargas permanentes en el arco, con una flecha en clave de 25 m, con lo que la relación flecha – luz es de 1/5,2 (Figs. 4a y 4b).

Uniéndolos entre sí, se dispuso una celosía en “K” formada por perfiles tubulares, igual que en el arco, y que permitían acotar la longitud de pandeo de los arcos (Fig. 4b).

### 3.2 Tablero

El tablero del puente de 16 m de ancho está formado por una losa de 0.25 m de espesor constante, con inclinación del 2% hacia ambos bordes de la calzada. Esta losa se ejecuta en dos partes. La primera, formada por una prelosa prefabricada que se coloca apoyada sobre las vigas transversales que existen cada 5 m, y que sirve como encofrado perdido para la ejecución del resto de la losa del tablero. La segunda, se materializa al colocar la ferralla correspondiente y verter hormigón “in situ” sobre la primera hasta completar el espesor total.

La losa del puente se apoya sobre las vigas transversales metálicas situadas cada 5 m. Estas vigas tienen una luz total de 20.4 m (Fig. 3a), y se apoyan en los tirantes tubulares laterales que discurren de extremo a extremo del puente. En los mismos puntos de apoyo de las vigas transversales se disponen los puntos de anclaje de las péndolas (Figs. 5a y 5b) que unen el tablero con los arcos superiores. De esta forma, los tirantes laterales, no se ven sometidos a los efectos de las cargas puntuales que actúan sobre el tablero.



*Figs. 4a y 4b: Sección transversal y vista aérea frontal*



*Figs. 5a y 5b: Detalles de anclajes de péndolas inferiores y arranques de vigas trasnversales dispuestas cada 5 m en el tablero*

Las vigas transversales (Fig. 6) tienen canto variable, siguiendo el fondo de la viga una curva circular de radio 60 m en su parte central, y con variación lineal en el resto, coincidente con la geometría empleada en las secciones de los

viaductos de acceso, y con un canto máximo en el centro de la sección de 1.25 m. La sección transversal tiene forma de doble "T".

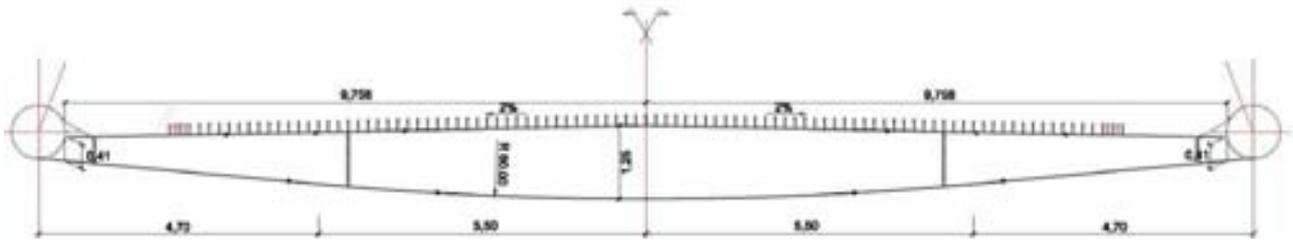


Fig. 6: Detalle de una viga transversal tipo del tablero situada cada 5 m.

En la platabanda superior de la viga, se disponen los conectadores necesarios para vincularla al hormigón de la losa superior, constituyendo transversalmente una viga mixta.

A 10.2 m del eje de la sección, se sitúan dos tubos metálicos laterales, los tirantes, de 90 cm de diámetro y de longitud igual a la de la luz del puente, 130 m, en donde se apoyan las vigas transversales y en donde se realiza la unión de las péndolas de cuelgue del tablero.

La misión de estos tirantes es principalmente la de servir de tirante de tracción al arco, equilibrando la componente horizontal de la carga de los arcos en los extremos y evitando la transmisión de cargas horizontales a la cimentación, además de la ya reseñada de servir de punto de apoyo a las vigas transversales.

En el punto de unión de los arcos con los tirantes laterales del tablero, se dispone la riostra transversal de apoyo, con una geometría similar a la de las vigas transversales, la cual debe recoger la componente horizontal transversal generada debido a la inclinación de los arcos, y que constituye un punto básico de la estructura para garantizar el equilibrio del conjunto.

Dado que la inercia a flexión de los tirantes es reducida, apenas si tienen capacidad para recoger flexiones, obligando a que este trabajo se realice mediante la transmisión de cargas al arco.

El acero empleado en las vigas del tablero así como en los tubos de los arcos y tirantes es S 355 J2G3.

### 3.3 Péndolas

Las péndolas actúan como elemento de unión entre el tablero y el arco, transmitiendo las cargas del primero al segundo. La disposición de las péndolas es en celosía o malla triangulada tipo Network [1], existiendo dos planos de péndolas, cada uno de los cuales parte de uno de los tubos laterales del tablero hasta el arco correspondiente.

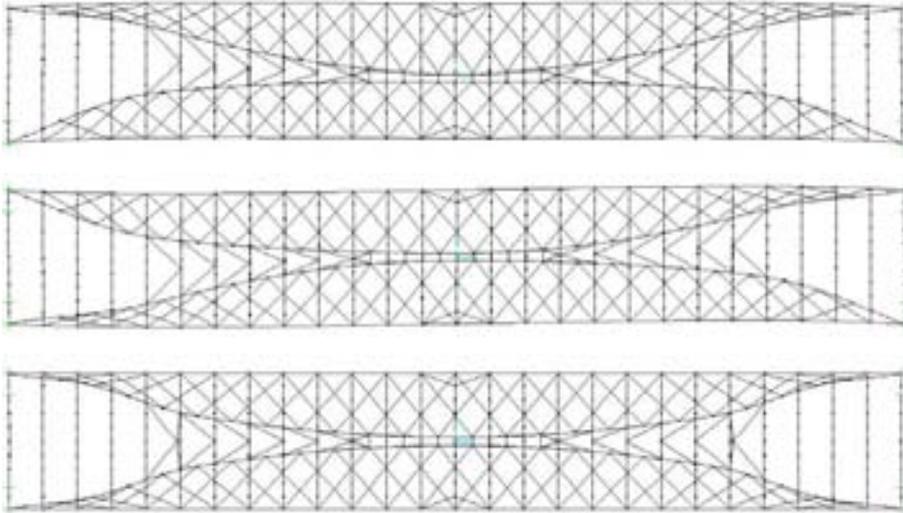
Los puntos de anclajes inferiores se sitúan cada 5 m, sobre los tubos laterales, y de cada punto parten dos péndolas hasta su encuentro con el arco, también con la cadencia de 5 m.

El sistema de péndolas con múltiples cruces en la tipología Network, hace que el puente se comporte como una gran viga de canto igual a la flecha de los arcos con capacidad para transmitir cortantes, además de reducir los momentos flectores en arco y tablero para las hipótesis de carga en medio vano, frente a los que se obtendrían en una solución de péndolas verticales. Además, con esta disposición se logra una gran capacidad de reparto de las acciones de las cargas puntuales, reduciendo las flexiones sobre el tablero al mínimo.

Por otra parte, al aumentar el número de péndolas permite la colocación de unidades de pequeño tamaño, más fáciles de disponer y colocar.

La distancia entre anclajes de tirantes es reducida, 5 m, con lo que se conseguían múltiples objetivos:

- Reducir la longitud de pandeo de los arcos (Fig. 7).
- Reducir los esfuerzos flectores en el tablero.
- Simplificar las uniones arco – tirante y tablero – tirante al emplear unidades de pequeño tamaño.
- Lograr una gran eficacia en el reparto de las cargas puntuales en el tablero.



*Fig. 7: Vista en planta de los tres primeros modos de pandeo fuera del plano de los arcos*

#### **4. Proceso constructivo**

El material que se propuso para la realización del puente es el acero. Para los arcos, si bien como primera idea se podría pensar en el hormigón, dado que los esfuerzos predominantes son de compresión, analizando el proceso constructivo se observó que se obtienen grandes ventajas del empleo del metal, cuyo montaje se puede realizar mediante la división de la longitud completa del arco en tramos y su posterior montaje y unión en obra mediante elementos auxiliares de relativa sencillez y en plazos más reducidos que la solución de hormigón.

El empleo del metal como material predominante permite asimismo, reducir las reacciones sobre las cimentaciones y abaratar el coste de éstas.

En primer lugar se realizarán las cimentaciones profundas mediante pilotes de 1.5 m de diámetro, los encepados y los alzados de pilas.

Para poder realizar el montaje de la estructura metálica es necesario ejecutar sendas penínsulas artificiales en ambas márgenes del río, que permitan la colocación sobre ellas de apeos provisionales para realizar el montaje de la estructura metálica (Fig. 8). La cimentación de los apeos se pilotó para evitar las posibles socavaciones que pudieran acaecer por crecidas del río durante el proceso constructivo.



*Fig. 8: Vista de las penínsulas artificiales y de las labores de ensamblaje de la estructura metálica del tablero*

El montaje de la estructura metálica comienza por la soldadura en obra de las vigas transversales a los tubos laterales del tablero (Fig. 8), hasta completar los tramos a izar, y el posterior izado mediante grúas hasta completar la totalidad del tablero (Fig. 9a y 9b).



*Figs. 9a y 9b: Izado de un tramo de tablero y vista del tablero metálico del puente concluido y apeado*

Una vez finalizado el montaje del metal del tablero, se procede a montar los arcos, para lo cual se disponen 4 apeos dobles que servirán de apoyo temporal a los arcos superiores. A la vez a pie de obra se sueldan los arriostramientos transversales entre arcos. Una vez completadas estas operaciones, se izan mediante grúas cada uno de los tramos de los arcos, apoyándolos sobre los apeos (Figs. 10a y 10b).

Por último, se realiza la soldadura entre los tramos de los arcos y en los extremos al tablero y se desaparecen completamente los arcos, dejando la estructura metálica del tablero todavía apeada.

A continuación se colocan todas las péndolas uniendo el tablero con los arcos y se realiza la puesta en carga siguiendo el proceso de tesado definido en el proyecto. Completada esta fase, el tablero queda suspendido por las péndolas y ya se pueden retirar los apeos inferiores al ser la estructura metálica autorresistente.



*Figs. 10a y 10b: Vista durante las operaciones de izado de los arcos, y fase de cierre en clave de los arcos*

Con el tablero sustentado ya por las péndolas, se procede a la colocación mediante grúa de las prelasas del tablero (Fig. 11a), al ferrallado del tablero (Fig. 11b) y al hormigonado en una sola fase de la totalidad del tablero.

Para finalizar, se realizan los ajustes finales en las tensiones de las péndolas junto con las labores de acabado (colocación de imposta y barrera, impermeabilización, pavimentación y colocación de juntas) y la prueba de carga.



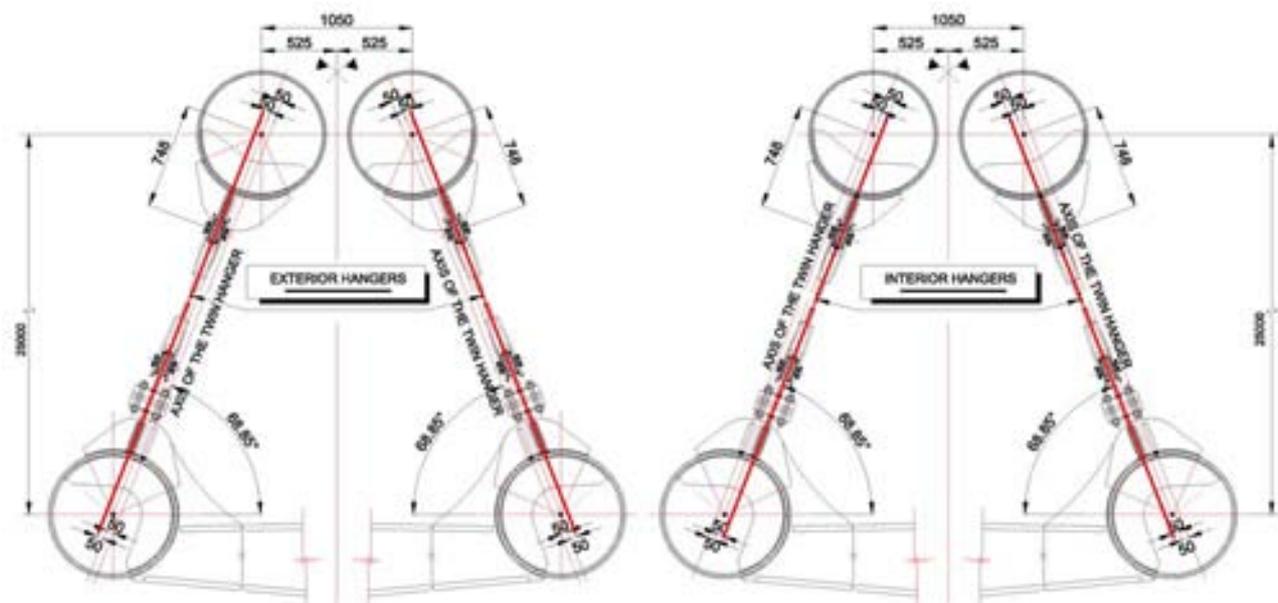
*Figs. 11a y 11b: Vista durante las operaciones de colocación de prelasas en el tablero y con el tablero ferrallado.*

## 5. Detalles de los dispositivos de cruce de péndolas

El proyecto puso especial énfasis en el diseño, simple y ordenado, de las uniones entre péndolas y secciones tubulares de arco y titante, de gran impacto visual, con detalles que, al mismo tiempo, conjugaban la facilidad constructiva y la eficacia resistente.

Las péndolas del Puente son cables cerrados de 45, 40, o 37 mm de diámetro formando una malla inclinada por cada arco con múltiples cruces en la tipología Network. Cada una de las mallas se encuentra en dos planos diferentes cada uno de ellos con una ligera excentricidad de 50 mm respecto del plano del arco (Fig. 12), por lo cual las péndolas se cruzan pero no se cortan. En el punto de cruce de dos péndolas se coloca un dispositivo formado por tres piezas que permite el libre giro de una respecto de la otra (Figs. 13a y 13b).

En los extremos de cada péndola se dispone una rótula con un terminal a modo de horquilla que permite el libre giro del cable, tanto en su unión con los arcos, como con su unión con los tirantes del tablero.



*Fig. 12: Esquema de péndolas en dos planos paralelos con 50 mm de excentricidad en cada arco.*



*Figs. 13a y 13b: Detalle de péndolas en dos planos paralelos con los dispositivos de cruce de péndolas*

## 6. Principales participantes en el proyecto

Propiedad: GIASA

Proyecto: UTE IDEAM-Narval. Francisco Millanes, Antonio Carnerero.

Dirección de Obra: UTE IDEAM-Narval. Francisco Millanes, Miguel Ortega, Antonio Carnerero, Jesús Martín

Constructor: FCC Construcción S.A.

Servicios Técnicos de FCC: Jose A. Martínez Salcedo, Ignacio Gongalez Esteban, Ignacio Pita, David Arribas

Taller Metálico: Megusa

Tesado de Péndolas: B.B.R.

## 7. Referencias

- [1] MILLANES F., ORTEGA M., CARNERERO A., " Project of two metal arch bridges with tubular elements and network suspension system". *Steelbridges: Advanced Solucitions & Technologies Conference Proceedings. 7th International Conference on Steel Bridges.* pp. II-88 a II-96. Published by: ECCS-European Convenrtion for Constructiuon SteelWork.