

# PASARELA COLGANTE SOBRE EL RÍO TAJO EN TOLEDO

**Ramón Sánchez de León**

Ingeniero de Caminos

ESTUDIO AIA

Ingeniero

rsanchezdeleon@estudioaia.com

**Christian Bernal Pérez**

Ingeniero de Caminos

ESTUDIO AIA

Ingeniero

cbernal@estudioaia.com

## Resumen

La Pasarela Colgante de la Fábrica de Armas de Toledo se enmarca en una actuación general de recuperación y adecuación de las riberas del río Tajo, y se sitúa junto a la antigua Fábrica de Armas reconvertida actualmente en Universidad. El reto era configurar una estructura respetuosa y perfectamente enmarcada en el lugar, teniendo presente que sería visible desde gran parte de la ciudad de Toledo, Patrimonio Histórico de la Humanidad por la UNESCO.

Con estos condicionantes se proyecta una pasarela colgante de 105 m de longitud que permite cruzar el cauce sin pilas. El tablero tiene una anchura entre ejes de cables de 9 m, disponiendo el tramo transitable de 6 m. La sección del tablero se resuelve con un cajón metálico, una losa superior de hormigón y costillas transversales cada 3 m. El sistema de suspensión se formaliza mediante 2 cables principales anclados a 2 pares de pilonos de altura 22 m. Desde los cables principales se disponen péndolas hasta el tablero cada 3 m.

**Palabras Clave:** Cable principal, péndola, pilono, anclajes al terreno, tubo de retenida, abrazaderas.

## 1. Introducción

La Pasarela Colgante de la Fábrica de Armas de Toledo conecta ambos márgenes del río Tajo junto la antigua Fábrica de Armas, convertida en Universidad. La estructura se ubica en el mismo lugar donde existía una antigua pasarela colgante que fue arrastrada por una riada en los primeros años del siglo XX. De esta manera la nueva pasarela conjuga el respeto por la historia y el entorno privilegiado donde se ubica.

La estructura proyectada consiste en un puente colgante de 105 mts de luz y una anchura libre de tablero de 6.00 mts. Se proyectan cuatro pilonos metálicos de acero y un tablero de un metro de canto, compuesto por una sección cajón rectangular con unas costillas transversales metálicas y una losa de hormigón de 12 cms de canto, este tablero se suspende de los cables principales mediante péndolas conectadas a las costillas transversales.

Los hormigones utilizados son de tono ocre en consonancia con los edificios del entorno.

Las principales ventajas que presenta la solución adoptada son las siguientes:

- Fiel a los antecedentes históricos de Toledo.
- Mínima afección al hábitat natural del río Tajo al **no necesitar penínsulas artificiales** y no disponer pilas intermedias.
- Muy buena integración en el entorno al ser un elemento muy liviano que no incide en las vistas y perspectivas de Toledo, huyendo de diseños másicos.
- Facilidad del proceso constructivo, fuera del cauce del río, como se verá posteriormente.
- Utilización de elementos prefabricados ( pilonos y vigas de acero con losas de hormigón ) que permiten reducir tiempo de ejecución al solaparse ejecución de cimentaciones y trabajos en taller.
- Cumple con el espíritu general de la Universidad en la recuperación de la Fábrica de Armas de mantener la imagen original.

## 2. Cables

Los cables principales son cables cerrados de 84 mm de diámetro con la capa exterior en Z con una sección de 4805 mm<sup>2</sup> y una carga de rotura del cable de 7045 kN, con una limitación de carga en servicio del 42% de la carga de rotura. El cable se une a los pilonos mediante un bulón de 178 mm de diámetro. El axil máximo en servicio de cada uno de los cables principales es de 2850 kN. La longitud total de cada cable es de 100.158 m medida entre distancia entre bulones.

Las péndolas son los elementos de suspensión del tablero, se disponen por parejas cada 3.00 mts y están formadas por un cable cerrado de 16 mm de diámetro exterior, con una sección de 157 mm<sup>2</sup> y una carga de rotura de 240 kN. Estos cables de suspensión se anclan en unas costillas del tablero y en los cables centrales, mediante bulones de 31 mm de diámetro. Se colocan un total de 64 péndolas en todo el tablero.



*Fig. 1 Puente terminado con los cable principales en primer término.*

Los cables principales quedan anclados en cabeza de pilonos. Para compensar los esfuerzos horizontales se disponen tubos de retenida con una importante rigidez axial, anclados a unos muertos de retenida. Finalmente los muertos de retenida disponen de 12 anclajes al terreno ejecutados mediante barras de diámetro 36 mm pretensadas.

## 3. Tablero

El tablero está compuesto por una sección rectangular en cajón de acero S355, el ala superior es #300.20 mm, el ala inferior es #2000.12 mm y las almas #780.8 mm. En la chapa de fondo y para minimizar la abolladura y pandeo de la chapa en hipótesis comprimidas se disponen dos rigidizadores cerrados. Coincidiendo con las costillas transversales se dispone un diafragma transversal de 8 mm, que actúa como rigidizador transversal y marco frente a distorsión ( si bien esta es mínima ).

La viga cajón se realiza en tramos de 16.00 mts que posteriormente se conectan en obra mediante uniones soldadas. Sobre el tablero se dispone de una losa de 12 cms de hormigón HA-35 formando una sección mixta, conectada a las vigas longitudinales mediante pernos d16. Con este tablero se da la rigidez para cargas asimétricas que el cable no aporta.

Las péndolas se anclan por parejas en el tablero cada 3.00 mts longitudinalmente y 9.00 mts transversalmente; como el tablero sólo tiene 6.00 mts de ancho se disponen unas costillas metálicas transversales para recoger las péndolas. Estas costillas están igualmente conectadas a la losa de hormigón mediante pernos d16.



*Fig. 2 Cajón metálico y costillas laterales del tablero.*

Para evitar el desgarro laminar del alma de la viga longitudinal en el contacto con el ala inferior de la costilla metálica ( traccionada ) se hace pasante dicho ala, preparando el alma en taller.

La losa del tablero tiene un doble trabajo:

- En el plano vertical como colaborador de las vigas metálicas en la flexión global del tablero y aportando rigidez para sobrecargas actuando en  $\frac{1}{2}$  vano.
- En el plano horizontal llevando por flexión transversal como viga pared las cargas transversales de viento hasta los estribos.

El armado de la losa se realiza con los siguientes criterios:

- Armado longitudinal : Flexión negativa del tablero frente a sobrecargas.  
     Armatura de rasante de la conexión de las costillas transversales.  
     Flexión transversal de la losa por viento.
- Armado transversal: Armatura de rasante de la conexión de las vigas longitudinales.

La parte transitable del tablero está flanqueado por barandillas de acero inoxidable, aportando calidad al tablero. En alzado la pasarela dispone de una cierta curvatura, lo que acentúa la expresividad de la solución.

#### 4. Pilonos

Se proyectan cuatro pilonos metálicos de 20.50 mts de altura desde su empotramiento en un plinto de hormigón. Estos pilonos recogen principalmente la componente axial vertical de los cables, mientras que con los tubos de retenida se compensa la componente horizontal de los cables centrales. Son por tanto elementos sometidos principalmente a compresión, con flexiones longitudinales reducidas, función de la relación de rigideces entre retenida y pilonos .

Transversalmente los pilonos no están arriostrados y deben resistir como ménsula los esfuerzos de viento y de 2º orden generados en el plano transversal. La longitud de pandeo transversal no se corresponde con el propio de una ménsula por la fuerza transversal en sentido contrario al movimiento del pilono que generan los tubos de retenida.

Los pilonos son de acero S355 de 700 mm de canto (sentido longitudinal del puente ) y 910 mm de ancho, con forma de doble T maclada, realizados con chapas armadas con espesores máximos de 40 mm. El pilono lo forma un cajón central de 700 mm por 500 mm al que se le adosan unas T laterales hasta llegar a los 910 mm de ancho.

Las T laterales estabilizan el pilono frente a esfuerzos trasnversales y le dan una rigidez transversal para minimizar los efectos de 2º orden en este plano.

En la cabeza superior de los pilonos se anclan los cables centrales y los tubos de retenida, para ello se dispone de una pieza especial de 60 mm de espesor con un taladro de 185 mm para la colocación del bulón de 175 mm del cable

central, al que se le adosan dos arandelas de otros 60 mm de diámetro soldadas a la pieza central hasta completar 180 mm que se requiere para el anclaje del cable cerrado.

Cada metro se dispone interiormente en el cajón de 500x700 mm de un rigidizador transversal de 8 mm y unos exteriores que unen el cajón con las dobles T.

El anclaje de los pilonos a cimentación se realiza mediante una basa de 1200 mm de diámetro y 80 mm de espesor, donde se suelda el pilono en todo su contorno en penetración completa con chapas de respaldo interior. Esta basa se una a los plintos de cimentación con 24 barras de 32 mm de diámetro roscadas a la placa de base, con tuercas en la parte superior e inferior de la basa.

## 5. Estribos y cimentación

Los pilonos se apoyan sobre unos plintos de hormigón armado tintado en color ocre, estos plintos tienen una forma tronco cónica, a su vez estos plintos descansan sobre un encepado común para los dos pilonos de un mismo estribo, con un canto de 1.50 mts. Los encepados se apoyan sobre pilotes barrenados de 850 mm de diámetro con una profundidad de 14.00 m para el estribo de la margen derecha ( E1 ) y de 12.00 m para el estribo de la margen izquierda ( E2). Sobre estos encepados se disponen muros de acompañamiento laterales para materializar las rampas de acceso a la pasarela.

Según se comentó en los puntos anteriores, la carga horizontal transmitida por los cables principales en cabeza de pilonos es compensada mediante tubos de acero. La tracción de estos tubos que transmite a unos muertos de anclaje que a su vez quedan fijos al terreno mediante anclajes al terreno.

Se disponen un total de 12 barras de 36 mm de diámetro de acero 835/1030 N/mm<sup>2</sup> por pilono, con sistema de protección permanente, permaneciendo toda la barras protegida. El bulbo de anclaje tiene un diámetro de 150 mm y una longitud de 8.00 mts. La longitud total de los anclajes será de 24 mts para los del estribo E1 y de 21 mts para los del estribo E2. El sistema de inyección será del tipo IRS, repetitiva y selectiva. El bulbo inyectado se sitúa en el estrato del terciario formado por unas arenas arcillosas densas. Los bulbos se separan entre sí como mínimo dos metros para que no exista interferencia entre ellos, por lo que se inclinan dentro del plano vertical para lograr esta separación.

Las barras se pretensan contra un plinto de anclaje, que a su vez descansa sobre una zapata corrida que une los dos plintos de un estribo. La carga de pretensado de las barras es de 486 KN que se corresponde con un 45% de la carga de rotura. El tesado se realiza para que en servicio la tracción de los tubos de retenida no superen las cargas de tesado de las barras. En rotura se superarían las cargas de tesado y las barras incrementarían su carga sobre la de tesado hasta la rotura del bulbo de anclaje o de la propia barra.

Inicialmente y antes de traccionarse los tubos de retenida ( por la carga del cable principal ) los anclajes comprimen el terreno a través de la zapata corrida, la cual se dimensiona para transmitir unas cargas compatibles con el terreno, una vez que los tubos de retenida entran en tracción van descargando la zapata, por lo que la hipótesis pésima para la zapata es el final del tesado de las barras.

Para unir los tubos de retenida a los anclajes al terreno se diseñan unas piezas especiales de acero, que actúan a modo de vigas doble T.



Fig. 3 Pieza especial de unión tubos retenida y anclajes al terreno.

Los estribos se resuelven mediante muros de hormigón armado tintado en color ocre, de una anchura frontal de 6.00 mts y unos muros longitudinales de acompañamiento paralelos de 50 cms de espesor que materializan las rampas de acceso hasta las pasarelas. Los muros de acompañamiento se cimientan sobre los encepados de los pilonos y la zapata del anclaje.

Además se recuperan los estribos existentes de la antigua pasarela, procediéndose a un revestimiento de los mismos con granito, conforme al resto del proyecto de la Vega Baja. Además se construyen unas rampas en hormigón que son los verdaderos estribos de la pasarela.

La pasarela colgante tiene unas características especiales que la hacen muy diferente de un puente convencional en lo referente a los apoyos. El hecho de estar colgada con péndolas cada 3.00 mts hace que para carga permanente la reacción en estribos sea muy pequeña y que incluso para determinadas hipótesis de carga, ésta pueda levantarse del estribo.

Por otro lado la curvatura en alzado de las vigas longitudinales hace que para cualquier carga vertical sobre el tablero se produzca un desplazamiento longitudinal en los apoyos; además para cargas asimétricas (  $\frac{1}{2}$  vano del puente cargado ) la falta de rigidez del cable produce movimientos longitudinales muy importantes en los apoyos. Al ser tableros muy flexibles las rotaciones en los apoyos son importantes.

Para garantizar que el apoyo no se levanta se disponen neoprenos zunchados con unas piezas especiales que evitan el levantamiento.



*Fig. 4 Apoyo de neopreno con dispositivo anti-levantamiento.*

## **6. Proceso constructivo**

El proceso constructivo comienza con la ejecución de pilotes, encepados y estribos.

La estructura metálica se fabrica en taller y se transporta a obra por tramos. Tras concluir los estribos se colocan los pilonos, los anclajes al terreno, tubos de retenida y cables principales. El tablero se divide en 5 segmentos que cuelgan de los cables principales desde un estribo y sin afección al cauce del río. Los tramos de tablero se unen con soldaduras, ejecutando posteriormente la losa superior y el resto de elementos de acabado.



*Fig. 5 Colocación del tramo central del tablero.*

Un detalle significativo es el apriete en fases necesario de las abrazaderas que unen el cable principal a las péndolas, debido al efecto Poisson a medida que los cables entran en carga. Una vez concluida la losa superior y los acabados se realiza una prueba de carga, obteniendo deformaciones dentro de los márgenes tolerables.



*Fig. 6 Montaje de chapa colaborante para ejecutar la losa de hormigón.*

Una vez terminados los trabajos se realiza una prueba de carga utilizando palets de cemento hasta alcanzar una carga máxima de 105 tn. La máxima flecha obtenida en la prueba de carga es de 14 cm, aproximándose sensiblemente a los valores esperados en el cálculo.



*Fig. 7 Prueba de carga en Pasarela Colgante.*

## **7. Ficha de la obra**

Nombre de la obra: PASARELA COLGANTE DE FÁBRICA DE ARMAS (TOLEDO)

Promotor: AYUNTAMIENTO DE TOLEDO.

Proyecto: Ramón Sánchez de León (ICCP, ESTUDIO AIA)

Francisco Sánchez de León (Arquitecto, ESTUDIO AIA)

Dirección de Obra: Ramón Sánchez de León (ICCP, ESTUDIO AIA)

Christian Bernal Pérez (ICCP, ESTUDIO AIA)

Empresa constructora: FCC CONSTRUCCIÓN

Jefe de Obra: Teodoro del Barco Prieto (ICCP, FCC).

Subcontratista principal: HORTA COSLADA (taller metálico).