

Pasarela peatonal entre el Paseo de la Marina Española y el Parque Marítimo del Mediterráneo (Ceuta). Aspectos singulares de diseño y cálculo

Footbridge between the Spanish Navy promenade and the Mediterranean Maritime Park (Ceuta). Singular aspects of design and calculation

**Pedro Sierra García^a, Alejandro Castillo Linares^b, Guillermo Montero Poyatos^c,
Francisco Javier Arnaiz Seco^d**

^a Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Ciudad Autónoma de Ceuta (Consejería de Fomento). Ingeniero de la Ciudad.

psiegar@ciccp.es

^b Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Departamento de Mecánica de Estructuras e Ingeniería Hidráulica. ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad de Granada (Granada, España). A.C.L. Diseño y Cálculo de Estructuras S.L. (Cádiz, España).

Director Gerente. acastillo@acl-estructuras.com

^c Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. A.C.L. Diseño y Cálculo de Estructuras S.L. (Cádiz, España). Director de proyectos.

gmontero@acl-estructuras.com

^d Arquitecto. Ciudad Autónoma de Ceuta (Consejería de Fomento). Arquitecto municipal. jarnaiz@ceuta.es

RESUMEN

Con objeto de mejorar la conexión entre el Parque de la Marina Española y el Parque Marítimo del Mediterráneo, en la ciudad de Ceuta, se planteó la construcción de una pasarela peatonal de carácter singular que cruzase sobre una carretera existente en servicio, con unos condicionantes geométricos y de diseño a nivel de integración urbanística muy marcados. Para ello se optó por una solución estructural atirantada, con un pilono de altura moderada y geometría en consonancia con la planificación urbanística de la zona, y un tablero de hormigón armado de canto reducido, que posee geometría singular en planta. La estructura se construyó en el año 2015, siendo actualmente un punto de interés turístico de la ciudad.

ABSTRACT

In order to improve the connection between the Spanish Navy Park and the Mediterranean Maritime Park, in the city of Ceuta, it was proposed the construction of a singular footbridge that crossed over an existing road, conditioned by geometric and design constraints about urban integration. For this, a cable-stayed structural solution was chosen, with a moderate height pylon and geometric shape in line with the urban development planning of the area. The structure is completed with a slim reinforced concrete deck, which has a special plan geometry. The structure was built in 2015, having become a point of tourist interest of the city nowadays.

PALABRAS CLAVE: pasarela, atirantada, pilono, curva, asimétrica, proyecto, cálculo.

KEYWORDS: footbridge, cable-stayed, pylon, curve, asymmetrical, project, calculation.

1. Introducción

Dentro del proyecto de Remodelación del Paseo de la Marina Española, en la ciudad de Ceuta, se planteó como actuación singular y emblemática del proyecto por parte de la Administración, la conexión directa entre el Paseo y el Parque Marítimo del Mediterráneo (véase en figura 1) mediante una estructura peatonal. Este último, obra del prestigioso arquitecto César Manrique, constituye una de las infraestructuras principales de ocio de la ciudad autónoma.



Con tal fin, se incluyó en el proyecto la construcción de una Pasarela Peatonal Atirantada que nace desde el nuevo acerado del Paseo y desembarca en la puerta de acceso al Parque, habilitando igualmente a medio camino la entrada al Gran Casino de Ceuta.

2. Condicionantes de diseño

La estructura peatonal para establecer la conexión debía salvar el desnivel existente entre la cota del acerado del paseo y la correspondiente a la entrada al parque, de aproximadamente 3.5 m, pero garantizando además un gálibo vertical mínimo de 5.3 m sobre los 8.0 m de anchura de

la carretera existente que discurre de forma paralela al paseo.

Lo anterior supone que, entre el borde de la calzada y la puerta de entrada al Parque Marítimo, distantes horizontalmente en línea recta sólo 9.5 m, la rasante deba salvar un desnivel vertical de hasta 5.8 m.

Habida cuenta de las pendientes máximas del 8% permitidas por las ordenanzas municipales y normativas técnicas por razones de accesibilidad, fue necesario establecer un desarrollo en planta de la estructura en dos alineaciones enlazadas con curvas, que fuese compatible con los distintos condicionantes existentes. Ello supone una estructura de longitud total sensiblemente superior a la existente en línea recta entre el borde del paseo y la entrada al parque.

Además de esto, desde la Ciudad Autónoma se puso un énfasis especial en la integración urbana de la pasarela dentro del paseo, de forma que existiese una transición adecuada a la pasarela, y que ésta no dispusiese de elementos arquitectónicos o estructurales que presentasen excesiva altura. Todo esto se consiguió creando un acceso a la pasarela de gran amplitud, con transiciones curvas suaves desde los bordes del acerado, y con la disposición de un pilono de altura moderada y líneas geométricas sencillas, del que nace un número limitado de tirantes. En la Figura 2 se puede observar el resultado conseguido con la estructura diseñada, en perspectiva desde el paseo peatonal.



Como último condicionante especial para el diseño de la estructura, se comunica al proyectista la necesidad de mantener abierta al tráfico la carretera existente, ya que constituye una de las arterias principales de la ciudad.

3. Descripción de la estructura

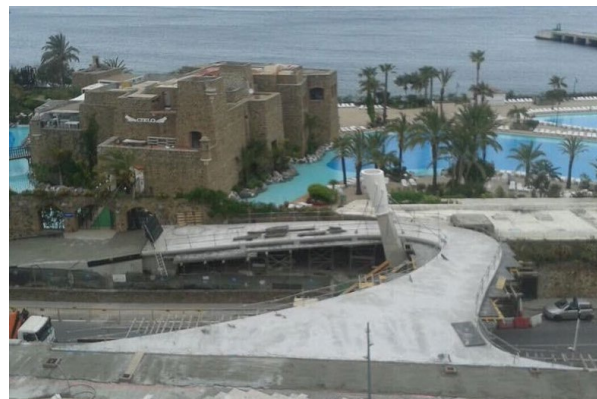
Una vez analizadas las implicaciones de todos los condicionantes de diseño anteriormente expuestos, se planteó el proyecto de una Pasarela Peatonal de carácter singular tanto por su tipología estructural como, especialmente, por su morfología.

La solución diseñada fue una pasarela atirantada con un único plano de atirantamiento asimétrico [3], que permite evitar cualquier tipo de apoyo intermedio sobre la carretera y hace posible reducir al máximo el canto del tablero [2], debido a lo estricto que es el galíbo vertical disponible, como se puede apreciar en las figuras 3 y 7.



La losa del tablero posee una planta irregular, con anchura variable entre 38 m en la

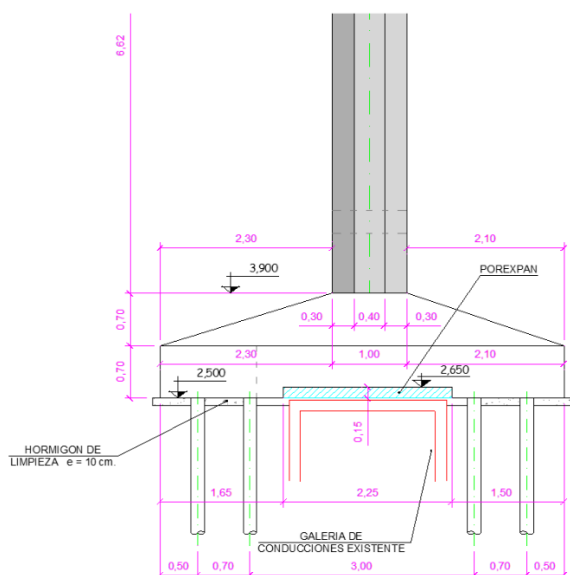
confluencia con el paseo y 4.4 m en la zona central, describiendo alineaciones curvas que unen entre sí dos tramos ortogonales en planta (véase figura 4), uno perpendicular al paseo y otro paralelo junto al Casino y el Parque Marítimo. La losa es de hormigón armado [6], de 50 cm de espesor, y posee bordes achaflanados con carácter estético.



En el lado del Parque Marítimo se sitúa el pilono, de 9.5 m de altura sobre el encepado, que posee geometría singular e inclinación de unos 20° respecto a la vertical. Tiene canto longitudinal variable creciente con geometría curva desde la cabeza a la cimentación, y canto transversal constante de 1.0 m.

El pilono enlaza por debajo del tablero con una pila de hormigón armado de geometría similar, constituyendo ambos elementos una pila en V, que sirve de elemento sobre el que apoya el borde exterior del tablero mediante un neopreno-teflón de Ø300*71 (32) mm.

La cimentación del pilono y la pila se realiza conjuntamente mediante un encepado de canto variable, de tipo troncopiramidal, sobre 4 filas de 6 micropilotes en cada una, cuya disposición en planta es tal que permite no afectar a una galería de conducción existente que fue detectada en fase de obra (figura 5).



De la cabeza del pilono nacen 7 tirantes de barras que sostienen el tablero sólo en el lado interior de la curva (atirantamiento asimétrico), lo que contribuye a la sensación de amplitud al paso sobre la estructura [3]. La cabeza del pilono es de estructura mixta, constituida por un caperuzón metálico exterior rigidizado de color blanco, que contrasta con la tonalidad del hormigón del resto del pilono, a la vez que constituye un elemento sobre el que resulta más sencilla la instalación de los anclajes de los tirantes de barras.

En el lado del Paseo de la Marina, junto a una acera contigua a la carretera, donde la anchura de la pasarela es de unos 20 m, se disponen 2 pilas alineadas con el muro del paseo, compuestas cada una de ellas por dos tubos metálicos de color blanco describiendo forma de V en alzado (figura 6). El tablero queda apoyado sobre estas pilas y en voladizo desde las mismas hasta el borde de conexión al acerado del paseo.

La tipología de las pilas se asemeja a la utilizada en otros puentes ya existentes en la ciudad que se encuentran próximos a la pasarela, con objeto de conseguir una mejor integración urbanística. La cimentación de estas pilas se realiza igualmente mediante encepado y micropilotes.



Figura 6. Vista lateral desde el lado del Parque Marítimo, desde el que se observan las pilas en V.

La estructura se completa con la construcción de una rampa paralela a la carretera en el lado del Parque Marítimo, que está formada por unos muros de hormigón cuya geometría en alzado se ajusta a las pendientes y rellanos horizontales necesarios en la rampa.

Al final de la rampa se dispone el estribo, al que el tablero de la pasarela queda fijado mediante topes longitudinales y transversales. Posee un muro frontal de 1.25 m, en el que se apoya verticalmente el tablero mediante 2 neoprenos. La cimentación del estribo se realiza con 10 micropilotes de 180 mm de diámetro.

En los bordes del tablero se dispuso una barandilla de acero inoxidable, con pasamanos a dos alturas (véase figura 7).



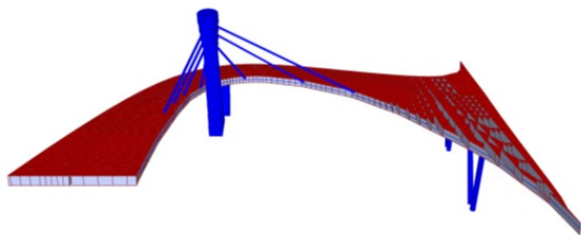
Figura 7. Detalle de barandilla de acero inoxidable en entrada desde el Paseo Marítimo.

El pilono de la pasarela ha sido dotado de iluminación, lo que contribuye a que la estructura tenga un mayor atractivo desde el punto de vista turístico (figura 8).



4. Descripción del procedimiento de cálculo

Para el dimensionamiento de la estructura, se llevó a cabo un modelo de cálculo general evolutivo en el tiempo, en el que se representa la losa del tablero mediante elementos lámina, y el pilono y los tirantes mediante elementos tipo barra, con iguales propiedades mecánicas que los elementos que representan (figura 9).



El modelo de cálculo tiene en cuenta la variación de las propiedades del hormigón por el desarrollo de las acciones reológicas a lo largo del tiempo, lo que supone una redistribución interna de los esfuerzos y deformaciones en la losa, de las reacciones en apoyos y de los axiles sobre los tirantes.

A partir de los esfuerzos envolventes obtenidos entre la situación a tiempo inicial y tiempo infinito, se lleva a cabo el dimensionamiento de los distintos elementos estructurales. Además, la fisuración de la losa de hormigón armado también genera un incremento en las deformaciones al reducirse su rigidez del tablero. Todo ello es tenido en consideración en el cálculo.

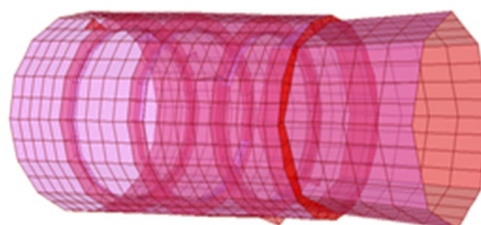
Sobre el modelo general se realizaron además distintas modificaciones en fase de obra,

incluso en el mismo día en el que se llevó a cabo el tesado de los tirantes, para ajustar la tensión en todos ellos, hasta dejarlos a la tensión a la que debían estar trabajando a tiempo inicial.

El dimensionamiento general de la estructura se completó con las comprobaciones de tipo dinámico, verificando que las frecuencias horizontales y vertical de los primeros modos de vibración se encontrasen fuera del rango de peligro de resonancia, y que se garantizase el cumplimiento del estado límite de vibraciones para confort del usuario. Asimismo, se analizó el estado límite de servicio de deformaciones, en virtud del cual se dota a la estructura de la oportuna contraflecha constructiva [6].

Además de los modelos para estudiar el comportamiento global de la estructura, se realizaron modelos específicos de determinados elementos en particular, entre los que destacan:

1) Modelos de elementos finitos para estudio de esfuerzos en corona rigidizada de zona superior del pilono.



2) Modelos de elementos finitos para estudio de las orejetas, horquillas de transición (figura 11) y chapas embebidas en la losa del tablero para el anclaje de los tirantes.

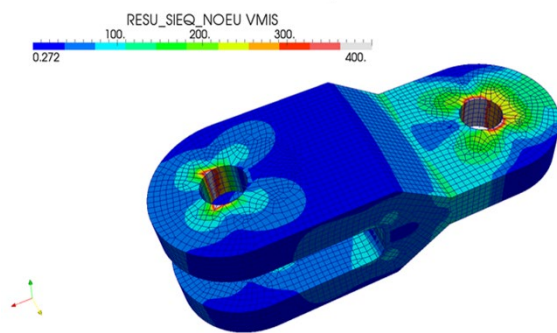


Figura 11. Modelo de elementos finitos para análisis de tensiones en horquilla de transición de las barras de tirantes.

5. Procedimiento constructivo. Singularidades durante la ejecución.

5.1 Introducción

La construcción de estructuras dentro de un entorno urbano supone habitualmente la existencia de distintos contratiempos durante el desarrollo de la obra, derivados no sólo de las afecciones producidas a los usuarios, sino también motivadas por la existencia no esperada de conducciones que han de ser mantenidas en servicio. Además, las soluciones que pueden plantearse en una obra construida en Ceuta no siempre pueden ser tan asumibles, especialmente a nivel de plazo, como en otras zonas de España, debido a la situación geográfica de la ciudad.

Por todo ello, durante el transcurso de la obra, ACL Estructuras como proyectista de la pasarela, llevó también a cabo una Asistencia Técnica estructural continua en la que se realizaron diferentes adaptaciones respecto al proyecto original, en función de los contratiempos acontecidos y las necesidades constructivas.

A continuación, se describirán las soluciones más singulares adoptadas a nivel constructivo y de cálculo estructural.

5.2 Cimbrado, tesado de tirantes y descimbrado.

Uno de los condicionantes a tener en consideración durante la construcción de la pasarela era que resultaba necesario mantener operativa al tráfico la carretera sobre la que cruza la estructura.

Debido a la singular geometría en planta del tablero y el reducido canto disponible, se optó por solución de losa de hormigón armado cimbrada.

Con objeto de no afectar al tráfico, se dispuso una cimbra de tipo porticada sobre la carretera, y cimbra cuajada en el resto de la superficie en planta del tablero (figura 12).



Figura 12. Fotografía de la pasarela sobre cimbra cuajada y porticada durante su construcción.

Puesto que se trata de una estructura hiperestática, evolutiva y además inicialmente apoyada sobre cimbra, hay que coordinar el tesado de los tirantes con el procedimiento de descimbrado, toda vez que el tesado supone que cierta superficie del tablero se despegue de la cimbra, y que el tesado de cada tirante afecta a la tensión en el resto, que están soportando un tablero parcialmente cimbrado.

A partir de un estudio exhaustivo con distintos modelos de cálculo de las afecciones producidas sobre la losa cimbrada por el tesado sucesivo de los tirantes, se estableció un procedimiento consistente en el tesado y descimbrado controlado del tablero en varias fases:

- 1) En la primera fase se llevó a cabo una puesta en carga inicial de los distintos

tirantes con el tablero apoyado sobre la cimbra. Puesto que cada tirante estaba formado por 2 tramos de barra acoplados con manguito, el cierre del tirante conformado por los 2 tramos no se realizaba hasta que se llevara a cabo la puesta en carga de los tirantes que se tesaban previamente. En esta fase, las cargas en tirantes oscilaban entre 100 y 240 KN.

- 2) Una vez en carga los tirantes, se llevaba a cabo el descimbrado de la estructura, comenzando por el desapriete de los husillos de las torres situadas alrededor de los tirantes, en un orden establecido para afectar lo mínimo posible a las cargas en tirantes y esfuerzos en la losa.

Llegado este punto, se desacoplaban el resto de las torres de cimbra por zonas, siguiendo un orden estudiado para afectar lo mínimo posible a las cargas en tirantes.

- 3) Concluido el descimbrado del tablero, se llevó a cabo una comprobación de la fuerza en los tirantes, y posteriormente fueron retesados hasta valores comprendidos entre 150 KN y 600 KN, en función del tirante de que se tratase (valores mayores en los tirantes más cortos). Nótese que el tesado a estas fuerzas, en función del orden en que sean tesados, no supone que tras la puesta en tensión queden todos ellos trabajando al valor inicial, ya que el tesado de un tirante supone la pérdida o ganancia de tensión en el resto.
- 4) Por último, se realizó una comprobación y retesado de la carga en todos los tirantes, que debía quedar comprendida entre 400 y 630 KN, ajustándose así a los valores requeridos en el proyecto de la estructura.

Durante las operaciones de tesado de los tirantes, una vez retiradas las torres de cimbra, un equipo de ACL se desplazó a la obra y realizó los cambios oportunos en la fuerza a la que

quedaban tesados los tirantes tras la primera vuelta, para aportar, sobre resultados reales, las correcciones que había que realizar en las siguientes fases hasta llegar a la fuerza final necesaria en cada tirante. Esto permitió acelerar el proceso de tesado de la estructura, de forma que en pocas horas se había alcanzado el estado de fuerzas en tirantes necesario.

5.3 Tipología de los tirantes.

Los tirantes previstos inicialmente en proyecto estaban constituidos por cables de acero de alto límite elástico [1], ya que éstos permiten mayor libertad en el posicionamiento que los de barras.

Cuando comenzaron las obras, se detectó que la rasante real de la carretera se encontraba ligeramente más elevada que la considerada en fase de proyecto. Puesto que el reducido canto del tablero aconsejaba el anclaje de los tirantes de cables previstos en proyecto con un sistema que descolgaba por debajo de la cara inferior del tablero, las cabezas de los anclajes descolgadas suponían una reducción del gálibo disponible, que ahora quedaba por debajo del mínimo normativo.

Al no existir margen de actuación sobre la rasante de la pasarela, se optó por modificar el sistema de anclaje a uno de tipo superior (figura 13), embebido en el canto del tablero. Esto llevó a cambiar la tipología de tirantes a elementos de barras de acero de alto límite elástico [4].



Figura 13. Detalle de horquilla de terminación de anclaje de barra, bulón y orejeta del tablero.

El sistema de anclaje estaba formado por unas orejetas a las que se conectan las horquillas de terminación de las barras mediante bulones. Las orejetas estaban rematadas en una placa de reparto, situada en el interior del tablero, que posee unos pernos conectadores para transmitir las reacciones horizontales provenientes del tirante al tablero. Además, para garantizar el correcto funcionamiento del sistema, se dispuso una armadura vertical de cuelgue alrededor de la orejeta, con capacidad resistente superior a la componente vertical de la tracción del tirante.



Figura 14. Orejeta y chapa de reparto embebida en tablero, durante proceso de ferrallado.

La singular geometría del borde interior del tablero, curvo en planta y dentro de un acuerdo vertical, sumada a la geometría curva de la cabeza del pilono inclinado, desaconsejaban una solución de tirante con barra continua, aunque ésta fuese posible para la longitud necesaria de los tirantes, ya que esta barra no permite ningún tipo de juego a la hora de ser instalada. Por ello, se optó por tirantes formados por dos barras acopladas con manguito, desde el que se llevaba a cabo el propio tesado.

5.4 Modificaciones en la cimentación del pilono.

Cuando comenzaron los trabajos de obra, se encontró una galería de conducciones ligeramente enterrada en la zona en la que está ubicada la cimentación del pilono.

La posición de las conducciones no podía ser rectificadas, por lo que tuvo que rediseñarse la

cimentación del pilono, optando por un encepado más superficial y la disposición de los micropilotes a ambos lados de las conducciones.

Debido a que el canto necesario del encepado por criterio estructural llevaba a que éste quedase parcialmente visible por la necesidad de subir la cota de cimentación, se optó por una solución funcional y estética consistente en la realización de un encepado troncopiramidal (véase figura 5).

5.5 Construcción del pilono.

El pilono es un elemento estructural de hormigón armado, salvo en la zona superior en la que se anclan los tirantes, en la que funciona como elemento mixto hormigón-acero (relleno interior de hormigón armado y caperuzón metálico exterior rigidizado). Este último dispone de un conjunto de pernos conectadores en su parte inferior, dispuestos con la finalidad de transmitir los esfuerzos desde la sección metálica a la sección de hormigón armado. A su vez, las armaduras verticales provenientes de la sección de hormigón quedan incorporadas y ancladas dentro del caperuzón metálico.

Para la construcción del tramo de hormigón armado se empleó un encofrado artesanal, debido a la particular geometría irregular del pilono. Se hormigonó el interior con hormigón autocompactable [6] y se dejaron las armaduras verticales de espera salientes correspondientes, que habían de quedar ancladas dentro del tramo superior mixto. La posición de estas armaduras hubo de ser replanteada y rectificadas para posteriormente ensamblar, entre los pernos conectadores, la pieza metálica superior, que fue colocada con grúa (véase figura 15).

Esta operación, que a priori pudiese pensarse que es sencilla, requirió de singular destreza por parte de los operarios de obra.



Figura 15. Fotografía correspondiente a la colocación del caperuzón metálico superior.

Finalmente, una vez posicionada la pieza metálica, se llevó a cabo el hormigonado interior.

Referencias.

- [1] Holger Svensson, Cable-Stayed Bridges. 40 Years of Experience Worldwide, Ernst & Sohn Wiley-Blackwell, 2012.
- [2] Miguel Aguiló, La ligereza de las Pasarelas Españolas, Grupo ACS, 2009.
- [3] Miguel Aguiló, Javier Manterola, Mario Ozaín, Javier Rui-Wamba, Javier Manterola Armisen. Pensamiento y Obra, Fundación Esteyco, 2004.
- [4] Florencio del Pozo, José Emilio Guerrero, Manual de Tirantes, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, ACHE, 2007.
- [5] Horst Berger, Light Structures. The Art and Engineering of Tensile Architecture, Birkhauer, Basel, 1996.
- [6] Comisión Permanente del Hormigón, Instrucción de Hormigón Estructural EHE-2008, Ministerio de Fomento, Madrid, 2008.