

Pasarela y torre mirador del Cerro del Castillo (Chiclana de la Frontera). Aspectos singulares de diseño, cálculo y constructivos

Footbridge and viewing tower of Cerro del Castillo (Chiclana de la Frontera). Singular aspects of design, calculation and construction

Alejandro Castillo Linares^a, Guillermo Montero Poyatos^b, Juan Antonio de la Mata Amaya^c, Álvaro Alonso del Real Nicolás^d

^a 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

^b 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

^c Arquitecto municipal. Ayuntamiento de Chiclana de la Frontera. Jefe de servicio de proyectos. jmata@chiclana.es

^d Arquitecto técnico. EMSISA, Obras y servicios. Aalonso@emsisa.chiclana.es

RESUMEN

Tras el descubrimiento del yacimiento arqueológico fenicio del Cerro del Castillo, en Chiclana de la Frontera, se ha desarrollado un plan para la integración y transformación de su entorno como recurso cultural. Este plan incluyó la construcción de una estructura singular de acceso preferencial e icónico desde el río Iro al yacimiento, formada por una torre de 31.9 m de altura dotada de ascensor interior, y una pasarela metálica de 38 m de luz, constituida por una celosía de canto variable que soporta sendas rampas a cada lado: una para el acceso desde la torre al yacimiento, y otra desde éste a un mirador. En este artículo se describe la estructura proyectada y los aspectos más singulares de su diseño y construcción.

ABSTRACT

After the discovery of the Phoenician archaeological site of Cerro del Castillo, in Chiclana de la Frontera, a plan has been developed for the integration and transformation of its environment as a cultural resource. This plan included the construction of a special structure with preferential and iconic access from the Iro River to the site, made up by a 31.9 m high tower equipped with an indoor elevator, and a steel footbridge of 38 m span length, consisting of a variable height truss that supports ramps on each side: one for access from the tower to the site, and another from it to a viewpoint. This article describes the designed structure and the most singular aspects of its design and construction.

PALABRAS CLAVE: Pasarela, celosía metálica, mirador, torre, proyecto, integración urbana, accesibilidad.

KEYWORDS: Footbridge, steel truss, viewpoint, tower, project, urban integration, accessibility.

1. Introducción

En el año 2006, en la población de Chiclana de la Frontera, se descubrió un yacimiento arqueológico sobre el denominado Cerro del Castillo. Según los estudios e investigaciones realizados, este yacimiento data de la Prehistoria reciente, comenzando como enclave habitado en tiempos fenicios [6].

Con objeto de poner en valor los restos arqueológicos, el Ayuntamiento de la ciudad consideró relevante la integración urbana de su entorno y la transformación en un nuevo recurso cultural, dentro del plan de Estrategia de Desarrollo Urbano Sostenible e Integrado (EDUSI).

A tal efecto, en el año 2022 se desarrolló en colaboración con ACL Estructuras el proyecto de una estructura singular de acceso preferencial e icónico desde el paseo del río Iro a lo alto del Cerro del Castillo, que incluía una torre cuya morfología rectangular se inspira en la antigua Torre de Guzmán el Bueno.

El desembarco de la estructura peatonal se realiza en la calle Ánimas, emplazada en coronación del cerro, donde se ha construido recientemente el Centro de interpretación Nueva Gadeira, alrededor del yacimiento arqueológico fenicio.



Figura 1. Vista del interior del yacimiento arqueológico en el Centro Nueva Gadeira.

La construcción de la estructura se concluyó en enero del año 2024, y su inauguración oficial se llevó a cabo el 21 de junio del mismo año.

2. Principales condicionantes para el diseño de la solución estructural

El condicionante principal existente era salvar el desnivel de más de 16 m entre la zona inferior del cerro (a cota del paseo del río Iro) y la zona superior, en la que se localiza el yacimiento. El espacio de la parcela disponible para la construcción de la estructura es reducido, por lo que desde la Propiedad se sugirió desde el inicio que el acceso se realizase directamente mediante ascensor ubicado dentro de una estructura tipo torre hasta cierta altura (a partir de la que se iniciase la pasarela), en lugar de habilitar las más convencionales rampas y/o escaleras en un espacio disponible moderado, ya que tendrían un impacto visual mucho mayor.

Una vez fijada esta tipología, se opta por elementos estructurales y arquitectónicos con formas sencillas, acorde con el entorno en el que se encuentra, e inspiradas en la antigua Torre de Guzmán el Bueno, con una sección rectangular común en torres vigía de la Edad Media.

La pasarela debía hacer posible el acceso desde la torre a la calle Ánimas, y desde ésta hasta a un mirador situado a una cota más alta. Por ello, se planteó una solución estructural y funcional con una celosía central de canto variable que soporta a cada lado rampas de ida y vuelta, con pendientes no superiores al 5.5%, acorde con las ordenanzas de accesibilidad. Con esta pendiente máxima la luz mínima requerida de la pasarela es de aproximadamente 38 m.

La solución adoptada con una celosía que aprovecha la variabilidad de canto desde el apoyo en un extremo hasta el empotramiento en la torre permite resolver con garantías la luz requerida del vano de la pasarela.



Figura 2. Vista longitudinal de la estructura completa.

Por otro lado, una vez comenzado el proyecto se informó de la posible existencia de restos arqueológicos adicionales situados en la posición inicialmente prevista de desembarco de la pasarela, por lo que no debía quedar apoyada en esta zona en un elemento permanente. Para la resolución de este condicionante, se optó por desplazar la posición de la torre alejándola ligeramente del cerro, y disponer una pila intermedia sobre la que apoya la celosía. Desde esta pila hasta el estribo final situado sobre los posibles restos arqueológicos, se establece un tramo independiente de pasarela forrada en madera más liviana que, en su caso, podría ser izada y retirada para llevar a cabo los trabajos arqueológicos en la zona de desembarco en la calle Ánimas.



Figura 3. Vista desde la pasarela desmontable.

3. Descripción de la estructura proyectada

La estructura queda conformada por una torre hueca de hormigón armado, a través de la que se accede con ascensor interno a una pasarela metálica que nace a media altura de la torre. Esta pasarela permite el acceso a la calle Ánimas, situada en coronación del cerro, y vuelve hacia la torre en recorrido inverso para habilitar un mirador hacia el río Iro, situado a mayor altura al otro lado de la torre.

Esta última es un elemento de hormigón armado de sección rectangular hueca de dimensiones exteriores de 3.6x5.4 m, y paredes de 40 cm de espesor. Posee una altura total desde el encepado de cimentación de 31.9 m. Las paredes quedan interrumpidas en los huecos necesarios para las puertas de acceso desde el nivel de calle, acceso a la pasarela, desembarco de la pasarela a cota superior y acceso al mirador. Asimismo, existe un tramo de pared de espesor variable en la zona inferior de la torre, que se consigue mediante el biselado de la pared vista junto a la puerta de acceso, para dar sensación de amplitud en la entrada.

El exterior de la torre está terminado con fachada ventilada, formada por placas ornamentales soportadas por una estructura metálica ligera auxiliar anclada al hormigón de la torre (véase figura 8).

En el interior de la torre se disponen tres forjados de losa maciza, que se pueden observar en la figura 4:

- El primero de ellos se habilita sólo para maquinaria y trabajos de mantenimiento del ascensor.
- El segundo forjado es en el que desembarca el ascensor, desde donde se accede a la rampa de la pasarela. Cubre una superficie en planta de 2.8x2.67 m. Posee un canto de 50 cm, recreado con una viga descolgada de 70x80 cm (dimensiones totales), a la que se ancla el cordón inferior comprimido de la cercha central de la pasarela. Además de las cargas verticales solicitantes, este elemento tiene una misión estructural esencial para garantizar el anclaje de la parte inferior de la pasarela a la torre, y la transmisión de esfuerzos entre ambos elementos.
- El tercer forjado está situado a 3.8 m de altura respecto al anterior, y constituye el desembarco de la pasarela y acceso al mirador. Es también de 50 cm de espesor, con una viga descolgada central de 1.2x0.8 m, a la que se ancla el cordón superior traccionado de la cercha, y el perfil central de la estructura del voladizo del mirador. Tiene igualmente misión estructural para el anclaje del cordón traccionado de la celosía.

La cimentación de la torre se proyectó mediante un encepado excéntrico (acorde con la excentricidad de las cargas transmitidas a la cimentación), de dimensiones 8.7x9.2x1.7 m, sobre 36 micropilotes de 22 cm de diámetro. Se optó por cimentación profunda en lugar de superficial debido a la gran magnitud de los asientos esperados en caso de cimentación directa, que se traducirían finalmente en asientos

diferenciales respecto a la cimentación profunda de la pila intermedia. Los micropilotes están dotados de tubería de acero TM-80 de Ø139.7x9 mm y tienen una longitud de 11.7 m, contabilizados a partir de cara inferior del encepado. El procedimiento de inyección de los micropilotes fue tipo IU.

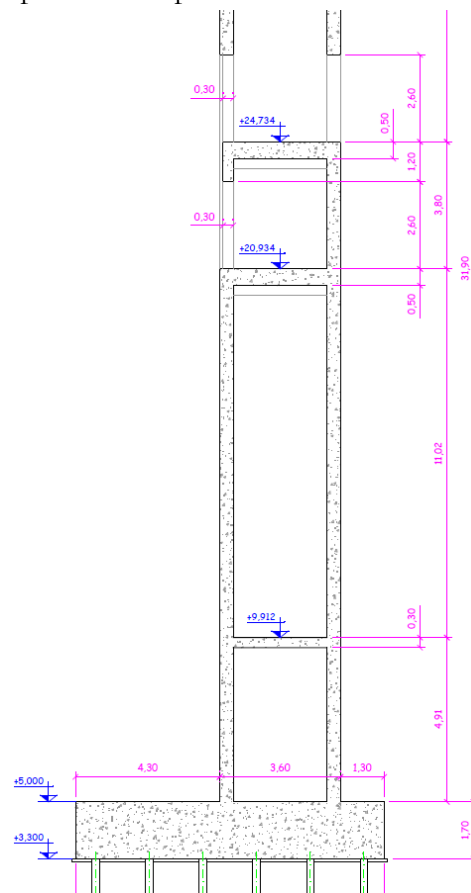


Figura 4. Sección de la torre y su cimentación según planos de proyecto.

La pasarela principal es un elemento que permite alojar dos rampas para acceder al nivel superior de la torre, que se consiguen con una viga central en celosía de canto variable, y sendos pasillos volados a cada lado respecto a la celosía. En los bordes de los pasillos se disponen dos vigas metálicas de 300x300 mm, conectadas a los cordones superior e inferior de la celosía mediante triangulación con perfiles rectangulares de 200x250 mm (figura 9). La triangulación arriostra la pasarela ante las cargas descentradas y sirve de elemento de apoyo del forjado de piso. La distancia entre ejes de la celosía central y las vigas de borde es de 2.5 m, lo que permite una superficie hábil en cada

rampa de 2.15 m para el paso de viandantes y la colocación de las barandillas de borde.

La pasarela tiene una longitud entre borde de la torre y apoyo en la pila intermedia de 37.75 m, y un canto entre ejes de cordones variable entre 3.8 m sobre la torre y 0 m en el apoyo sobre la pila. Tanto los cordones superior e inferior como las diagonales de la celosía se realizan con perfiles metálicos cerrados huecos. Los cordones superior e inferior se realizaron con perfiles armados (debido a los espesores necesarios), con dimensiones exteriores de 400x350 mm. Las diagonales de la celosía, que en general forman 40° entre sí, son perfiles laminados de 300x200 y 300x150 mm. En el tramo final, próximo al apoyo en pila, los dos cordones se fusionan en una única viga cajón de canto variable hasta llegar al apoyo.

Sobre las triangulaciones en planta existentes entre las vigas de borde y los cordones superior/inferior de la cercha, se dispone un forjado de chapa grecada y losa de hormigón armado, que tiene un canto total de 150 mm.

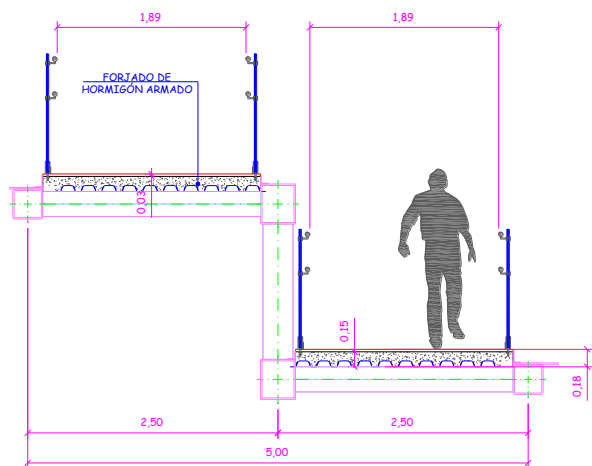


Figura 5. Sección transversal de la pasarela.

Respecto al mirador dispuesto al otro lado de la torre, se realiza también con estructura metálica de perfiles rectangulares huecos. Dispone de tres perfiles longitudinales principales, en continuidad con los de la pasarela principal, que en este caso son de sección rectangular de canto variable entre 400 y 350 mm. Entre ellos se disponen triangulaciones

como las de la pasarela, que sirven de elemento de arriostramiento de la estructura y de apoyo del forjado mixto con chapa grecada.

El acceso hacia la Calle Ánimas se consigue a través un tramo de pasarela independiente, que podría ser desmontada en caso de ser necesario. Tiene una longitud de 9 m y está formada por dos vigas en celosía exteriores, de 1.15 m de altura entre ejes del cordón superior e inferior, con una anchura entre ellos de 5.0 m. Entre los cordones inferiores de ambas celosías se disponen triangulaciones y una viga longitudinal central, que completan el emparrillado sobre el que se coloca y suelda una chapa de 20 mm de espesor que constituye el forjado. Las celosías exteriores son recubiertas con madera y el piso se realiza también con entarimado de madera.

El apoyo del extremo de la pasarela principal y la de acceso a la Calle Ánimas se realiza sobre una pila intermedia, de sección rectangular de 1.0x5.7 m, que posee una altura sobre cara superior de la cimentación de 12.7 m. La cimentación es también de tipo profunda, para minimizar la superficie a excavar con objeto de no afectar a la estabilidad del cerro, con encepado sobre 12 micropilotes de las mismas características que los de la torre, pero de 10.8 m de longitud.

Para el apoyo sobre la pila intermedia se emplean neoprenos zunchados, anclados a la subestructura y soldados a la pasarela metálica. El extremo de la pasarela principal es además fijado transversalmente mediante la disposición de unos topes transversales, formados por unas ménsulas de hormigón armado y un neopreno dispuesto en vertical.

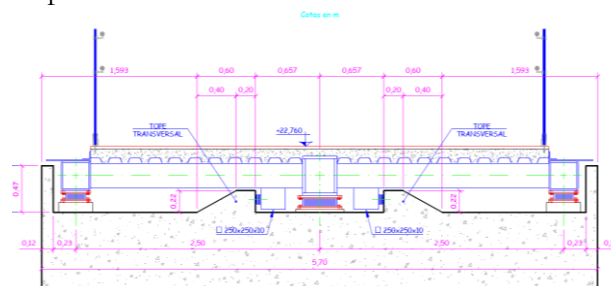


Figura 6. Apoyo y fijación horizontal de pasarela a pila intermedia.

La conexión de empotramiento de la pasarela principal a la torre se realiza a través de placas de anclaje, barras pretensadas (para los anclajes en el forjado superior) y barras pasivas (anclaje en el forjado inferior):

- El anclaje del cordón superior traccionado y viga central del voladizo al forjado superior se realiza con 6 barras $\varnothing 75$ tesadas, y posteriormente inyectadas dentro de las vainas. Entre la estructura metálica y el forjado de hormigón se emplea una chapa de reparto de 700x1000x85 mm.
- Para las vigas laterales del tramo superior se emplean 4 barras pretensadas $\varnothing 36$, también tesadas. En este caso se emplean chapas de reparto de 400x650x50 mm.

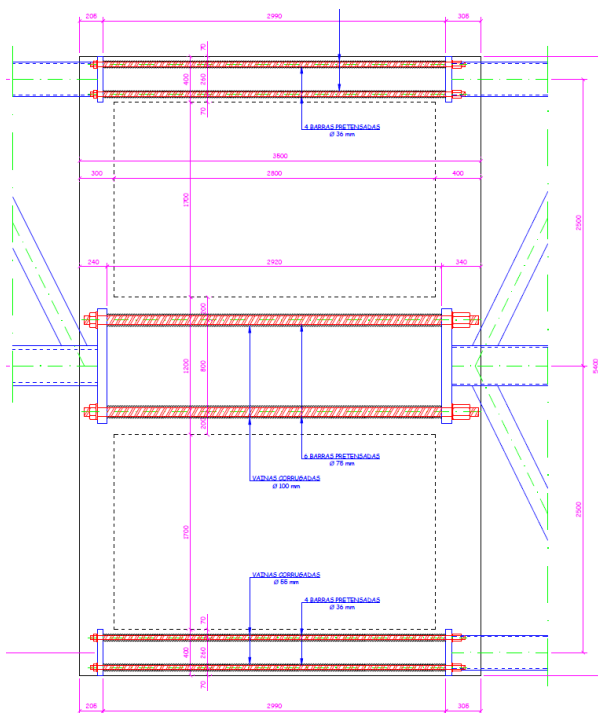


Figura 7. Vista en planta de sistema de barras de anclaje de cordón superior de celosía, rampa (izquierda) y perfiles del mirador (a la derecha).

- El anclaje del cordón inferior comprimido de la cercha se realiza con sendas chapas horizontal y vertical de 50 mm de espesor y pernos $\varnothing 20$ de acero pasivo.
- El anclaje de la viga lateral al forjado inferior de la cercha se realiza con sendas

chapas horizontal y vertical de 50 mm de espesor y pernos $\varnothing 20$ de acero pasivo.

La estructura se completa con la disposición de un estribo cargadero en coronación de la calle Ánimas, formado por una viga de 1.1 m de anchura y 6.0 m de longitud, sobre la que apoya la pasarela desmontable a través de tres neoprenos zunchados y anclados.

La torre es terminada en el exterior con fachada ventilada sin aislante interior, mediante un revestimiento de placas con diferentes orientaciones y dimensiones con finalidad estética.

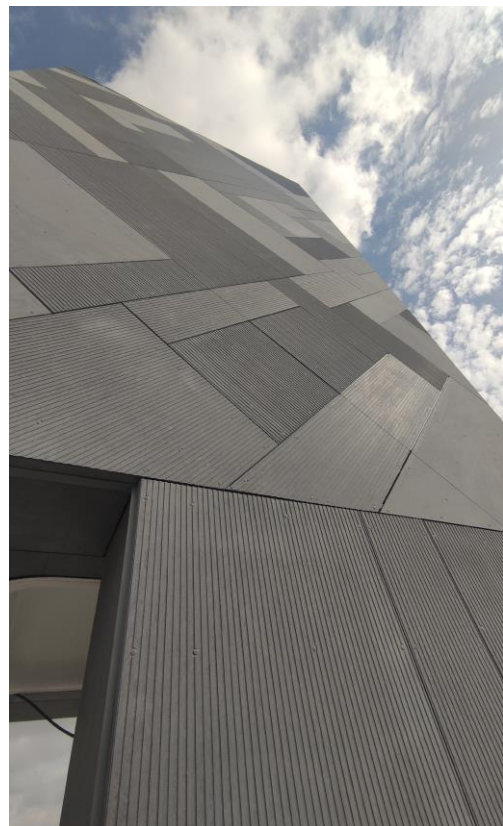


Figura 8. Detalle de acabado de fachada desde puerta de acceso a la torre.

Las mediciones de las unidades de obra principales de la estructura construida fueron las siguientes:

- Acero estructural S355 J2: 60.500 Kg.
- Micropilotes $\varnothing 220$ mm: 562 m.
- Hormigón C30/37: 300 m³.
- Acero pasivo B500SD: 32.500 Kg.
- Revestimiento fachada: 560 m².

4. Esquema de funcionamiento estructural de la pasarela

La tipología adoptada para la pasarela con celosía central de canto variable responde tanto a un criterio funcional por la necesidad de establecer dos rampas independientes de ida y vuelta a la torre, como estructural, para salvar la luz existente entre la torre y la pila intermedia.

La celosía funciona ante cargas verticales como elemento apoyado sobre la pila intermedia y empotrado en la torre, por lo que la variabilidad creciente de canto desde la pila a la torre resulta con la ley de esfuerzos de una viga apoyada en un extremo (pila) y empotrada en el otro (torre).



Figura 9. Fotografía de estructura en construcción, donde se observan las celosías de arriostramiento horizontal.

Por otro lado, al tratarse de una celosía vertical con limitación en la anchura de los perfiles, sería un elemento débil ante esfuerzos de torsión debidos a las sobrecargas verticales no centrada y las acciones horizontales de viento y sismo. Por ello, la estructura resistente se completa con celosías horizontales en planta para cada una de las rampas (ver figura 9), cuyos

perfiles se comprimen y traccionan ante los esfuerzos torsionales, liberando de éstos a la celosía central principal.

5. Procedimiento de cálculo

Para realizar el dimensionamiento de la estructura, se elaboró un modelo de cálculo global que tiene en cuenta la secuencia constructiva a efectos de determinar los esfuerzos en los distintos elementos constituyentes de la estructura.

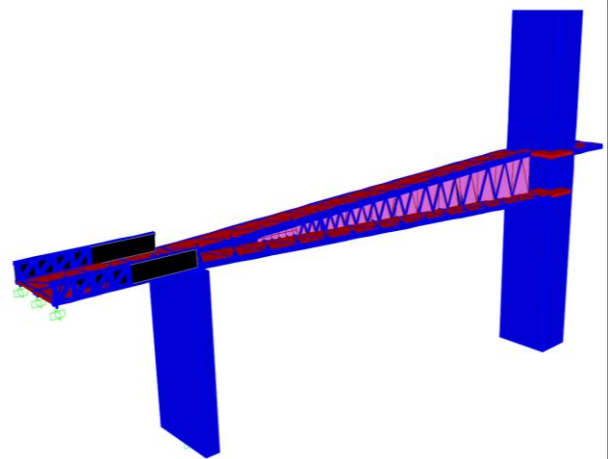
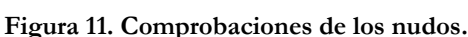
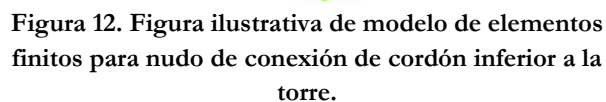


Figura 10. Imagen del modelo de cálculo general.

A partir de los esfuerzos obtenidos en diseño y servicio se realizó el dimensionamiento de los diferentes elementos estructurales.

Éste 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 [1]. Asimismo, se analizó el estado límite de servicio de deformaciones, en virtud del cual se dotó a la estructura metálica de la oportuna contraflecha constructiva.

El cálculo general de los perfiles metálicos se finaliza con las comprobaciones de los nudos [4] y elementos locales ayudándose de modelos de elementos finitos. Por facilidad constructiva, se optó por incrementar la potencia de los perfiles si las comprobaciones locales de los nudos resultaran ligeramente más desfavorables


$$C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$


A : 1 1 1

Posteriormente, tras la realización de los

complementarios, se comprueba que la estabilidad del talud del cerro se encuentra más comprometida de lo inicialmente supuesto en fase de proyecto, razón por la que se replantea la cimentación de la pila intermedia, optándose por la ejecución de un encepado de sección escalonada aproximadamente ajustada al perfil del talud, que reducía el volumen de excavación necesario, y con ello, menor afección a la seguridad del talud.

En paralelo, la estructura metálica fue construida en taller metalúrgico. En función de la disponibilidad de suministro de perfiles laminados, fue necesario realizar algunos ajustes mínimos sobre el dimensionamiento inicial.

La torre principal fue construida con encofrado trepante (figura 13). Concluida la ejecución de los alzados y una vez tesadas las barras de los elementos de conexión al forjado superior de la torre, se procedió al izado de la estructura metálica para su colocación con grúa.



Figura 13. Imagen de construcción de la torre.

El procedimiento de izado y colocación de la estructura metálica, con los medios disponibles en obra, llevó a dejar la celosía apoyada provisionalmente en el lado de la torre sin completar las soldaduras mínimas necesarias antes de desacoplarla de la grúa. Esto supuso que, frente a la acción del peso propio, no funcionase como elemento totalmente empotrado en la torre (tal y como había sido concebida), con la consecuente variación de esfuerzos y, sobre todo, de deformaciones en la pasarela.

Por ello, se realizaron los ajustes necesarios en el modelo de cálculo para analizar esta situación sobrevenida, concluyendo que se disponía de un margen suficiente de coeficientes de seguridad y que el exceso de flecha inicial podía ser absorbido con la propia contraflecha y ligeros ajustes en el espesor de la losa de hormigón del forjado. Los resultados teóricos del cálculo fueron contrastados con las mediciones tomadas in situ mediante topografía.

Finalmente, aun habiendo adoptado las medidas de control de fabricación establecidas en el pliego del proyecto, y pese a que se habían dejado ciertas holguras en las dimensiones y posición de las chapas de anclaje de la celosía en los forjados y paredes de la torre, una vez posicionada provisionalmente la celosía se comprobó que existían ligeras excentricidades entre los perfiles y algunas de las placas. Además, en algún caso particular ocurrió que la longitud del perfil no era suficiente para que quedase a tope contra la placa y realizar la soldadura directa de conexión entre ambos. Por todo ello, se requirió de un análisis de cada detalle y la implementación de soluciones particulares para resolver cada incidencia.

La construcción de la estructura finalizó con la realización de la prueba de carga estática. Se comprobó que las deformaciones reales se encontraban dentro de los límites normativos y que, como suele ser habitual, eran inferiores a las teóricas de cálculo esperadas.



Figura 14. Prueba de carga.

Durante la segunda mitad del año 2024, se ha estado trabajando en los acabados y acerados de los accesos a la torre, así como en la estabilización del talud del cerro. Aprovechando la construcción de la estructura, se realizaron controles con instalación de elementos de auscultación en distintos puntos de los taludes, en base a los que se decidió abordar de forma independiente la estabilización global de los taludes antes de la apertura al público de la pasarela y del parque ubicado en su entorno.



Figura 15. Vista de estructura desde lado del Cerro.

Referencias

- [1] Luis Viñuela Rueda, José Martínez Salcedo (2009). *Proyecto y Construcción de Puentes Metálicos y Mixtos*, Publicaciones APTA.
- [2] Miguel Aguiló (2009). *La ligereza de las Pasarelas Españolas*, Grupo ACS.
- [3] Miguel Aguiló, Javier Manterola, Mario Ozaín, Javier Rui-Wamba (2004). *Javier Manterola Armisen, Pensamiento y Obra*, Fundación Esteyco.
- [4] Comité Europeo de Normalización (2010). *Eurocódigo 3. Proyecto de estructuras de acero*, Madrid, UNE.
- [5] BOE-A-2021-13681 (2021). *Código Estructural*. Madrid, Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana.
- [6] Bueno Serrano, P. y Cerpa Niño, J. A. (2008). *Un nuevo enclave fenicio descubierto en la bahía de Cádiz: El Cerro del Castillo, Chiclana*, Revistas Científicas Universidad de Sevilla.