

Puente Nelson Mandela, la materialización de una idea

Nelson Mandela bridge, the materialization of an idea

Roberto REVILLA ANGULO

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos y
Arquitecto
r2 estudio
CEO
roberto.revilla@r2estudio.es

Patricia OLAZÁBAL HERRERO

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
INECOSA
polazabalherrero@gmail.com

Marcos J. PANTALEÓN PRIETO

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
APIA XXI
Presidente
alherrera@louisberger.com

RESUMEN

Situado en la carretera que une el puerto y el aeropuerto de Barcelona, el puente surge de la necesidad de comunicar ambos márgenes del río, superando la herida longitudinal existente y proporcionando una referencia al lugar. De un salto limpio, mediante sendos pórticos, se eleva y vuela sobre el río para retornar de nuevo a la tierra. Estructuralmente, el puente presenta una tipología de arco superior y se resuelve mediante un tablero continuo de hormigón pretensado de 304 m de longitud y 29 m de anchura de planta rectangular, materializado mediante una sucesión de cinco vanos, de luz central 104 m, luces contiguas de 55 m y luces laterales de 42 y 48 m.

ABSTRACT

Situated on the carriageway that links the port and the airport of Barcelona, the bridge was born from the need to link both banks of the river, overcoming the existence of a longitudinal rift and providing a reference point for the site. Which is supported longitudinally by two V-shaped lateral piers and a central superior arch, soars over the river bed in one clear step and returns to the earth. It presents a rectangular plan and its deck is constructed by a prestressed concrete beam 304 m long and 29 m wide. The deck is divided into five spans; the 104 metre-long main central span, two adjacent 55 m long spans, and two lateral ones 42 and 48 m long.

PALABRAS CLAVE: arco superior, pórtico, rombo espacial, lenticular, hormigón pretensado.

KEYWORDS: superior arch, V-shaped pier, spatial rhombus, lenticular, prestressed concrete.

1. Introducción

El Nuevo Puente, recientemente denominado Puente Nelson Mandela, situado en la carretera que une el puerto con el aeropuerto de Barcelona, se configura como uno de los principales accesos a la conurbación barcelonesa desde el exterior, así como eje de las comunicaciones por carretera de las zonas industriales y logísticas asociadas al área portuaria de Barcelona (Puerto y Zona Franca) y al conjunto de polígonos industriales de toda la comarca del Bajo Llobregat. Su localización cerca de la desembocadura del río Llobregat con el mar Mediterráneo (Figura 1), en una planicie cercana al Parque Agrario del Llobregat y al espacio natural protegido del Delta del Llobregat, nos sumerge en un marco geográfico de especial valor medioambiental y paisajístico.



Figura 1. Situación.

Se trata de un gran puente arco elevado que, de un salto, cruza con total limpieza el cauce del río, descansando en sendas pilas dobles inclinadas, las cuales a su vez dan continuidad a la estructura hacia ambos extremos mediante la existencia, en ambos lados, de una pila simple inclinada que, a modo de pórtico, permite dar apoyo al tablero en su tránsito hacia el estribo [1].

El puente, de planta rectangular, se resuelve mediante un tablero continuo de hormigón pretensado HP-50 [2] de 304 m de longitud y 29 m de anchura, materializado mediante una sucesión de cinco vanos, de luz central 104 m, luces contiguas de 55 m y luces laterales de 42 y 48 m (Figura 2).

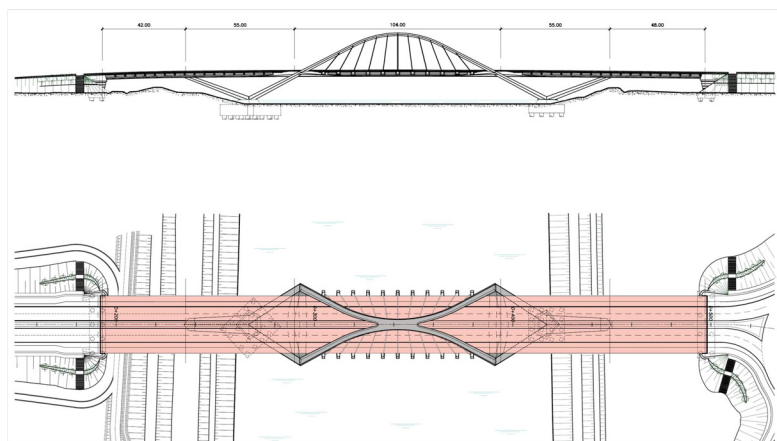


Figura 2. Alzado y planta.

2. El proyecto y su génesis

Primeramente, el río a modo de herida longitudinal, de barrera física, divide el entorno e imposibilita la comunicación transversal entre ambas márgenes y el puente surgió como superación de un obstáculo, como elemento capaz de restablecer la permeabilidad transversal en la zona. En segundo lugar, se observó la ausencia de referencias visuales en un entorno prácticamente horizontal. Por ello, el puente construyó el paisaje y cristalizó como símbolo por encima del obstáculo capaz, a través de su arco central y sendos pórticos laterales, de crear una referencia en el lugar (Figura 3).



Figura 3. Esquema del puente.

La forma adquiere un papel activo en su comportamiento estructural. A través de la continuidad y gracia de sus líneas, de la proporción de sus masas, del ritmo de sus formas y de la plasticidad del hormigón, el puente toma una forma escultórica en donde la función de resistir sigue a la forma diseñada. A través de su relación flecha/luz, y de la rigidez relativa de los diferentes elementos que lo conforman, tablero, arcos y pórticos, en esa búsqueda de la ligereza, se desarrolla una nueva relación formal.

La propuesta proyectada funde estéticamente lo funcional y lo resistente en una forma que concentra la fuerza visual asociada al arco, como elemento vertical superior, y a sendos pórticos, como elementos verticales inferiores, que conforman un alzado de máxima visibilidad, que se va difuminando hasta esa mínima presencia en la búsqueda de los estribos a través de una fina línea horizontal que difumina el alzado. A ello se suma la rica espacialidad que sendos rombos aportan al conjunto (Figura 4).



Figura 4. Vista central.

3. Diseño formal y estructural

El tablero en su vano central a través de los tirantes se integra en sendos arcos superiores inclinados lateralmente. Lo que aparentemente parece un arco atirantado por el tablero (bowstring) adquiere un comportamiento estructural mucho más complejo. Por un lado, debido a que sendos arcos tumbados, el tablero y las dobles pilas inclinadas transversalmente se encuentran monolíticamente unidos a través de una laja horizontal y de un potente diafragma transversal, que además de encargarse de dar rigidez al conjunto, conforma espacialmente la figura de un rombo que unifica su expresión formal (Figura 5).



Figura 5. Infografía de vista lateral del puente.

Y por otro lado, debido a que el arco superior mediante sendos pórticos es transformado en intermedio a través de sendas líneas tangentes que llegan a la base de las pilas materializadas por ambas pilas dobles y que mediante la reacción de la pila simple consiguen equilibrarlo.

Al fundir parte del arco con el tablero, a través de su laja horizontal y de su diafragma transversal, y darle continuidad, mediante las pilas dobles inclinadas, el pórtico supone un paso adelante en la integración funcional de todos los elementos del puente, y una mejora clara en la potencialidad resistente del tablero como viga, con la posibilidad añadida de graduar a voluntad, a través de la rigidez, el efecto de la vinculación.

4. Geología y geotecnia de las cimentaciones

Las cimentaciones de las pilas y estribos se encuadran en una zona caracterizada desde el punto de vista geológico por la presencia de depósitos cuaternarios de origen deltáico formados en la desembocadura del río Llobregat que se disponen sobre el basamento pliocénico. Dichos depósitos con espesor variable entre 75 y 100 m, son de naturaleza fluvial, deltaica y marina de gran complejidad y se pueden agrupar en tres diferentes capas. El acuífero superior formado a base de arenas y pequeñas incrustaciones de limos. El acuífero intermedio formado a base de limos, y en donde la gran presencia de agua tiene dificultades de movimiento, y el acuífero inferior formado a base de arenas gruesas y gravas [3].

La cimentación de los estribos 1 y 2 consiste en un encepado con forma de paralelepípedo de base rectangular de 8.2 y 8.8 m de longitud, de 33.8 m de anchura y de 2.3 m de canto, apoyado sobre 10 y 8 pilotes de aproximadamente 54.9 y 56.8 m de profundidad respectivamente. Los pilotes de 2 m de diámetro se encuentran empotrados como mínimo 6 m en las gravas arenosas de origen deltaico y se encuentran distribuidos en 5 y 4 filas en sentido transversal y en 2 columnas en sentido longitudinal.

Los trípodos formados por la pila simple y la pila doble se encuentran empotrados en sendos zócalos de planta pentagonal, los cuales se encuentran empotrados en las cimentaciones de las pilas 1 y 2 y de las pilas 3 y 4. Dichas cimentaciones son profundas y consisten en sendos encepados con forma de paralelepípedo de base rectangular de 23.1 m y 18.1 m de longitud, de 20.1 m y 18.1 m de anchura y de 5.7 m y 4.3 m de canto, apoyados sobre 16 y 20 pilotes de aproximadamente 48.6 m y 49.8 m de profundidad en las pilas 3 y 4 y en las pilas 1 y 2 respectivamente. Los pilotes de 2 m de diámetro se encuentran empotrados como mínimo 8 m en las gravas arenosas de origen deltaico del río Llobregat y distribuidos en 5 y 4 filas en sentido transversal y en 6 y 4 columnas en sentido longitudinal. Las diferentes dimensiones entre ambas

cimentaciones se debe a la existencia de una línea eléctrica de alta tensión bajo la cimentación de las pilas 1 y 2.

5. Pilas

Las pilas dobles 2 y 3 juntamente con las pilas simples 1 y 4 resueltas mediante hormigón HA-75 nacen de ambos zócalos troncopiramidales de sección pentagonal (Figura 6), los cuales transmiten las cargas actuantes a sendas cimentaciones.

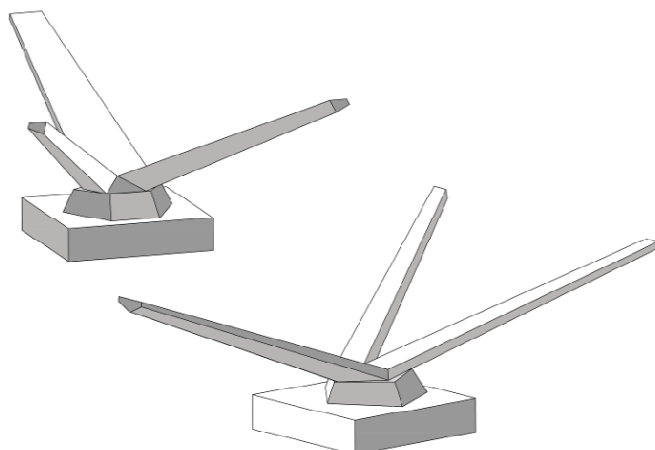


Figura 6. Perspectiva de trípod invertido.

Las pilas dobles están resueltas mediante sendas secciones transversales macizas de hormigón armado con forma trapecial esviada de canto y anchura variable, unidas en su parte inferior para dar continuidad a la pila simple, conformando una sección transversal trapecial única de anchura y canto también variables.

Las dimensiones, tanto de sendas pilas constituyentes de la pila doble como de la pila simple, disminuyen desde su arranque en el zócalo hasta su unión con sendos arcos y tablero, respectivamente. La pila simple de 34.44 m de longitud tiene un canto y una anchura de 2.94 y 9.4 m respectivamente en su arranque y de 1.89 y 6.03 m en su unión con el tablero (Figura 8). Cada una de las pilas que constituyen la pila doble de longitud 33.64 m tienen un canto y una anchura de 2.8 m y 5.17 m respectivamente en su arranque y de 1.9 m y 3.85 m en su encuentro con el arco.

6. Arcos

El vano central del puente está sustentado por dos arcos superiores inclinados lateralmente de hormigón HA-45 que nacen de sendos pares de pilas inclinadas formando dos rombos espaciales de gran expresividad formal. Ambos arcos confluyen suavemente en su parte superior mediante una pieza de unión, logrando crear una imagen de una fuerza extraordinaria, a modo de gran portalada de acceso al interior del puente.

El alzado del eje del arco viene definido por una parábola de segundo grado [5] de 104 m de luz y 18.9 m de flecha, con una relación luz/flecha de 5.5 (Figura 9). La separación transversal entre los ejes de ambos arcos viene obligada por la existencia de un gálibo vertical necesario que hay que cumplir para permitir el paso de los vehículos y de los peatones a lo largo del tablero.

Los arcos son dobles piezas curvas de sección variable en todo su desarrollo, hasta llegar a su parte central en donde forman un único arco (Figura 8). La sección tipo del arco simple es

trapezoidal esviada, con anchura superior mínima de 2.5 m y máxima de 3.5 m, ancho inferior mínimo de 2.22 m y máximo de 3.11 y canto mínimo de 1.4 m y máximo de 1.9 m.



Figura 8. Vista inferior de arcos.

Los tirantes están resueltos mediante pares de péndolas en forma de “A” que bajan desde los arcos hasta los bordes laterales del tablero, creando triangulaciones planas que obligan al arco a colaborar con el tablero en la resistencia a las cargas torsoras.

7. Tablero

La sección transversal del tablero está resuelta mediante una sección lenticular aligerada de hormigón pretensado [5] de canto constante, de valor 2.5 m a la que se añaden un conjunto de nervios transversales laterales que repetidos y espaciados 5 m en dirección longitudinal, unen y dan soporte a las losas extremas de 20 cm de espesor y 3.14 m de longitud que constituyen las aceras del puente (Figura 9).

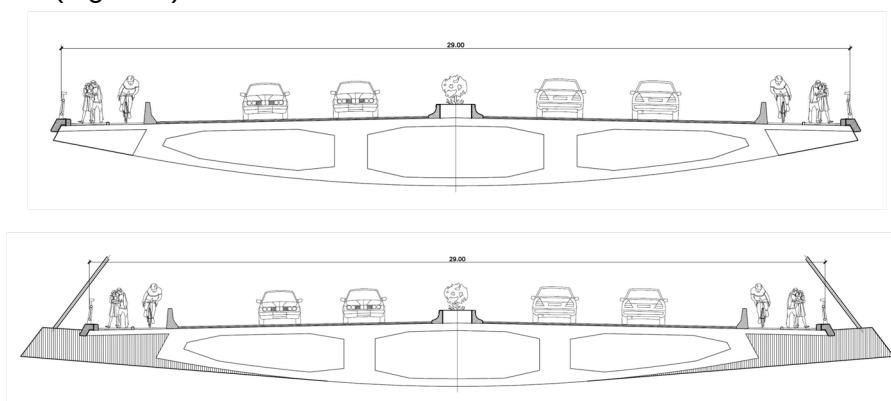


Figura 9. Secciones transversales de tablero.

El puente da cabida a 4 carriles de circulación, a dos pistas de ciclistas y a dos paseos peatonales. La existencia de péndolas inclinadas en los dos bordes del tablero, con separación transversal entre anclajes del orden de 32 m, hace necesario la existencia de piezas rígidas a flexión a modo de nervios transversales que sobresalen del tablero y que van de extremo a extremo en el interior del mismo cada 7.5 m.

El gran elemento transversal que une el tablero, las pilas y los arcos está compuesto por dos grandes piezas de hormigón. La primera pieza es la que forma el diafragma transversal que se

encuentra contenido en el plano que conforma el rombo espacial y que lo rigidiza. Tiene una anchura en sentido longitudinal de 3.96 m y su geometría es equidistante de la línea inferior del tablero de manera que su canto máximo en el plano contenido en el rombo espacial es de 8.78 m.

La segunda pieza está formada por una laja horizontal que de forma simétrica conforma en planta un rombo con dos de sus vértices coincidentes con el eje longitudinal de simetría del tablero, situados a 21 m hacia el estribo y a 27 m hacia el centro de vano, estando situado el tercer y cuarto vértice del rombo de en el nudo en el que se unen el arco con la pila doble. Se trata de una gran pieza que nace tangencialmente desde la cara inferior del tablero desde ambos extremos del rombo espacial y que progresivamente en su acercamiento al nudo de encuentro del arco y la pila doble se va macizando y aumentando su canto alcanzando una anchura transversal inferior máxima de 33.84 m y un canto máximo de 1.7 m (Figura 10).

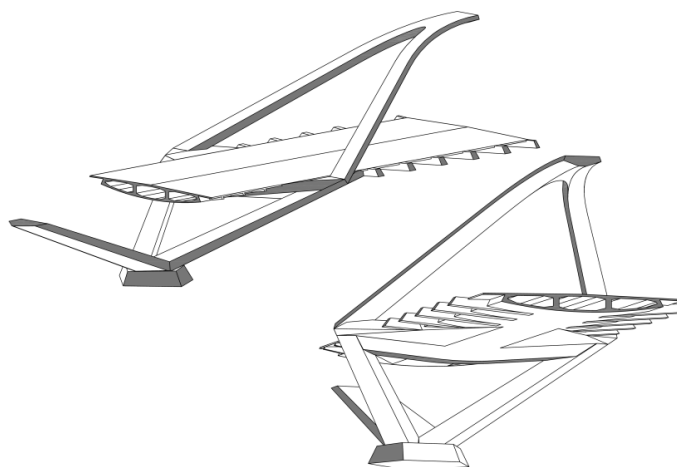


Figura 10. Perspectiva de rombo espacial, laja y diafragma transversal.

8. Análisis estructural

El puente tiene un marcado carácter transversal, debido tanto a la importante anchura de su tablero como a la presencia de sendos rombos espaciales.

Con el fin de estudiar su comportamiento transversal y la influencia de éste en el comportamiento global del puente, de manera que el modelo reprodujera fielmente el comportamiento real de la estructura, fue necesario realizar dos modelos de barras 3D y un modelo de láminas. Con el primer modelo calculamos el comportamiento longitudinal del puente y con el segundo y tercer modelo calculamos la flexión transversal del tablero. Además, el segundo modelo, con una mayor discretización que el primero, nos sirvió para poder comprobar la coincidencia en el comportamiento estructural entre estos dos primeros modelos.

Dado el carácter evolutivo del puente y por tanto, de su esquema estructural, con el primer modelo se realizó una modelización de todas y cada una de las fases constructivas. De esta manera fuimos capaces de conocer todos los esfuerzos y tensiones existentes en todas las secciones del puente a lo largo de la vida útil de la estructura (Figura 11).

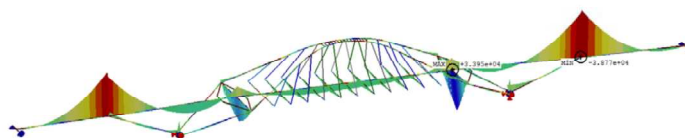


Figura 11. Modelo de cálculo de barras 3D.

9. Proceso constructivo

Para la ejecución tanto de los pilotes como del encepado y zócalo de las pilas fue necesario la ejecución de un recinto circular de aproximadamente 50 m de diámetro a base de pantallas de hormigón armado que disponían de dos anillos perimetrales (Figura 12).



Figura 12. Recinto de pantallas circular.

Paralelamente al tratamiento de los estribos con precarga, se procedió a la ejecución de la isla provisional del lado estribo 1 para, una vez construida ésta y retirada la precarga proceder a la construcción del recinto de pantallas circular de las pilas 1 y 2. Una vez ejecutados los pilotes del estribo 1 se procedió a la ejecución de los pilotes provisionales situados en el vano central necesarios para la construcción del tablero y el arco.

Posteriormente, se ejecutó el encepado y alzado del estribo 1, el encepado, zócalo y alzado de las pilas 1 y 2 y las vigas de apoyo en cada una de las 3 filas de pilotes provisionales. Tanto la pila simple como las pilas dobles fueron hormigonadas de una sola vez.

Más tarde, se ejecutó la fase lateral del tablero del lado del estribo 1 mediante cimbra cuajada, correspondiente a los 42 m del vano 1, a los 55 m del vano 2 y a los primeros 34 m del vano central. Posteriormente, una vez descimbrado la fase lateral del tablero del lado estribo 1 se retiró la isla provisional existente y se ejecutó la isla provisional del lado estribo 2. Una vez construida esta, se procedió a la retirada de la precarga del estribo 2, a la ejecución del recinto apantallado circular y a la construcción de los pilotes, del encepado y del alzado del estribo 2, así como de los pilotes, encepado, zócalo y fustes de las pilas 3 y 4. Posteriormente, se ejecutó el terraplén de acceso a dicho estribo y se colocó la escollera de protección en la cimentación de las pilas 3 y 4 (Figura 13).



Figura 13. Vista de fase constructiva.

Posteriormente se ejecutó la fase lateral del tablero del lado del estribo 2 mediante cimbra cuajada, correspondiente a los 48 m del vano 5, a los 55 m del vano 4 y a los 34 m finales del vano central. Posteriormente, se colocó la cimbra aporticada del vano central apoyada sobre las vigas y pilotes provisionales y se procedió a la ejecución de los 36 m centrales del tablero que quedaban por construir. Una vez finalizado el tablero, se procedió a la ejecución de sendos arcos centrales, para una vez ejecutados éstos, colocar los tirantes de ambos arcos, proceder a su primer tesado con el fin de poder retirar la cimbra aporticada, colocar el firme, las barreras laterales y central, y realizar los acabados. Finalmente, se procedió al tesado definitivo de los tirantes de ambos arcos (Figura 14).

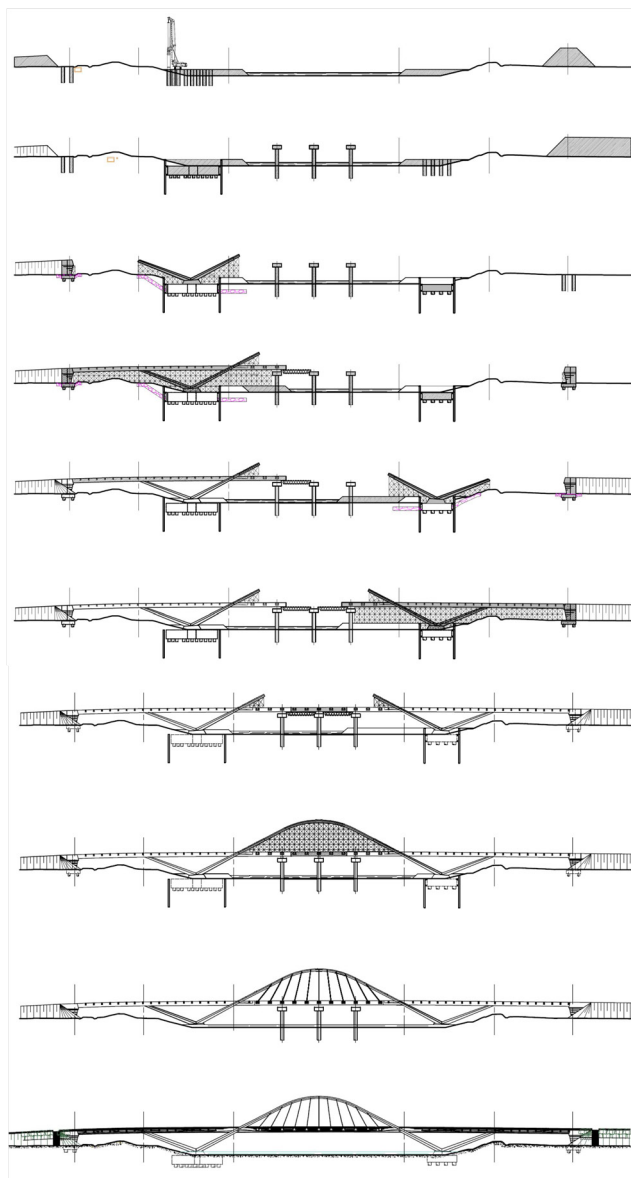


Figura 14. Fases constructivas.

10. Conclusiones

Conscientes del entorno en el que nos encontrábamos, la estética se erigió como clave y guía del diseño. El puente se visualiza como un elemento arquitectónico y como un eje de comunicación transversal que salva la barrera física del río y que crea una referencia en el lugar. La forma adquiere un papel activo en su comportamiento estructural, con la posibilidad añadida de graduar

a voluntad, a través de la rigidez, el efecto de la vinculación entre los distintos elementos. Lo que aparentemente parece un arco atirantado por el tablero (bowstring) adquiere un comportamiento estructural mucho más complejo debido por un lado, a la unión monolítica entre arcos, tablero y pilas dobles, que conforma espacialmente la figura de un rombo y por otro lado, a que sendos pórticos, transforman el arco superior en intermedio, a través de sendas líneas tangentes que llegan a la base de las pilas materializadas por sendas pilas dobles (Figura 15).



Figura 15. Vista lateral.

Agradecimientos

Propiedad

GISA (Gestió d'Infraestructures. Generalitat de Catalunya)

Emilio Martinez Lozano

Autores del proyecto

Roberto Revilla Angulo

Patricia Olazábal Herrero

Marcos J. Pantaleón Prieto. APIA XXI, S.A.

Asistencia Técnica

Enginyeria Reventos

Saem Enginyeria

Empresa constructora

COPIA

Referencias

- [1] L. Fernández Troyano, Tierra sobre el agua: Visión Histórica Universal de los Puentes. Colegio de Ingenieros de Caminos, Madrid, 2004.
- [2] J. Manterola, Puentes: apuntes para su diseño, cálculo y construcción. Colegio de Ingenieros de Caminos, Madrid, 2006.
- [3] Dirección General de Carreteras, Guía de cimentaciones en Obras de carretera, Ministerio de Fomento, 2003.
- [4] J. Torres, J.J. Arenas de Pablo, D. Lorenzo, J. Díaz del Valle, A.J. Santamaría, Tipología, Arcos, Funicularidad. E.T.S.I.C.C.P., Santander 1989.
- [5] F. Leonhardt, Estructuras de Hormigón Armado y Pretensado. Tomos I, II, III, IV, V y VI, Librería "El Ateneo", 1980.