

Original

Concepción general e innovaciones en la construcción del Puente de la Constitución de 1812 sobre la Bahía de Cádiz

Innovations and conceptual approach to the construction of the Constitución de 1812 Bridge over the Cadiz Bay

Luis Miguel Viartola Laborda*, Daniel Paunero Alonso, Víctor Manuel Jiménez Aguadero y José María Morejón López

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Dragados, S.A., Madrid, España

Recibido el 2 de diciembre de 2015; aceptado el 29 de enero de 2016

Disponible en Internet el 13 de julio de 2016

Resumen

El Puente de la Constitución de 1812 sobre la bahía de Cádiz puede considerarse, desde el punto de vista constructivo, como la sucesión de 4 puentes independientes. Entre ellos destaca el puente atirantado, con unas dimensiones que superan a cualquier puente construido hasta la fecha en nuestro país. Estas grandes dimensiones, junto con la ubicación de una parte importante del puente sobre el mar, condicionan la elección de los procedimientos constructivos, así como los medios y equipamientos especiales necesarios para llevarlos a cabo. En el artículo se describe el planteamiento general de la construcción del puente, destacando alguna de las operaciones singulares llevadas a cabo y su control, así como las innovaciones introducidas en los equipos y procesos utilizados.

© 2016 Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural (ACHE). Publicado por Elsevier España, S.L.U. Todos los derechos reservados.

Palabras clave: Procedimiento constructivo; Innovación; Equipos especiales de construcción; Izado de grandes cargas; Construcción por voladizos sucesivos; Tablero empujado; Puente atirantado

Abstract

The 1812 Constitution Bridge over Cadiz Bay can be considered, from a construction point of view, as a succession of four separate bridges. These include the cable-stayed bridge with dimensions that exceed any bridge built to date in our country. This large size together with the location of a significant part of the bridge over the sea, influence the choice of construction procedures and the special means and equipment necessary to carry them out. The article describes the general approach of the bridge construction, highlighting some of the special operations carried out and their control, as well as innovations both in processes and equipment.

© 2016 Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural (ACHE). Published by Elsevier España, S.L.U. All rights reserved.

Keywords: Construction procedure; Innovation; Temporary works; Heavy lifting; Free cantilever construction; Launched deck; Cable stayed bridge

1. Introducción

La construcción de un puente como el de la Constitución de 1812, sobre la bahía de Cádiz, constituye un estímulo de primer

orden para cualquier profesional que forme parte del equipo que tiene que enfrentarse al reto de levantar una estructura de más de 3 km de longitud, de los cuales una parte importante discurre sobre el mar.

El puente está descrito detalladamente en otros artículos [1–7] de este número especial que le dedica la revista HORMIGÓN Y ACERO, al igual que los procedimientos constructivos utilizados para su construcción. Por tanto, este artículo está enfocado

* Autor para correspondencia.

Correo electrónico: lviartola@dragados.com (L.M. Viartola Laborda).



Figura 1. Tramos terrestre y marítimo.

únicamente a la concepción general de su proceso de construcción, destacando alguna de las innovaciones desarrolladas en él.

Por su influencia sobre el proceso constructivo cabría destacar que sus 3.092 m de longitud, pueden dividirse en 2 partes: la parte terrestre y la marítima, que se introduce en tierra como parte del puente atirantado (fig. 1). El tramo terrestre del puente está formado por un tablero de hormigón con 2 secciones transversales diferentes en función de la luz de los vanos: una losa aligerada para las luces cortas, de hasta 40 m, y una viga cajón para el resto, con una luz típica de 75 m. Mientras que el tramo sobre el mar, el más relevante del puente, está dividido, a su vez, en 3 secciones diferentes: un puente mixto que constituye el acceso desde Cádiz, el tramo desmontable y, finalmente, el puente atirantado (fig. 2).

Quizá uno de los aspectos más destacables de su diseño sea el haber logrado unificar formalmente un puente de estas dimensiones, con condiciones de contorno muy distintas dependiendo de los tramos. Por tanto, nos encontramos con un puente que en realidad engloba 4 puentes totalmente distintos, con

peculiaridades cada uno de ellos sobre todo en lo que respecta a su procedimiento constructivo.

De ahí que, en la etapa de construcción, cada uno de estos 4 puentes se ha abordado de una manera independiente, atendiendo a su tipología, a su ubicación, tratando de independizar, en la medida de lo posible, la construcción de los condicionantes que impone la presencia del mar, y buscando una adecuada elección y utilización de recursos.

2. Planteamiento general de la construcción

Como se ha comentado anteriormente, una descripción detallada de todos los procesos constructivos utilizados en el puente se puede ver en otros artículos de este número monográfico [1–7]. No obstante, a continuación se incluye, a modo de resumen, una breve descripción de los mismos.

Como nota común a todos ellos, la idea que ha guiado su elección ha sido la de tratar de independizar, en la medida de lo posible, la construcción del tablero de los condicionantes que impone la ubicación de la obra en el mar. Así, para el acceso desde



Figura 2. Tramo marítimo.

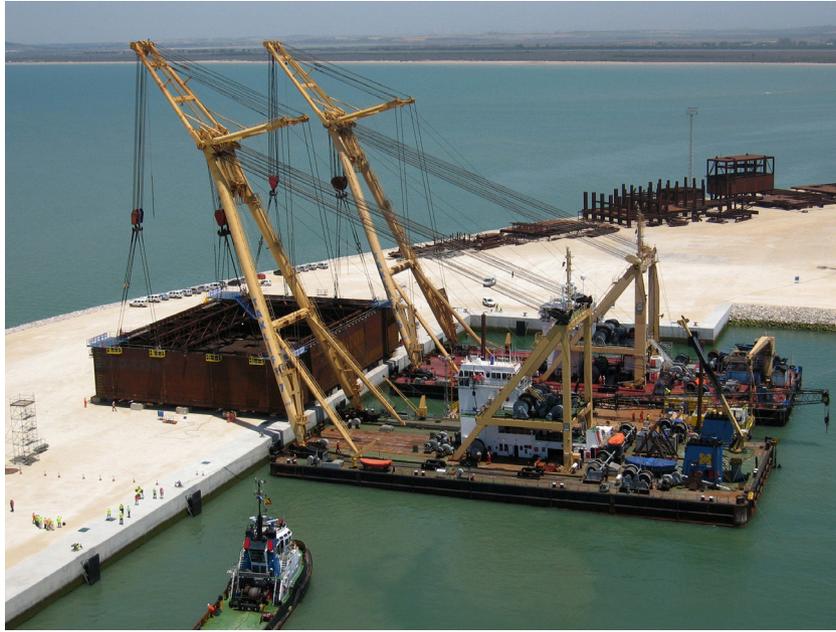


Figura 3. Carga del recinto estanco para la cimentación del pilono situado en el mar.

Cádiz se ha optado por el procedimiento de empuje, donde el tablero se va conformando en un parque de ensamblaje ubicado en tierra. En el caso del tramo desmontable, se diseñó el izado completo del tablero, que previamente había sido fabricado en tierra en las instalaciones de Dragados Off-Shore. Por último, para el tramo atirantado, se propuso el método de los voladizos sucesivos que, además de ser el habitual para este tipo de estructuras, como se verá posteriormente, permite la fabricación de las dovelas del tablero en parques industriales fijos y completarlas a pie de obra, dejando únicamente, como maniobra marítima, el aprovisionamiento de las dovelas a los carros de izado.

2.1. Cimentaciones

La cimentación es elemento clave en la construcción de un puente, sobre todo en un entorno marítimo, y quizá el aspecto más destacable de estas cimentaciones marinas fue el sistema de cajones metálicos desarrollado para materializar los recintos estancos para su construcción [1]. De todos ellos, el cajón usado en el pilono situado en el mar es el que merece especial atención. Si bien el diseño conceptual es el mismo que en el de las otras pilas, sus grandes dimensiones (49,3 m de ancho, 37,3 m de largo y 9.1 m de alto) requirieron el uso de 2 grúas flotantes trabajando en paralelo capaces de colocar el cajón metálico, de 1.300 t de peso, a través de los 48 pilotes perforados previamente desde una pontona (fig. 3).

2.2. Puente de acceso lado tierra

Los vanos de acceso desde tierra se resuelven con un tablero de hormigón pretensado con 2 secciones transversales diferentes, dependiendo de la luz del vano. Tanto en la sección en losa aligerada como en la sección cajón, el procedimiento constructivo utilizado fue convencional, recurriendo al uso cimbras. En

la sección cajón la construcción se dividió en 2 etapas. Una primera usando cimbra, solo en el núcleo central de la sección, para reducir las cimentaciones profundas necesarias por la presencia de suelos blandos bajo el viaducto. Y una segunda etapa en la que se construían las alas laterales con la ayuda de un carro de encofrado (fig. 4) que se deslizaba sobre la zona central de la sección ya construida [2].

2.3. Puente de acceso lado mar

El tablero de los vanos de acceso desde Cádiz se construyó a través del procedimiento de empuje, lo que permitió independizar su construcción del entorno marítimo (fig. 5) [3]. La parte metálica de la sección transversal se ensamblaba en un parque de montaje ocupando una península artificial. El proceso de lanzamiento, secuencial, se completó en 9 etapas y requirió la ayuda de un mástil de atirantamiento provisional, para controlar las flecciones durante la operación y permitir el remonte del voladizo en los pasos sobre pilas. Una vez colocada la parte metálica de la sección, se procedió a la construcción de la losa superior de hormigón, para la que se recurrió a prelosas prefabricadas colaborantes.

2.4. Puente desmontable

El tramo desmontable es totalmente metálico y se construyó en las instalaciones que Dragados Off-Shore tiene en las proximidades de la obra. La pieza, de 150 m de luz y 35,20 m de ancho, 8 m de canto máximo y 4.000 t de peso, se trasladó por medio de unos carros de ruedas hasta el muelle, donde se embarcó en una pontona que la llevó a la parte inferior de la vertical de su posición definitiva, desde donde fue izada por 2 equipos de gateo, situados en cada una de las pilas sobre las que descansaría dicho vano desmontable [4].



Figura 4. Tablero de hormigón. Carro de encofrado de segunda fase.

2.5. Puente atirantado

Desde que se utilizara por primera vez a finales del siglo XIX en el Puente de San Luis sobre el río Mississippi para construir sus 3 arcos, el procedimiento de voladizos sucesivos sigue siendo, hoy día, el método más usado para la construcción del tablero en la mayoría de los grandes puentes; sobre todo para sus vanos principales.

Se trata, por tanto, de un procedimiento muy conocido que evita el uso de una gran cantidad de elementos auxiliares, entre ellos las cimbras y apeos intermedios, y que además no serían viables en muchos casos como este, en el que el puente se sitúa sobre una ruta marítima, permitiendo industrializar la construcción del tablero con la ayuda, en este caso, de unos carros de

izado. Este procedimiento también permite independizar en gran medida la construcción del tablero de la presencia del mar, donde la interferencia solo se produce en la maniobra de aprovisionamiento de dovelas.

El montaje de las dovelas de arranque, necesarias para generar la plataforma sobre la que posicionar los carros de izado, y el montaje de estos últimos, se realizó con una grúa móvil sobre orugas, en el pilono lado tierra, y una cabria sobre pontona, en el pilono lado mar; usando adicionalmente una serie de equipos especiales desarrollados específicamente para asegurar el posicionamiento de las dovelas de arranque con precisión milimétrica y el correcto acople entre piezas sucesivas.

Se utilizaron 4 unidades de carros para la construcción del puente, esto es, una pareja de carros por cada pilono, lo que



Figura 5. Puente de acceso desde Cádiz. Proceso de empuje de la parte metálica.



Figura 6. Operación de izado de una dovela típica.

generaba 4 frentes de trabajo. Los 2 frentes que arrancaban de un mismo pilono estaban condicionados entre sí para limitar los desequilibrios en la base de dichos pilonos durante la etapa constructiva.

Las dovelas se transportaban hasta la vertical de su posición definitiva por medio de una pontona, a excepción del tramo de tablero sobre tierra, en el que eran transportadas por medio de un carro de ruedas. Una vez situadas en la vertical, se trincaban con el carro de izado y se iniciaba la operación de izado (fig. 6). El izado de dovelas se sucedía cíclicamente con un procedimiento perfectamente programado [5], en el que hubo que incluir una serie de operaciones singulares: las correspondientes al paso sobre las 2 pilas adyacentes a los pilonos y los 3 cierres del

tablero: los 2 de sus extremos y el cierre del vano principal [6]. Todas estas operaciones se diseñaron de forma que pudieran asimilarse, en su mayor parte, a una operación típica de montaje de dovela y, por tanto, se llevaron a cabo utilizando los mismos medios de elevación ya disponibles en obra sin necesidad de recurrir a otros adicionales.

Esta breve descripción pone de manifiesto la gran cantidad de singularidades que es necesario atender en un procedimiento que, a priori, parece totalmente industrializado y repetitivo. El éxito radica en que estas operaciones singulares puedan asimilarse, en la mayor medida posible, a las operaciones estandarizadas para las que han sido diseñados los principales medios especiales. Y también lo complementario, que estos medios especiales no se diseñen limitados a la operación principal o típica, sino que permitan su adaptación a todas esas operaciones especiales. En la figura 7 se aprecia la maniobra de elevación de uno de los cierres laterales, para la que se usaron conjuntamente el carro de izado y uno de los equipos que había servido para el izado del tramo desmontable contiguo.

Finalmente, y después de haber izado 63 dovelas e instalado 176 tirantes, se completó el tablero del puente atirantado transcurridos 2 años desde que se colocara la primera dovela, lo que se traduce en un ciclo de 18 días laborables por dovela, de 20 m de longitud típica, en una zona con vientos casi constantes.

3. Aplicación de recursos

La planificación de una obra de estas características es siempre una tarea muy exigente que requiere la aplicación de una ingente cantidad de recursos, tanto no operacionales como de operación, recursos que hay que aplicar de forma ordenada y eficiente. Entre los recursos no operacionales destacan los materiales constitutivos que forman parte de la estructura terminada, mientras que entre los recursos de operación se engloban todos aquellos necesarios para que dichos materiales



Figura 7. Cierre lateral con el puente desmontable.

constitutivos ocupen su lugar definitivo en la estructura, y que en esencia son la mano de obra, la maquinaria, los medios auxiliares y otros equipos especiales.

Las cantidades de materiales constitutivos utilizados en la obra (122.415 m³ de hormigón, 29.600 t en acero pasivo, más de 2.000 t en acero de pretensado, 2.100 t en tirantes o más de 37.000 t en acero estructural, estas últimas las mayores utilizadas en una estructura en España) exigieron un estricto plan de aprovisionamiento, con diversas fuentes de suministro de materiales y productos, además de la instalación en obra de las plantas de fabricación de materiales y talleres de ensamblaje de estructura metálica, entre otros.

Pero en cuanto a los recursos aplicados en el puente, y a pesar de todas estas cantidades de materiales, la mayor importancia ha sido para los recursos de operación empleados durante la fase de construcción. Es sabido que cuanto mayor es la importancia de una obra, mayor es la relevancia que los recursos de operación tienen sobre los materiales constitutivos. Así ha sido también en este caso. Sirva de ejemplo que, si bien el puente tiene un total de 37.000 t de acero en el tablero, solo los equipos especiales diseñados específicamente para la construcción, como por ejemplo los carros de izado o recintos estancos de cimentación, representan más de 5.000 t.

Atendiendo a la particularidad de esta obra, que puede considerarse como la integración en una sola estructura de 4 puentes distintos, los estudios de planificación siempre tuvieron en cuenta la posibilidad que ofrecía para simultanear distintos frentes de trabajo. Esto es debido a que estos frentes de trabajo podían desarrollarse sin apenas interferencias entre sí, al estar actuando cada uno de ellos en diferentes zonas del puente. Esta es una posibilidad muy superior a la que ofrecen otras obras. Así, se han mantenido, durante un periodo importante de la obra y de forma continuada, varios frentes de trabajo. Sirva como muestra el que en la fase final de construcción del tablero coexistieron 7 frentes de trabajo activos: los tableros de los 2 pilonos, el tramo empujado desde Cádiz, el tramo desmontable y 2 frentes en el tramo de hormigón, uno de ellos doble. Todos estos frentes se subdividían, adicionalmente, en varios tajos o tareas, y estaban dotados con sus propios recursos de operación.

Entre todos los recursos de operación aplicados en esta obra, el que ha tenido un papel más relevante ha sido el equipo humano. Una obra de este nivel de exigencia no puede llevarse a cabo si no hay detrás un equipo de profesionales que conjuguen capacidad técnica y experiencia, ambas necesarias para afrontar los muchos retos que se suceden durante todo el proceso constructivo. Permítanme afirmar que este puente ha contado con esos profesionales, integrando un único equipo formado, a su vez, por la suma de los excelentes equipos que han puesto a disposición de esta obra la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento, las empresas de ingeniería involucradas en las labores de proyecto, de su desarrollo y su control, y la propia constructora, junto con las empresas especializadas que han colaborado en la construcción. Hasta 1.000 personas han trabajado simultáneamente en la obra en periodos prolongados, con una media de 600 personas durante toda la duración de la obra.

Entre la maquinaria y los medios movilizados, cabría señalar las grúas torre de 200 m de altura que han acompañado a los

pilonos en su construcción, las grúas móviles para la elevación de las dovelas de arranque y de los carros del pilono situado en tierra, o los carros de transporte terrestre para dovelas, destacando los ejes de ruedas empleados para el transporte del tramo desmontable.

Por la situación de la obra ha sido necesario movilizar un buen número de medios marítimos para la ejecución de las cimentaciones, para el transporte e izado de grandes cargas, o para el aprovisionamiento de materiales. Adicionalmente, los medios marítimos especiales que se han utilizado en la obra, como por ejemplo las cabrias de 2.000 t de capacidad utilizadas para el transporte y la instalación del recinto estanco de la cimentación del pilono situado en el mar, o las utilizadas en el izado de las dovelas de arranque y de los carros de dicho pilono tienen, por lo general, ventanas para su disposición muy limitadas (fig. 8). Su empleo se programa con muchos meses de antelación, lo que los convierte en recursos muy rígidos para su implantación en el plan de obra, que obligan a otros medios y tareas a estar terminados en esas determinadas fechas en las que se ha previsto la llegada de estos equipos especiales, pues un retraso en estas tareas previas puede consumir la ventana temporal disponible para el equipo especial, y esperar a la siguiente acarrearía un retraso de meses en la obra.

También hay que hacer referencia entre los recursos de operación a los equipos especiales diseñados específicamente para esta obra, como los carros de izado de dovelas y otros muchos sistemas de acople entre dovelas, de gateo o de transporte, alguno de los cuales se describe posteriormente [7].

4. Desarrollo del proyecto

En los grandes puentes, en los que se recurre por lo general a procedimientos constructivos evolutivos, es quizá donde más claramente se pone de manifiesto la íntima relación que existe entre el proyecto de un puente y su proceso de construcción, y cómo el primero no puede definirse de forma completa hasta que el segundo no se ha desarrollado con el nivel de detalle necesario.

La construcción evolutiva aplicada en este puente, y la entidad de los elementos auxiliares y medios especiales necesarios para el montaje de la estructura, inducen en la misma unos esfuerzos, de carácter global y local, que condicionaban el dimensionamiento de la estructura y la necesidad de reforzarla localmente. Por tanto, la situación de construcción ha sido en muchos aspectos más limitativa del diseño que la etapa de servicio, una vez que el puente está totalmente acabado. Y lo ha sido, tanto a nivel global como a nivel local, pues no hay más que analizar las solicitudes inducidas en los pilonos por los enormes voladizos del puente durante la construcción del tablero, o por la hipótesis de la caída de una dovela durante la operación de izado, que siempre hay que contemplar en matriz de riesgos para la etapa constructiva, o los esfuerzos locales que introduce la acción del carro en la dovela sobre la que se apoya, bien por sí solo, o durante la maniobra de elevación de una dovela, que son muy superiores a los que introduciría todo el tren de cargas, vehículos pesados incluidos, recogido en la instrucción de acciones vigente.



Figura 8. Colocación de dovelas de arranque sobre el pilono situado en el mar con la ayuda de una cabria.

Con estos condicionantes, y para no sobredimensionar la estructura innecesariamente durante la fase de construcción, se llevó a cabo un estudio detenido del proceso constructivo, que se ha dividido y ordenado en etapas. Se trata de conciliar el dimensionamiento de la estructura en el esquema estático definitivo, el óptimo en cuanto a la aplicación de materiales, pues es el que menor cantidad requiere, con el dimensionamiento que sería necesario para resistir en las distintas etapas constructivas, y el uso de unos medios de operación racionales.

Esta limitación se ha tenido en cuenta en el diseño de las operaciones más importantes y repetitivas dentro del proceso de construcción del puente. Un ejemplo lo constituye el izado de las dovelas, que hubo de hacerse en 2 etapas, izando primero la parte metálica y en una segunda fase la losa de hormigón. Sin las restricciones resistentes en la estructura, como la capacidad resistente de base del pilono o el propio tablero donde apoyaban los carros, podrían haberse abordado en una única etapa con la dovela ya completa, incluyendo la losa de hormigón, lo que habría sido más eficiente desde el punto constructivo.

Por tanto, la consideración de la etapa constructiva es determinante en el dimensionamiento de la estructura, y viceversa, de ahí que durante la construcción de este puente haya habido, desde el primer día hasta el último, una labor constante de ingeniería que no terminó hasta que se colocó el último elemento de la plataforma.

5. Innovación

Un puente como este, que no se había construido hasta la fecha en nuestro país, obliga necesariamente a usar procedimientos constructivos y medios y equipamientos especiales que hasta ahora no se habían utilizado o, en el caso de haberlo sido, fueron utilizados en una escala menor. De hecho, y como el fac-

tor escala es determinante en cualquier actividad de ingeniería, las dimensiones de este puente y su escala han obligado a redefinir y modificar algunos de los procesos y equipos especiales que hasta ahora habían sido válidos en puentes más pequeños.

Una actitud innovadora es fundamental para abordar el proceso constructivo de un puente innovador. El Puente de la Constitución de 1812 sobre la bahía de Cádiz lo es en muchos aspectos, tanto en la tipología estructural de alguno de sus tramos como, sobre todo, por sus dimensiones, que lo colocan a la cabeza de los puentes españoles y en tercer lugar entre los puentes europeos de su tipo.

Varias han sido las actividades que han requerido de dicha capacidad de innovación, que se ha aplicado tanto al desarrollo de materiales, como al de equipos especiales y procedimientos de ejecución.

En los materiales, podría destacarse el desarrollo de un hormigón sumergido para su uso estructural en sección mixta hormigón y acero, y que se empleó en las losas inferiores de los recintos estancos para la construcción de las cimentaciones de las pilas sobre el mar. Es la primera vez que se ha utilizado en nuestro país y abre la puerta a su uso posterior, no solo en estructuras temporales [8].

Entre los procesos de construcción han sido muchas las actividades llevadas a cabo por primera vez, y no solo en nuestro país. Se podrían destacar el sistema de recintos estancos para la cimentación de las pilas marinas, o el transporte e izado del tramo desmontable a más de 60 m de altura (fig. 9).

Dentro del tramo atirantado, también han sido varias las operaciones desarrolladas específicamente para este puente, pudiendo señalar los pasos de pila en los vanos laterales y los cierres, tanto de los extremos como del vano principal. En este último caso se realizó una operación previa de desplazamiento horizontal de 15 cm del conjunto tablero-tirantes del pilono lado



Figura 9. Vista del puente desmontable previa a la operación de izado.

mar para permitir hacer la operación de colocación del carrete de cierre sin riesgo de contacto con el extremo del voladizo lado tierra. Todas estas operaciones están descritas con detalle en los artículos que se incluyen en este número monográfico [6].

Y en cuanto a los equipos, además de la utilización de grandes medios auxiliares ya existentes en el mercado, tanto terrestres como marítimos, cabe mencionar el diseño y construcción de otros medios especiales específicos para esta obra, ya citados anteriormente. Es el caso de las estructuras especiales diseñadas para el ajuste de las primeras dovelas en ausencia de los carros de izado de dovelas (fig. 10), o estos mismos carros que fueron diseñados para izar tanto la dovela metálica como las losas prefabricadas que conformaban la losa superior del tablero, en 2 etapas y con el carro estacionado. Las dimensiones y el

peso de las piezas a elevar (la longitud de la dovela típica fue de 20 m, con un máximo de 27 m, y un peso de hasta 400 t) hicieron de estos elementos estructuras muy relevantes por sí mismas, con un peso de 500 t cada unidad (fig. 11) [7].

6. Control de la ejecución

Hoy en día es frecuente que los grandes puentes se instrumenten y monitoricen durante la etapa constructiva, para poder hacer un adecuado seguimiento de su comportamiento. En el puente de Cádiz, se prestó desde el inicio una especial atención a su instrumentación, pues, como toda estructura evolutiva, conocer los datos de la respuesta del puente tras una determinada operación es decisivo para anticipar las medidas a tomar en las operaciones



Figura 10. Elemento especial para colocación de dovelas iniciales.

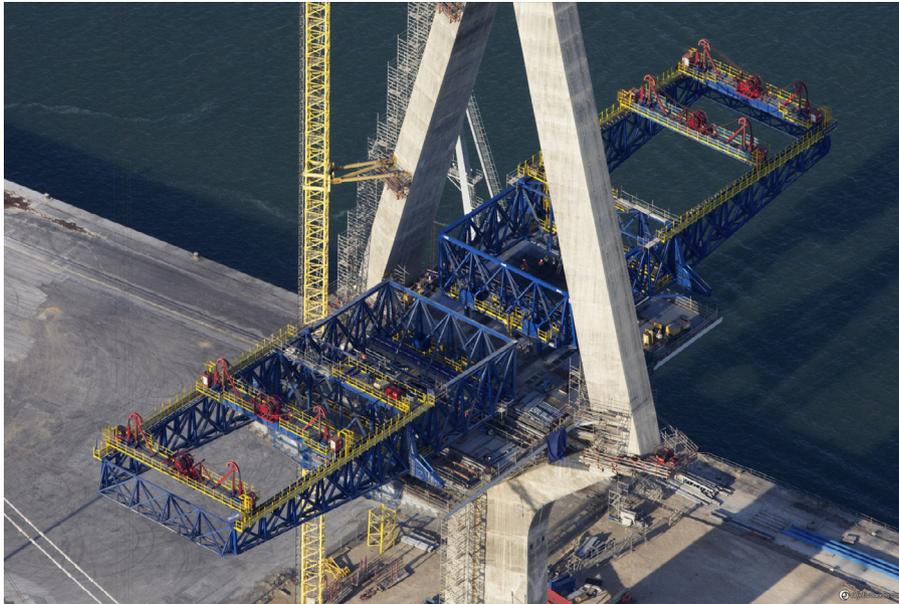


Figura 11. Carros de izado sobre el pilono situado en tierra.

siguientes. La monitorización del puente y su seguimiento han sido 2 pilares básicos del control de la ejecución [9].

El diseño de los vanos laterales, con una única pila intermedia separada 200 m del pilono, obligaba a su construcción mediante voladizos compensados, y no voladizos simples, que habría sido más sencillo, como por otro lado es bastante frecuente en los grandes puentes atirantados, en los que los vanos laterales están apoyados en varias pilas. Por tanto, los voladizos de la fase constructiva llegaron a ser de 200 m de longitud en ménsula libre, hasta que el vano lateral alcanzó la pila intermedia, momento a partir del cual el voladizo principal se estabilizaba sustancialmente para seguir creciendo hasta los 270 m previos al cierre.

Estas dimensiones dan una idea de la gran flexibilidad del tramo atirantado en fase constructiva, que llegaba a descender hasta 2 m en punta, durante la operación de izado de dovela.

Por ello, se llevó en todo momento una secuencia ordenada de construcción en la que estaba caracterizada la estructura en cada una de las etapas, e inventariados todos los elementos que gravitaban sobre el tablero, tanto en peso como en posición (fig. 12). Se controlaban todos los elementos de la plataforma: bobinas de cordones para tirantes, grupos generadores, acopios y cualquier otro elemento, pues eran cargas capaces de provocar desplazamientos verticales apreciables, que había que tener en cuenta para verificar el adecuado comportamiento de la estructura en

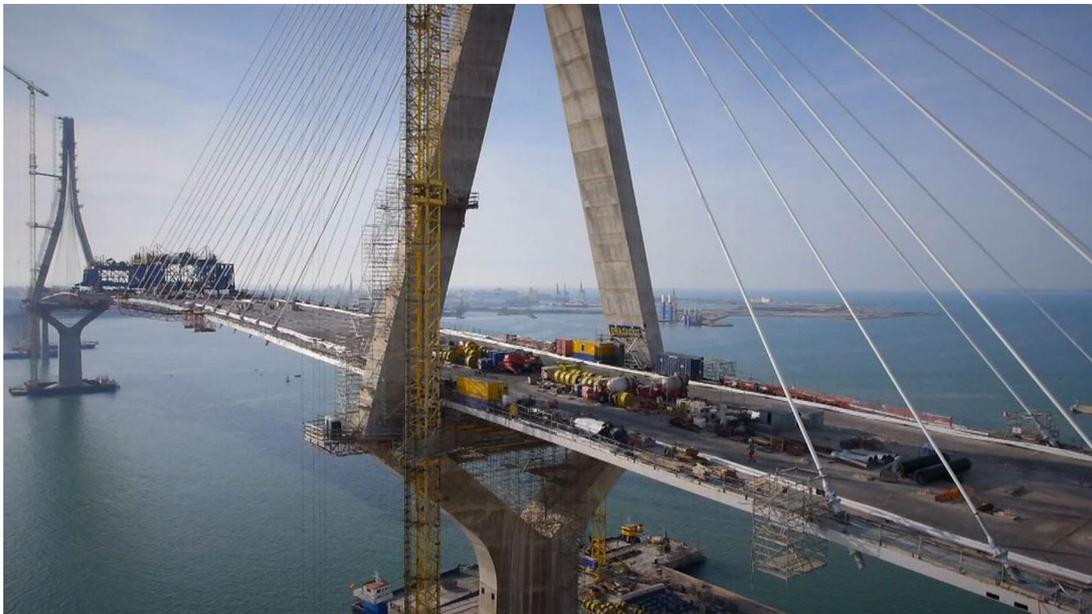


Figura 12. Ubicación de las cargas sobre el tablero durante el proceso de construcción.



Figura 13. Vista general del puente.

cada fase. Huelga decir que el control geométrico de la estructura durante la construcción ha sido muy intenso [10].

También lo ha sido el control de las cargas de todas las dovelas y grandes piezas. O determinar el centro de gravedad de estas piezas, donde se puede destacar el del tramo desmontable, necesario para verificar la seguridad de las maniobras de transporte terrestre y marítimo y su posterior izado.

El control de los materiales, por la cantidad y la variedad de los utilizados en este puente, ha sido también continua durante toda la fase de ejecución, destacando los más de 13.000 series de probetas de hormigón ensayadas, o los también numerosísimos ensayos de soldaduras, barras de acero pasivo, cordones de pretensado y tirantes [11].

Otro aspecto importante del control de la ejecución es diseñar las operaciones de forma que se controlen los riesgos inherentes al proceso constructivo, tratando de eliminar estos riesgos o, en su defecto, minimizarlos. Así, por ejemplo, todas las operaciones de elevación, donde los elementos de izado tomaban la carga desde pontonas, se iniciaban con el ascenso de la marea para así mantener en todo momento el control sobre la misma.

Tras todas las operaciones de proyecto, construcción y control de la ejecución, brevemente descritas en las líneas precedentes, la imagen del puente ya terminado, que luce espléndido, es la última de una larga serie en la que el puente iba cambiando su aspecto día a día, conforme avanzaba su construcción. Unas fotos que nos revelan cómo el puente ha ido creciendo y cómo ha llegado a ser lo que vemos; y donde los protagonistas, además del propio puente, eran también todos los recursos de operación diseñados específicamente para este puente y otros muchos puestos a su disposición. Hoy ya solo podemos ver el puente acabado (fig. 13), pero todas las demás figuras recogidas en este artículo, que corresponden a su etapa constructiva, son las imágenes que encierran su verdadera historia.

Bibliografía

- [1] J.M. González Barcina, F. Niño Tejedor, H. Bernardo Gutiérrez, V.M. Jiménez Aguadero, Recintos estancos en la cimentación marítima del Puente de la Constitución de 1812 sobre la bahía de Cádiz, *Hormigón y Acero* 67 (2016) 37–42.
- [2] J. Pascual Santos, D. Pajuelo Gallardo, D.E.L. Mendizábal, B. Arco, A. Carnerero Ruiz, Construcción del viaducto de acceso desde Puerto Real del Puente de la Constitución de 1812 sobre la bahía de Cádiz, *Hormigón y Acero*. 67 (2016) 221–234.
- [3] P. Hue Ibargüen, J.M. González Barcina, Empuje del viaducto de acceso desde Cádiz del Puente de la Constitución de 1812 sobre la bahía de Cádiz, *Hormigón y Acero*. 67 (2016) 199–208.
- [4] F. Espinosa de los Monteros Churruga, A. Martínez Cutillas, El tramo desmontable del Puente de la Constitución de 1812 sobre la bahía de Cádiz, *Hormigón y Acero* 67 (2016) 209–219.
- [5] C. Lucas Serrano, J.A. Navarro González-Valerio, Proceso constructivo del tramo a atirantado del Puente de la Constitución de 1812 sobre la bahía de Cádiz, *Hormigón y Acero*. 67 (2016) 101–109.
- [6] C. Lucas Serrano, L. Peset González, J. de los Ríos de Francisco, J.M. González Barcina, Maniobras singulares en el tramo atirantado del Puente de la Constitución de 1812 sobre la bahía de Cádiz, *Hormigón y Acero* 67 (2015) 123–142.
- [7] J.L. Castro Rubal, J. de los Ríos de Francisco, J. Arroyo Márquez, J.L. Salamanca García, Medios auxiliares y equipos especiales empleados en la construcción del tramo atirantado del Puente de la Constitución de 1812 sobre la bahía de Cádiz, *Hormigón y Acero*. 67 (2016) 173–183.
- [8] P. Segura Perez, J.F. Martínez Díaz, Hormigón autocompactante antilavado para hormigón sumergido en las cimentaciones marítimas del Puente de la Constitución de 1812 sobre la bahía de Cádiz, *Hormigón y Acero*. 67 (2016) 43–48.
- [9] V. Puchol De Celis, Instrumentación, monitorización y análisis del Puente de la Constitución de 1812 sobre la bahía de Cádiz, *Hormigón y Acero*. 67 (2016) 261–266.
- [10] J.A. Navarro González-Valerio, C. Lucas Serrano, Control geométrico del tramo atirantado del Puente de la Constitución de 1812 sobre la bahía de Cádiz, *Hormigón y Acero* 67 (2015) 143–158.
- [11] R. Reyes Cadenas, J.M. Gomá, Sistema de aseguramiento de calidad en la construcción del tramo atirantado del Puente de la Constitución de 1812 sobre la bahía de Cádiz, *Hormigón y Acero*. 67 (2016) 273–276.