

Original

Concepción general del proyecto del Puente de la Constitución de 1812 sobre la Bahía de Cádiz

General overview of the project of the Constitución de 1812 Bridge over the Cadiz Bay

Javier Manterola Armisen y Antonio Martínez Cutillas*

Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Carlos Fernández Casado S.L., Madrid, España

Recibido el 2 de diciembre de 2015; aceptado el 5 de febrero de 2016

Disponible en Internet el 4 de julio de 2016

Resumen

El nuevo puente sobre la bahía de Cádiz tiene una longitud total de 3.092 m y cruza la bahía desde la ciudad de Cádiz hasta la de Puerto Real. El puente principal es un puente atirantado con una luz de 540 m, vanos de compensación de 200 m y un gálibo de navegación de 69 m.

Se han empleado diferentes procedimientos de construcción totalmente adaptados a las distintas tipologías empleadas y a su ubicación en mar o tierra. El puente atirantado principal se construyó por voladizos sucesivos con dovelas de 20 m de longitud. El viaducto de acceso situado sobre el mar se construyó por medio de empuje desde el estribo del lado de Cádiz. El viaducto de acceso situado sobre tierra en el lado de Puerto Real se construyó vano a vano por medio de una cimbra aporticada. El tablero simplemente apoyado de 150 m se izó desde ambas pilas con la ayuda de una barcaza.

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

Palabras clave: Puente atirantado; Puente mixto hormigón-acero; Puente de hormigón pretensado; Puente de acero; Construcción por voladizos sucesivos; Construcción por izado; Construcción por empuje; Construcción sobre cimbra

Abstract

The new bridge over Cadiz Bay has a total length of 3,092 m and crosses from the city of Cadiz to Puerto Real. The main bridge is a cable stayed deck with a 540 m. main span, 200 m. approach span, and a vertical clearance for navigational purposes of 69 m.

Different construction techniques have been employed, and have been adapted to the different bridge typologies, and to its location in the sea or on land. The cable stayed main bridge is being built using a free cantilever system with segments 20 m long. The approach viaduct over the sea is being built by segments incrementally launched from Cadiz side. The approach viaduct on Puerto Real side is being built by span by span by means of a shoring framework. The simply supported 150 m main span will be lifted from both piers with a barge.

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

Keywords: Cable stayed bridge; Composite concrete-steel bridge; Pre-stressed concrete bridge; Steel bridge; Free cantilever construction; Lifting construction; Launching construction; Scaffolding construction

1. Introducción

El acceso a Cádiz desde el puente de Carranza o desde la autovía del Sur obligaba a atravesar toda la ciudad por la Av. de Andalucía hasta llegar al puerto y la ciudad vieja.

El tráfico viario se congestionaba en dicha avenida, cuando se podía circular por el puente de José León Carranza, atascado a su vez por el excesivo tráfico. Por esta razón las autoridades del Ministerio de Fomento quisieron cumplir la vieja pretensión de la ciudad de realizar un nuevo acceso que desde Puerto Real llegase a Cádiz de una manera directa, desembocando al otro lado de la Ciudad en la Av. de la Bahía, junto al puerto y la parte vieja de la ciudad (fig. 1).

* Autor para correspondencia.

Correo electrónico: amartinez@cfcsl.com (A. Martínez Cutillas).



Figura 1. Vista general. Fuente: DRAGADOS UTE.

El canal de navegación de la bahía situado junto al muelle de la Cabezuela, Puerto Real, tiene 400 m de anchura y 14 m de profundidad, gálibo que las autoridades portuarias extendieron hasta 540 m para que no se ocupara la orilla del muelle de la Cabezuela, donde tenían que operar las grúas de servicio del puerto y para facilitar las maniobras de los barcos (fig. 2). Una de las pilas, la del Muelle de la Cabezuela, se desplazó del cantil 70 m dentro del mismo para permitir las operaciones de las grúas de servicio de carga y descarga. Desde el punto de vista del gálibo vertical, las máximas pendientes compatibles con el tráfico viario y la distancia a la que el canal de navegación se

encuentra de Cádiz hace que la calzada alcance la formidable cifra de 69 m, uno de los puentes más altos del mundo.

No obstante, por insistencia de los astilleros Navantia, situados en el interior de la bahía, solicitaron un gálibo vertical libre de 100 m con un gálibo horizontal de 140 m. Para ello fue necesario proyectar un puente basculante de 185 m de luz y 245 m de longitud. El mayor de España en su tipo. Con posterioridad, este concepto se modificó por el de un tablero con posibilidad de ser desmontado ante la necesidad de paso de un artefacto excepcional. Este tramo desmontable está formado por un tablero simplemente apoyado de 150 m de luz (fig. 1).



Figura 2. Esquema de accesos a la Ciudad de Cádiz.

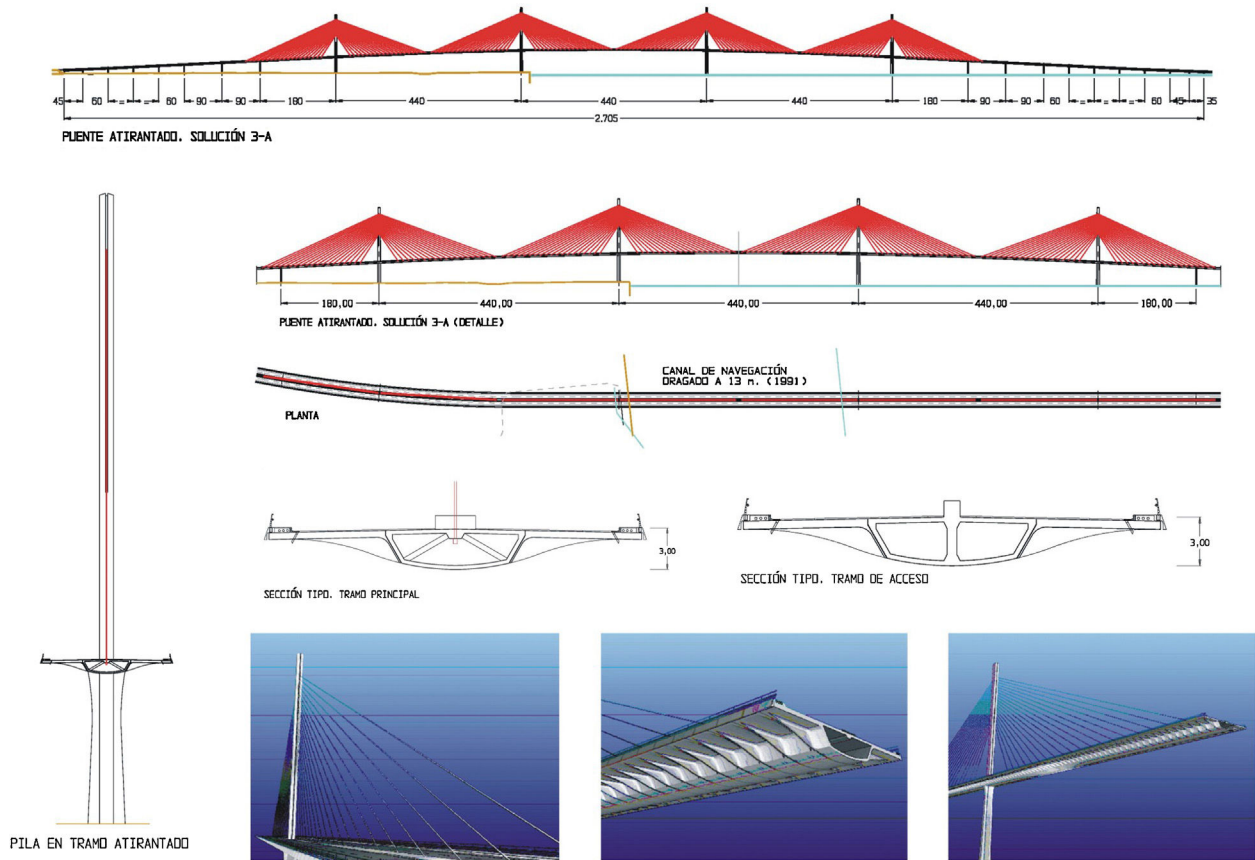


Figura 3. Estudio previo de soluciones con puente atirantado multivano.



Figura 4. Estudio previo de soluciones con arco de tablero inferior.

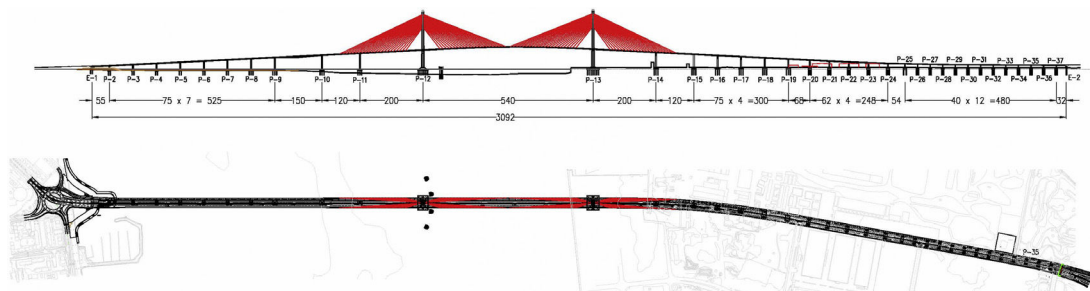


Figura 5. Alzado y planta general del puente.



Figura 6. Vista general del puente.

2. Estudio de soluciones

En la [figura 2](#) se representa la planta general de ubicación del puente donde se observa a la izquierda la ciudad de Cádiz, Puerto Real a la derecha y en medio la bahía. Se distinguen también dos trazados, el de abajo correspondiente al actual puente de Carranza y el nuevo, el superior que atraviesa Puerto Real, el muelle de la Cabezuela y desemboca en Cádiz junto al puerto. Cruza el canal de navegación, señalado en la figura con dos líneas blancas, que destaca 400 m junto al muelle de la Cabezuela.

Salvar una bahía de aproximadamente 1.500 m cruzada por un puente tiene muchas posibilidades; la tentación de hacer un puente atirantado de varios vanos es bastante grande. A fin de cuentas, sin otro dato, el mar es igual en todas partes lo que nos llevaría a las soluciones de la [figura 3](#). Pero esta solución tiene varios inconvenientes.

El mar es igual superficialmente pero la profundidad varía de manera que solo en el canal de navegación tiene 14 m, lo que permite el paso de grandes barcos. En el resto, la profundidad puede variar hasta los dos metros, por lo que solo es posible la navegación de pequeñas embarcaciones. De manera que el puente atirantado continuo de varios vanos responde más a una cuestión estética que a una razón funcional y constructiva. Es por tanto muy cara, por lo que fue desechada rápidamente. Las soluciones estaban abocadas al proyecto de un tramo único de más de 400 m de luz sobre el canal de navegación y un viaducto de acceso de gran longitud.

Se planteó un arco con tablero inferior ([fig. 4](#)), construible en voladizos sucesivos atirantados desde dos torres metálicas



Figura 7. Fuste superior de la torre.



Figura 8. Infografía de la configuración de tráfico y equipamientos de la sección transversal.

situadas sobre las pilas que van a cimentar el puente. Esta solución es muy posible hoy en día, pero finalmente nos decidimos por una solución atirantada sobre el canal de navegación con sendos viaductos de acceso, uno viniendo de Puerto Real y otro desde Cádiz.

Realmente esta no es una solución deducida por eliminación de las anteriores; es una solución partida, como las que se utiliza normalmente para problemas similares, que sin duda es la más adecuada pero que no impide pensar en otras.

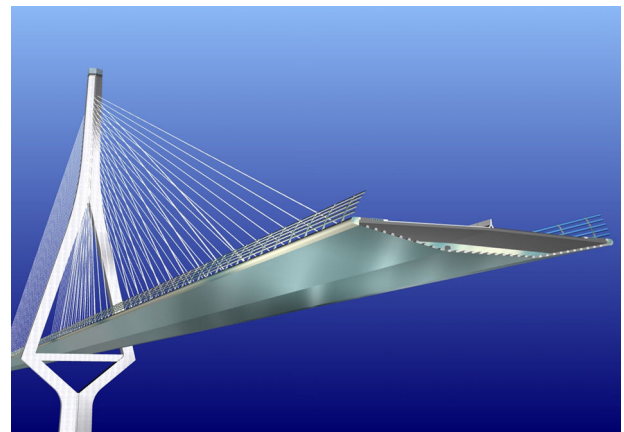


Figura 9. Infografía de la sección transversal del tablero y la torre.



Figura 10. Izado de dovela antes de la llegada a los primeros tirantes.

3. Descripción y planteamiento general

El puente, propiamente dicho, se puede dividir en cuatro tramos distintos dependiendo de sus diferentes características funcionales. Los cuatro tramos descritos están uno a continuación de otro, empezando por Cádiz y terminando por Puerto Real [1-4].

- Tramo viaducto de acceso del lado de Cádiz, corresponde al acceso al tramo principal, desde el lado de Cádiz; longitud 580 m.
- Tramo desmontable; longitud 150 m.
- Tramo puente principal, es el puente atirantado situado sobre el canal de navegación y sus compensaciones atirantadas; longitud 1.180 m.

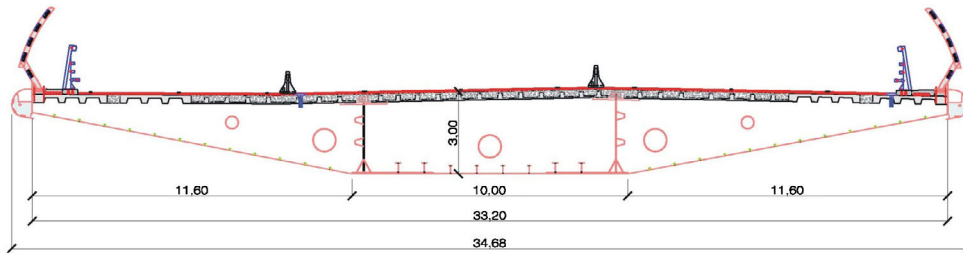


Figura 11. Sección transversal del viaducto de acceso al lado de Cádiz.



Figura 12. Empuje del tablero con la torre de atirantamiento provisional.

- Tramo viaducto de acceso del lado de Puerto Real, corresponde al acceso al tramo principal desde Puerto Real; longitud 1.182 m.

La longitud total del puente es de 3.092 m (fig. 5). Es uno de los puentes continuos de mayor longitud de España y uno de los mayores puentes del mundo (fig. 6).

El tramo principal corresponde al puente situado sobre el canal de navegación y constituye la razón de ser última del puente: proporcionar un nuevo acceso a Cádiz, saltando sobre el canal de navegación, principal entrada al puerto, sin que se produzcan interrupciones del tráfico rodado, como pasa en el puente de Carranza, que tiene que abrirse y cerrarse sucesivamente para permitir el tráfico de barcos. En este caso la interrupción sería

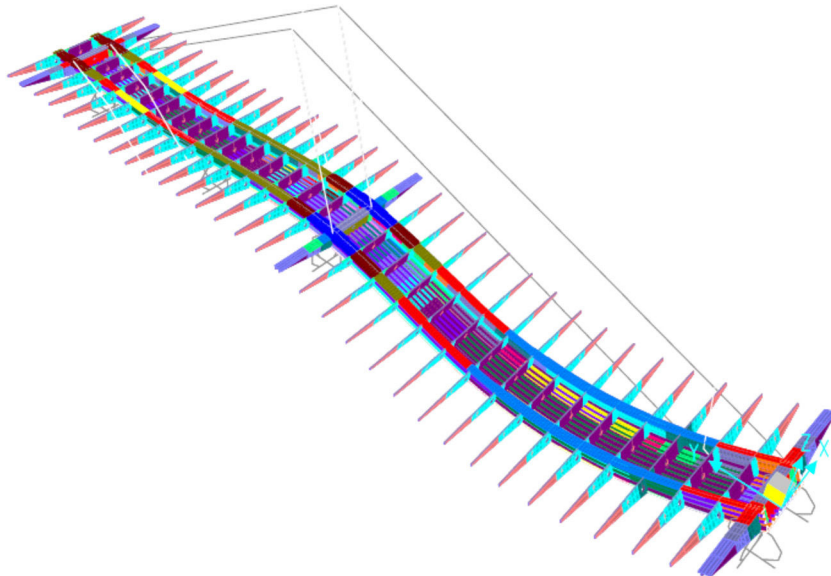


Figura 13. Cálculo del empuje y deformada del dintel.



Figura 14. Otras vistas del proceso de empuje del tablero del viaducto al lado del acceso a Cádiz.

mucho mayor dado que el tráfico de navíos es infinitamente más intenso.

Razón esta por la que el puente sobre la bahía de Cádiz, con sus 69 m de gálibo vertical libre, es uno de los más altos del mundo. Mayor que todos los de Nueva York y San Francisco. Mayor que todos los europeos, los existentes en Portugal, Francia, Inglaterra y las grandes conexiones entre Suecia y Dinamarca, puente de Oresund y los que unen las islas de Dinamarca entre sí, Gran Belt y pequeño Belt.

Esta misma razón y las condiciones de maniobrabilidad de los barcos a la entrada al puerto, es lo que ha determinado que la autoridad portuaria solicitase una luz libre de obstáculos de 540 m. Solicitud que ha sido cumplida.

La solución que la tecnología actual recomienda para un caso como este es la utilización de un puente atirantado, que desde torres de 180 m de altura cuelgue, por medio de 176 tirantes, los 540 m del vano principal y los 320 m de cada uno de los dos vanos de compensación (figs. 6 y 7).

El tablero tiene 34,30 m de anchura, correspondiente a cuatro carriles de circulación, dos en cada dirección de 3,5 m de anchura, dos vías de tranvía y los arcones, defensas, alojamiento de los tirantes y pantallas para proteger el tráfico del viento, necesarios para la perfecta funcionalidad del puente (fig. 8). La zona de vías del tranvía se ha dedicado provisionalmente a un carril bus, a la espera de la ejecución de dicho tranvía.

La estructura de este tablero debe ser ligera, aerodinámica y esbelta, por tanto de estructura mixta, acero y hormigón, de 3,00 m de canto y bordes perfectamente perfilados (fig. 9).

Su construcción se realizó por avance en voladizo; el dintel se dividió en dovelas de 20 m de longitud, que fueron montadas en el Muelle de la Cabezuela y se llevaron por flotación hasta el puente, donde fueron izadas por medio de carros-grúa móviles situados en la punta delantera de los voladizos.

Una vez izadas se procedió a su soldadura con el tramo ya construido y al atirantamiento desde la torre. Inmediatamente se continuó con el armado y el hormigonado de la losa superior y retesado de los tirantes (fig. 10).

4. Viaducto de acceso al lado de Cádiz

Este acceso tiene 580 m de longitud y está formado por un dintel de estructura mixta que salta sobre las pilas separadas entre sí $55 + 7 \times 75$ m. El tablero tiene 3,00 m de canto total con una losa de compresión de 30 cm.

Se ha procurado en todo momento tener una sección muy perfilada y constante o casi constante a lo largo de todo el viaducto. Las almas centrales, por tener que deslizarse sobre los apoyos, se remetieron un poco hacia el interior (fig. 11).



Figura 15. Fuste de las pilas.



Figura 16. Colocación de los recintos de la torre de la bahía.

Con el fin de optimizar la distribución de chapas, la sección metálica resistente es el cajón monocelular central, cumpliendo las chapas inclinadas una función exclusiva de carenado. La separación entre los diafragmas intermedios es de 5 m. El proyecto de la losa de hormigón se ha realizado conservando el equilibrio entre la máxima prefabricación e industrialización y la reducción de su peso ya que se trata de una acción muy importante en este rango de luces. Con este criterio, las secciones de las zonas de centro de vano (50 m centrales), las zonas entre almas y parte de los vuelos, la losa está formada por prelosas prefabricadas nervadas colaborantes, apoyadas entre diafragmas, en el que

parte de la misma se hormigonaba en segunda fase. El resto de la sección se realizaba con losas nervadas hormigonadas in situ a partir de un encofrado perdido de chapa grecada (fig. 11). En las secciones de apoyo (25 m), salvo en la zona de almas en la que fue necesario disponer de gran capacidad de conexión entre el hormigón y el acero, las losas eran, en su mayor parte nervadas.

El tablero se construyó por empujes sucesivos de solo la parte metálica. El empuje de los vanos de 75 m se realizó con la ayuda de un atirantamiento provisional (fig. 12).

En la figura 13 se representa una fase de este empuje y la deformada del dintel cuando se activan los tirantes. En la

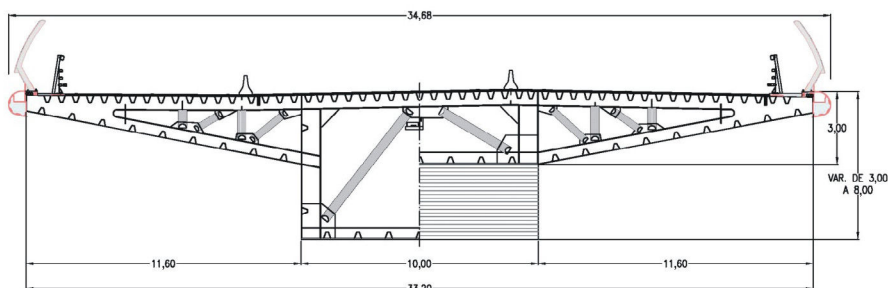


Figura 17. Alzado y sección transversal del puente desmontable.



Figura 18. Izado del tramo desmontable.

figura 14 se ve el tablero durante el empuje. Una vez terminado el empuje se colocó la losa por medio de placas prefabricadas aligeradas.

4.1. Pilas

La geometría de las pilas de este puente se obtiene a partir de una forma básica. La sección transversal de las mismas se genera con dos trapecios unidos por su base más ancha, manteniendo la longitud de las dos bases constantes y variando la altura de los trapecios a lo largo de todo el fuste de las pilas para variar el canto transversal a lo largo de la altura. De este modo, el canto longitudinal permanece constante y las superficies de la pila son alabeadas.

En la parte superior las pilas tienen una anchura constante para recoger el dintel (fig. 15) y varían hacia abajo sin más que mover la base pequeña del trapecio variando la altura del mismo, ganando canto transversal conforme más altas son las pilas, cuyas alturas varían desde 8,0 m a 52,5 m. Las dimensiones en la cimentación de la pila más alta son de 4,00 × 10,5 m, este último valor se reduce a 4,2 m en la cintura de la pila bajo el capitel. En la parte superior de este su dimensión es la del ancho del dintel que soporta, 10,5 m. En el borde la pila tiene 2,9 m.

Las cimentaciones de estas pilas son pilotadas; se utilizaron recintos metálicos para sujetarse a los pilotes previamente ejecutados. Se vertió a posteriori una capa de hormigón que impermeabilizaba el recinto, pudiendo a continuación proceder a armar y hormigonar el encepado en seco (fig. 16).

5. Tramo desmontable

La presencia de este puente responde a una petición de los astilleros Navantia para permitir el paso de barcos de más de 69 m de altura, máximo posible a cruzar bajo el puente principal. Esta coyuntura es muy poco probable y de realizarse, se hará muy pocas veces en la vida del puente.

La luz necesaria para el paso de los barcos de Navantia es de 150 m, lo que determina que fuese necesario diseñar una viga que salvase esta luz y evolucionase desde la sección tipo ya descrita en el apartado 4. Por esta razón, el tramo desmontable comienza con la sección de 3,00 m de canto de la sección tipo y la parte inferior se va bajando hasta que la viga alcanza los 8 m (fig. 17). Este tramo de 4.000 t se prefabricó y se llevó por flotación hasta la vertical de su posición definitiva donde se izó hasta la cabeza de la pila (fig. 18).

6. Tramo atirantado

Incluye los 1.180 m de longitud correspondientes a 540 m del vano central entre torres de atirantamiento, los dos vanos de compensación de 200 m de luz cada uno y dos vanos más semiatirantados de 120 m de luz cada uno. Para su construcción se han dividido en dovelas de 20 m de longitud y 400 t de peso máximo.

La sección transversal es común a la del resto del puente con 34,30 m de anchura y 3,00 m de canto. Pero a lo largo del dintel hay que establecer una serie de diferencias en su morfología. Las dos almas centrales del cajón trapecial desaparecen en los 420 m centrales del tramo principal quedándose en esta zona con solo las almas inclinadas laterales al cajón (fig. 19). El resto del puente, como en el caso de acceso desde Cádiz, tiene dos almas longitudinales centradas y dos laterales (fig. 20). La razón para estas eliminaciones es la no necesidad de recoger el cortante en ellos por su bajo valor y por el control que sobre la cuantía del cortante establecen los tirantes de cuelgue [5].

La distribución del hormigón en la losa superior varía de una a otra zona. Por ejemplo, todo el interior de la viga cajón se hormigona sobre las pilas contiguas a las torres en los vanos de compensación, en una longitud de 20 m, para actuar como contrapeso del dintel central. Una segunda particularidad que

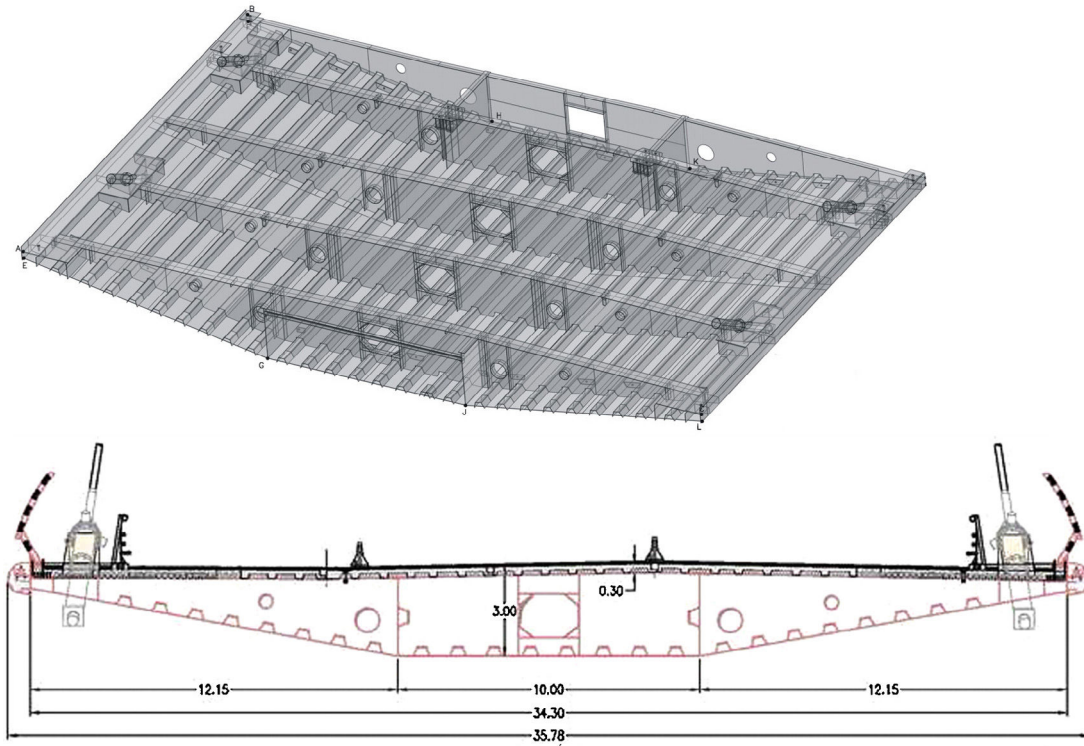


Figura 19. Sección transversal sin almas verticales.

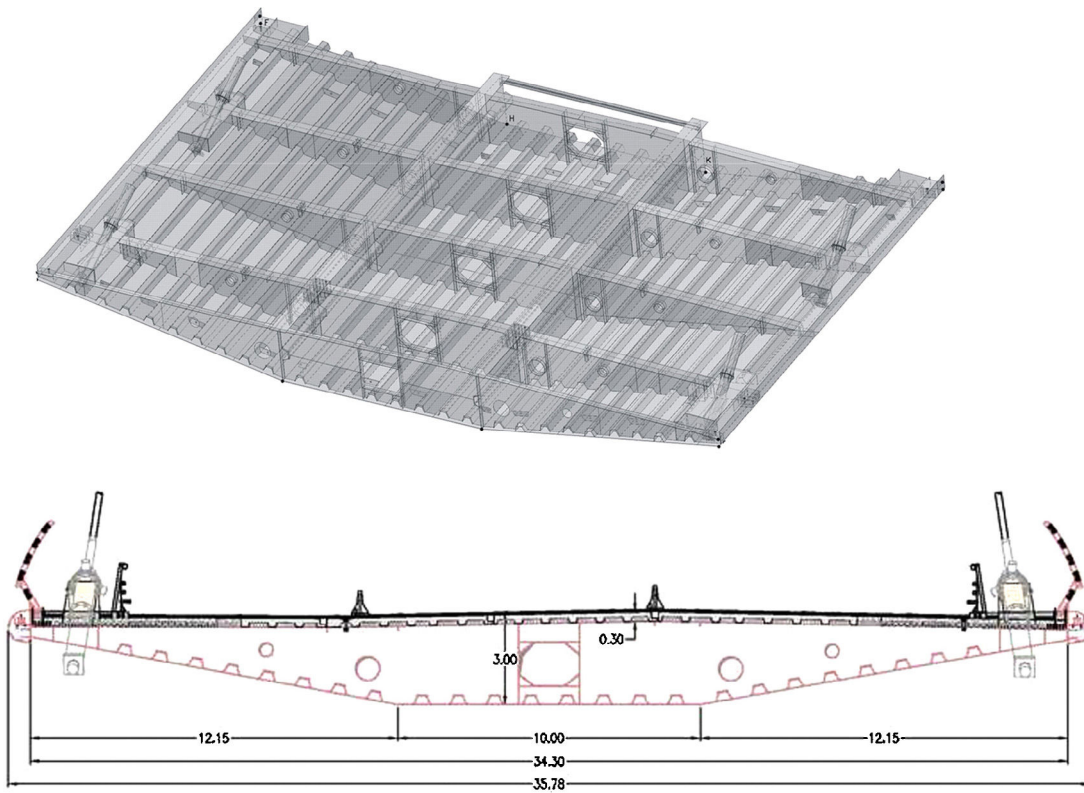


Figura 20. Sección transversal con almas verticales.

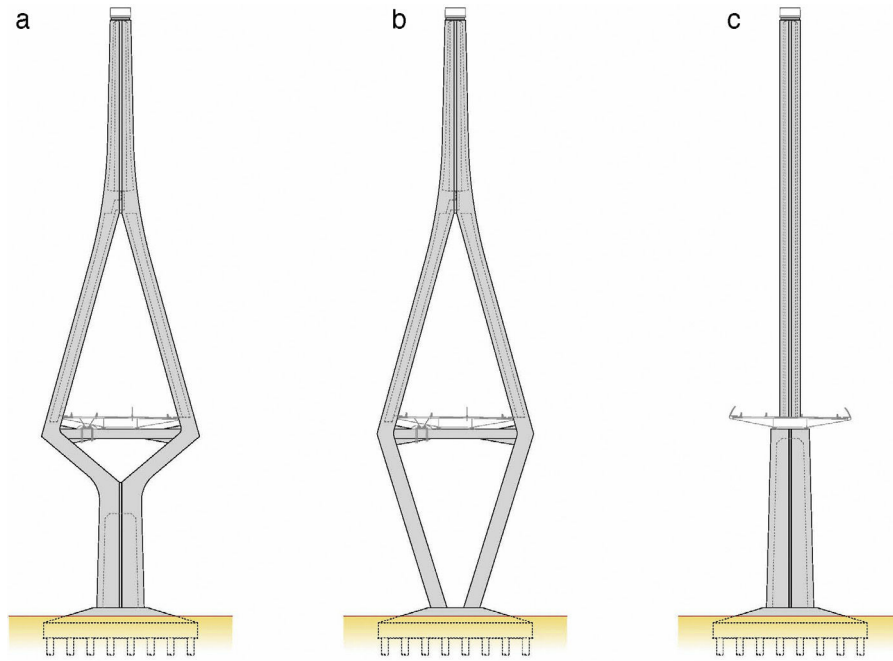


Figura 21. Distintas configuraciones de las torres de atirantamiento.

existe es la doble acción mixta que se realiza a lo largo de 60 m sobre cada torre de atirantamiento y en las pilas contiguas de los vanos de compensación de 85 m en la pila de la bahía y 65 m en la del muelle. Por otro lado, la losa superior de hormigón es de

30 cm de espesor y está realizada «in situ» o prefabricada con aligeramientos de distinta cuantía.

Cada dovela de 20 m está rigidizada transversalmente por 4 diafragmas separados 5 m (figs. 19 y 20). En esa subdivisión, la

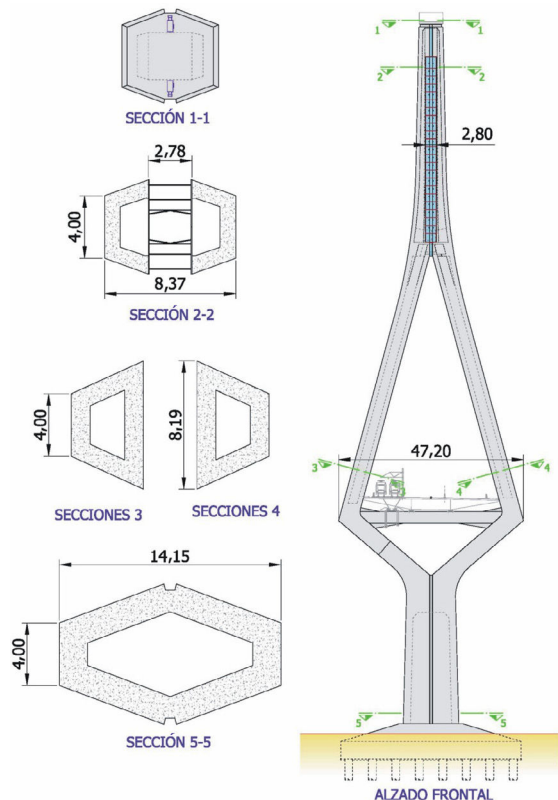


Figura 22. Definición torre de atirantamiento.

distancia al borde libre de los diafragmas extremos es de 1,5 m y 3,5 m. Este hecho ha ocasionado la necesidad de un nuevo diafragma de cierre del borde en que la distancia al borde libre es de 3,5 m, conveniente durante las operaciones de acoplamiento y soldadura de una dovela a otra para mantener la geometría del borde.

6.1. Pilas y torres de atirantamiento

Las pilas normales de este tramo tienen la misma forma y tipología que las de acceso a Cádiz, y en general que las del resto de pilas del puente. El diseño de las torres de atirantamiento es fundamental para el diseño general del mismo. Se empezó considerando una sola pila central tal y como aparece en la [figura 3](#); esta pila era muy fácil de construir pero tenía un inconveniente importante, ensanchaba el dintel 4,00 m a lo largo de unos 1.000 m lo que suponía un sobre coste considerable ([fig. 21a](#)).

Habría que dejar que el dintel pasase recto y que la pila lo rodease; en estas circunstancias existían varias posibilidades de configuración de la pila desde el dintel hasta la cimentación, habida cuenta que desde el dintel hacia arriba la pila estaba definida con patas abiertas en la parte inferior y fuste único central para los tirantes en la parte superior.

Si se hubiese elegido que desde el dintel hacia la cimentación la pila prolongase su trazado por dos pilas verticales o inclinadas ([fig. 21c](#)), se producía un aspecto no deseado; las patas verticales eran evidentemente feas y las inclinadas rompían la idea general del proyecto de pilas, el de utilizar fustes únicos. Así pues, se optó por la forma de las torres de la [figura 21b](#) que cumplían ese requisito fundamental. La tracción que solicita al travesaño es bastante mayor si el fuste sube único hasta casi el dintel que si sube desdoblado en otros dos. Fue una decisión difícil pues los dos tipos de pilas cumplían bien todas las condiciones y finalmente se optó por el de la pila vertical única.

El diseño de las torres sigue el mismo principio que las pilas normales, aunque de dimensiones bastante mayores. En su

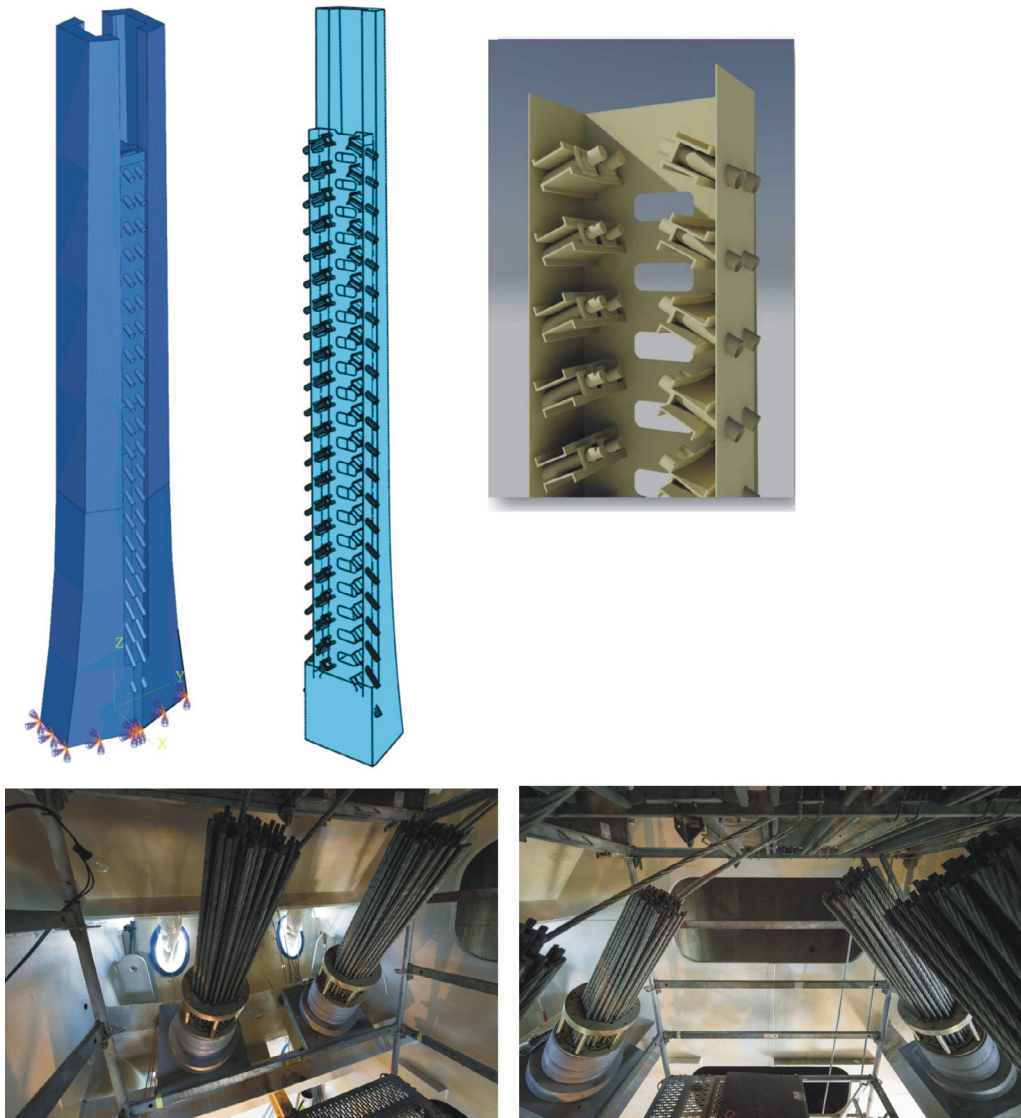


Figura 23. Configuración fuste superior de la torre en la zona de tirantes.

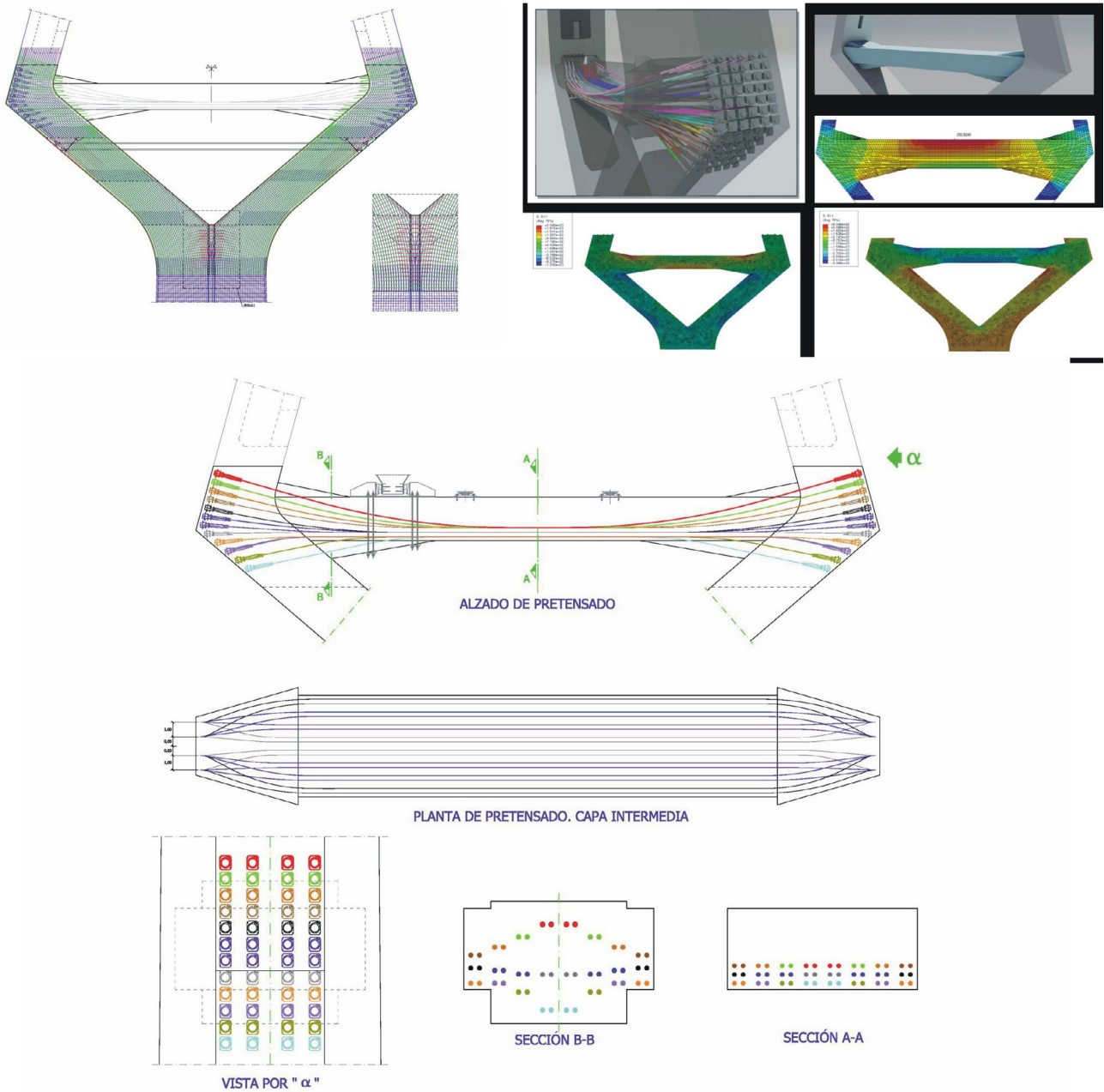


Figura 24. Definición de la célula triangular inferior de las torres.

contacto con la cimentación aparece el doble trapecio unido en la cara más ancha, pero con unas dimensiones en planta mucho mayores, $14,15 \times 8,9$ m. La dimensión transversal disminuye hasta donde se produce la bifurcación de los dos trapecios de la base en las dos ramas que se abren para que pase el dintel y se cierran en la parte superior donde aparecen los tirantes (fig. 22).

En el interior de la parte superior de la pila se introduce «el armario» metálico (fig. 23) donde se establece el intercambio de tracciones entre los tirantes de uno y otro lado de la torre. Este «armario» recoge la componente horizontal y vertical de los tirantes y los va transmitiendo al hormigón de la pila por los conectores presentes en las chapas.

En la figura 24 se representa el armado de la célula triangular de las torres, fuertemente solicitada por el esfuerzo axial que baja por la torre.

En la figura 25 se representan los 176 tirantes que sujetan el puente, cuyo número de cordones varía entre $75 \phi 0,6''$ en los 4 primeros tirantes, $31 \phi 0,6''$ en los siguientes tirantes verticales y $78 \phi 0,6''$ en los más inclinados. Tienen doble protección, cada cordón está autoprotegido mediante acero galvanizado y vaina individual. La vaina general tiene cordón helicoidal para controlar los efectos de inestabilidad aeroelástica provocados por la lluvia y viento. Todos los tirantes tienen amortiguadores en su contacto con el dintel, axiales para los más cortos y triaxiales para los demás [6].

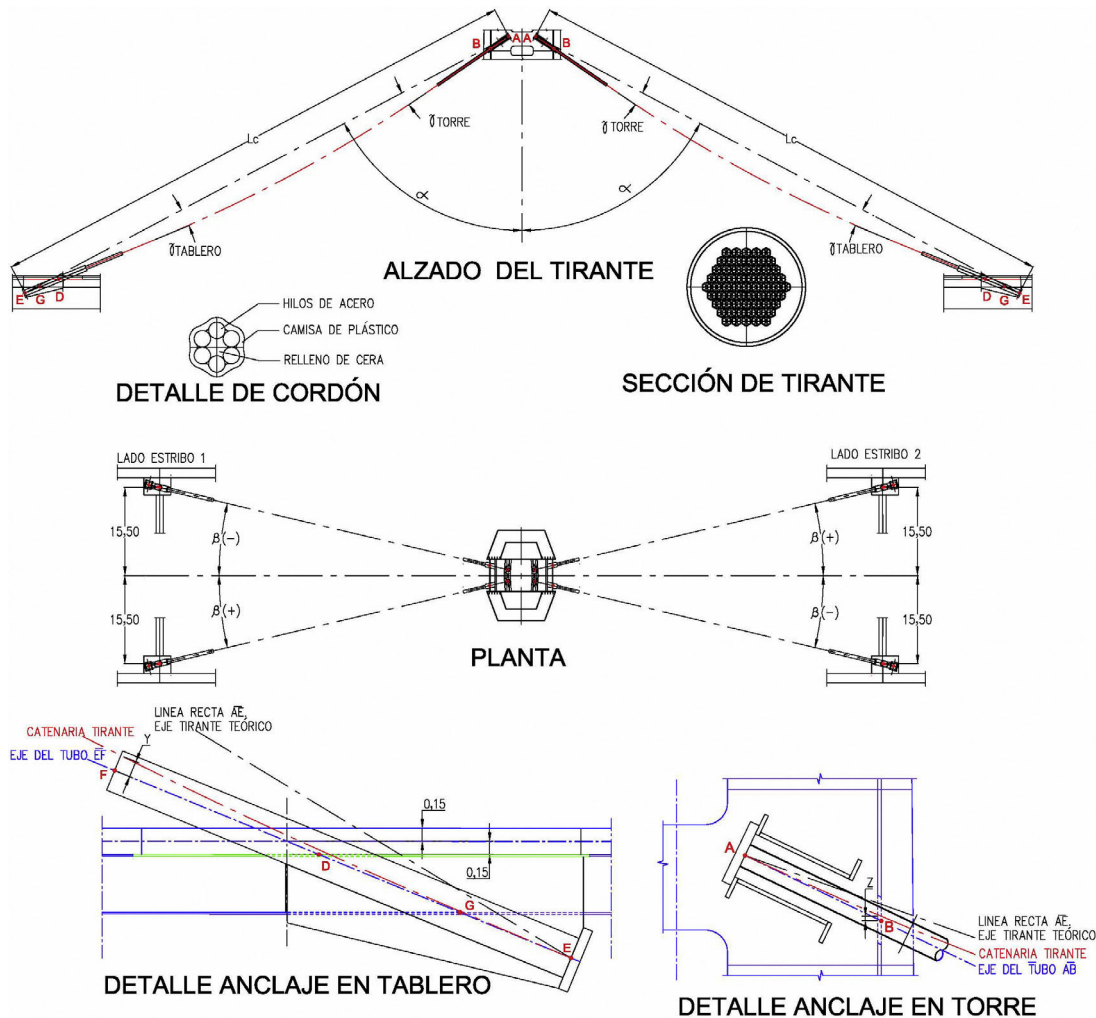


Figura 25. Esquema de definición de tirantes.

6.2. Construcción por avance en voladizo

La construcción en avance en voladizo se realiza con dovelas de 20 m de largo y 34 m de ancho, izando solo la parte metálica de la sección junto a una parte hormigonada en el borde para recoger la carga horizontal del tirante en el momento de colocarlo. Su peso fue de más de 400 t (fig. 26).

Aquí se plantean varios problemas resistentes que conviene citar. El primero es el tamaño de dovela elegido. En el cálculo del proyecto se había supuesto una dovela de 10 m. Al decidirse por una de 20 m, una vez construidas las torres, el coeficiente de seguridad de la resistencia de las torres principales se redujo considerablemente, aunque siempre se mantuvo dentro de márgenes admisibles.

Lo cierto es que los momentos flectores en la base de la pila durante el montaje eran muy importantes, hasta el extremo que la construcción se realizó desfasando el tamaño de las dovelas, de manera que solo la mitad de la longitud estaba en desequilibrio entre uno y otro voladizo. Habría sido casi imposible hacer dovelas más grandes, pues la base de la torre podía fallar por el desequilibrio de sollicitaciones en uno y otro borde del puente. Conforme el voladizo por un lado era mayor respecto del otro,

el coeficiente de seguridad de la resistencia de la pila disminuía, máxime cuando a este desequilibrio de cargas se le añadía el viento. Además, se consideró la caída accidental de dovela durante el izado.

En la figura 27 se representan las deformaciones de las dovelas extremas durante el ciclo de colocación de una dovela.

El máximo desequilibrio se produjo cuando el voladizo libre era de 218,5 m hacia el centro del vano principal y 198,0 m en el vano de compensación. A partir de este momento uno de los voladizos se apoyaba en una pila lateral y las deformaciones y desequilibrio se reducían drásticamente. En la figura 28 se representan las deformadas de un semipunte cuando los dos voladizos están libres y cuando se encuentra apoyado en las pilas del vano de compensación.

Este hecho es característico de los diseños de puentes con vanos de compensación muy grandes, como en este caso de 200 m. Si se hubiese ido a vanos de compensación normales de 75 m, no solo se habría aumentado la rigidez del vano principal sino que además este fenómeno habría perdido importancia. No obstante, se ha preferido diseñar lo diseñado.

Para terminar la construcción del tablero fue necesario proyectar tres operaciones de cierre definitivas: la unión de los dos



Figura 26. Construcción por avance en voladizo simétrico.

voladizos en el centro del puente, el apoyo del voladizo trasero de la torre de la bahía en la pila del tramo desmontable y la unión del voladizo de la torre del muelle con el tramo de Puerto Real.

Aunque muy importantes, se hicieron con mucha facilidad pues una de las tareas importantes a realizar durante la construcción ha sido el control de flechas en el momento de poner la dovela correspondiente y la comprobación de la geometría del puente en todas las fases. El apoyo en la pila del tramo desmontable se hizo sin dificultad. En el centro del puente se dejó una dovela de 75 cm para cerrar la separación. Su posición estaba muy bien controlada por el ajuste de cargas en tirantes y se realizó un desplazamiento longitudinal del tablero de 15 cm para facilitar las operaciones de soldeo en clave.

La unión del tramo mixto procedente de la estructura atirantada con el tramo de hormigón de Puerto Real, aunque no tuvo más dificultades, sí hubo que resolver primero la perfecta transmisión de esfuerzos entre ambas (ver apartado 7.1).

7. Viaducto de acceso al lado de Puerto Real

Este tramo tiene 1.182 m de longitud y está compuesto por luces decrecientes, ya que la altura de las pilas se reduce con la pendiente del viaducto, que es del 5%. Razón esta por la cual la sección cambia, aunque deduciéndose de la sección tipo de 75 m. Así, la distribución de luces es de $4 \times 75 + 68 + 4 \times 62 + 54 + 12 \times 40 + 32,0$ m.

Pero en este tramo se producen una serie de cambios respecto al tablero tipo. Primero, todo él es de hormigón pretensado, aunque manteniendo la misma sección transversal del resto del puente (fig. 29).

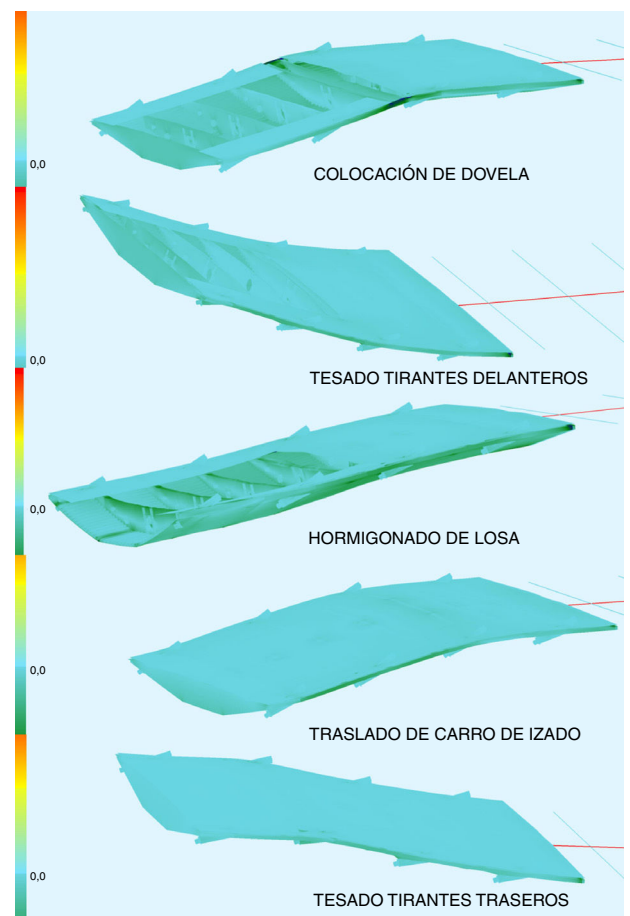


Figura 27. Deformada de la dovela frontal calculada por elementos finitos.

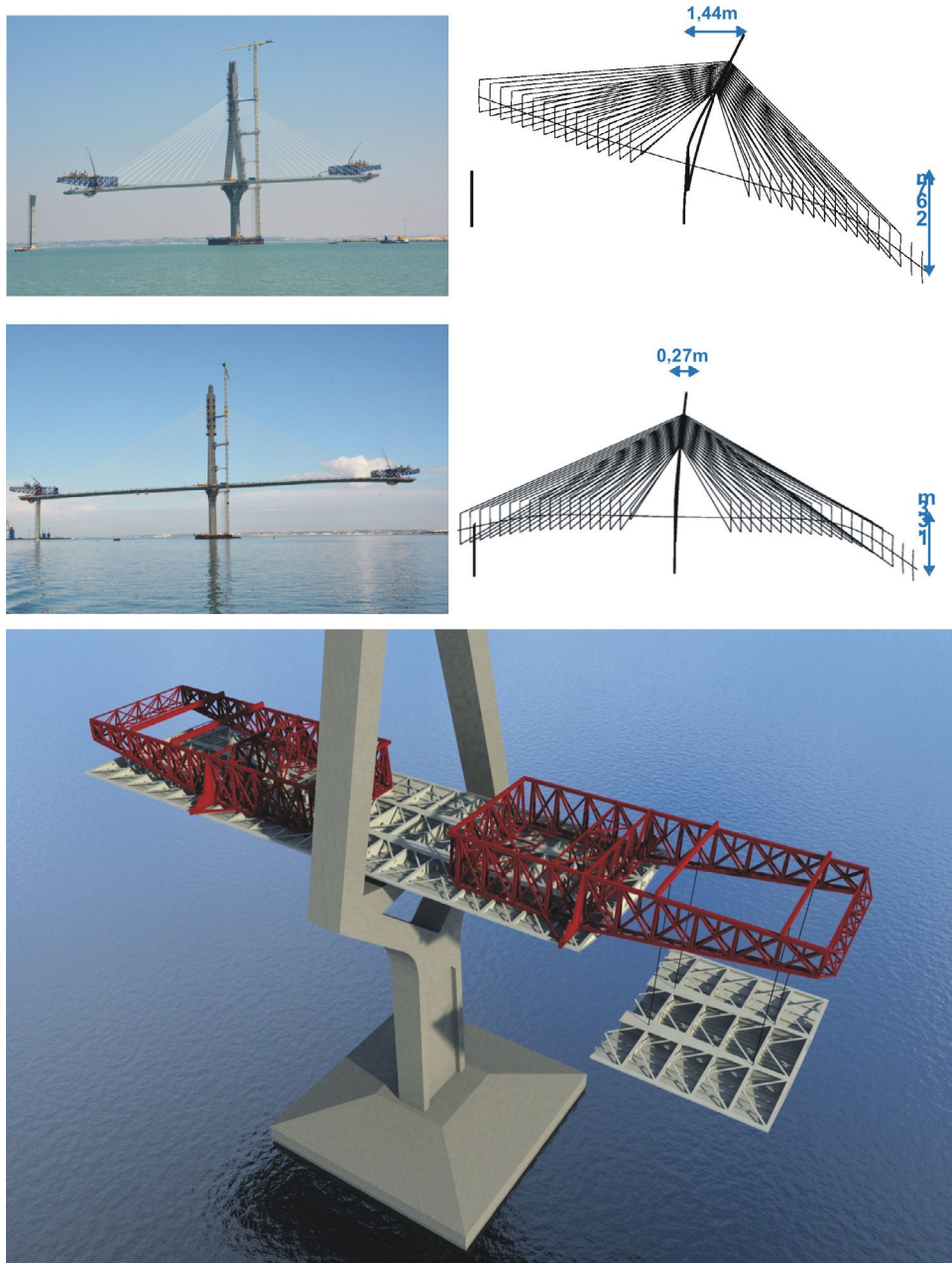


Figura 28. Deformadas de un semipunte antes y después de apoyarse en la pila del vano de compensación.

Segundo, la pila debe cambiar de forma pues por exigencia de la viabilidad en el polígono industrial de Puerto Real no puede existir pila en el centro; por allí transita una calzada, lo que obligó a diseñar una pila (fig. 30), que se deduce de la pila tipo sin más que abrir en los dos trapecios que configuran la sección tipo y separarlos para dejar paso a la calle central. El quiebro que se origina en la parte superior es para apoyar el dintel adecuadamente.

Mientras el tablero superior tiene una luz igual o superior a 62 m este no varía en forma. En el vano de 54 m, que es el vano de transición al de 40 m, se produce una variación del canto de 3 m a 2 m sin más que subir la losa inferior del cajón tipo 1 m.

A partir de ese punto, la sección transversal de 2,00 m de canto se prolonga hasta el estribo, eso sí, cambiando el aligeramiento interior del cajón a seudocírculos (fig. 31).

Para la realización de este tramo hay que separar la construcción de la zona de baja altura y 40 m de luz, que se realiza con cimbra tradicional hasta el suelo y la construcción de la zona con viga cajón, que se realiza subdividiendo la sección en dos partes (fig. 32).

Por un lado, se ejecuta el cajón central formado por las dos almas centrales de la sección, la losa superior e inferior entre ellos y un pequeño voladizo lateral; por otro lado y en segunda fase, el resto de las zonas laterales. La capacidad resistente



Figura 29. Vista del viaducto de acceso al lado de Puerto Real, canto 3,00 m.

del tablero se le confiere a este cajón central mientras que las inclinadas sirven para resistir la sección transversal.

El cajón central se realizó sobre cimbra apoyada en puntales intermedios (fig. 33a). Una vez pretensado, un carro superior completó el ancho total del tablero (fig. 33b) deslizándose sobre el cajón central.

7.1. Conexión del viaducto de hormigón de acceso al lado de Puerto Real con el tramo metálico que continúa el tramo atirantado

La conexión se realiza en el segundo vano de compensación de 120 m de luz, a 18,75 m de la segunda pila de dicho vano. Para ello, se fabricó una dovela especial de 10,25 m de longitud,

que se introdujo 5 m en el hormigón pretensado del viaducto y se colocó antes del hormigonado de esta. Habida cuenta que en esos 5 m se dispone el conjunto de conectadores capaces de transmitir los esfuerzos que provienen de la parte metálica al hormigón y viceversa, la unión queda perfecta.

Las dos almas metálicas intermedias se conectan a las de hormigón por pretensado, después de dejar los ensanchamientos correspondientes en las almas de hormigón para la colocación de las vainas del mismo.

Todo esto se realiza antes de la llegada de la dovela metálica proveniente del tramo atirantado; así, la unión entre ambos tramos se realiza como cualquier unión metálica, ayudándose de un pequeño carrete de 50 cm para ajustar los bordes entre una y otra dovela (fig. 34).

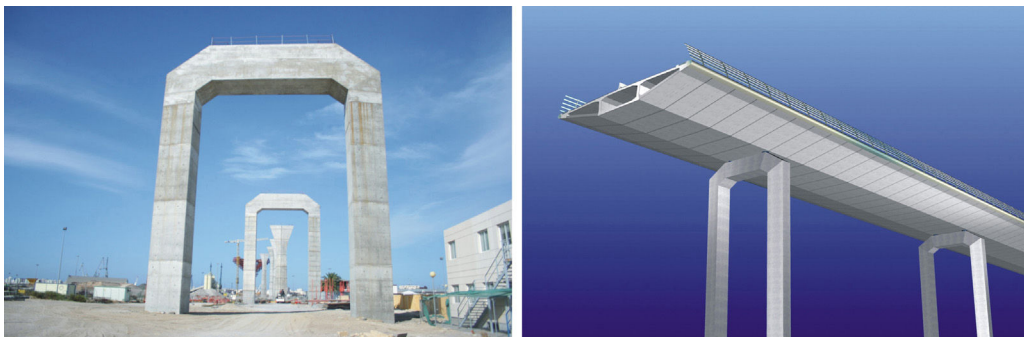


Figura 30. Pilas dobles por presencia de calzada bajo el tablero.

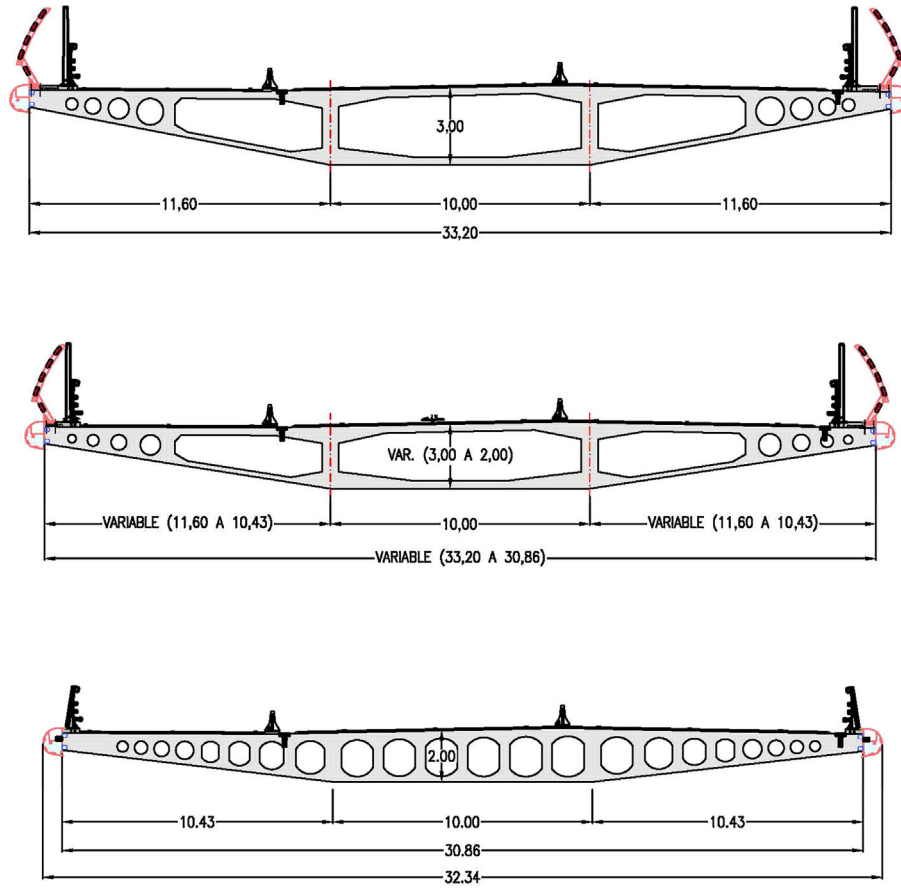


Figura 31. Evolución de las secciones tipo en el viaducto de acceso al lado de Puertoreal.



Figura 32. Vista del viaducto de acceso lado Puerto Real, canto 2,00 m.

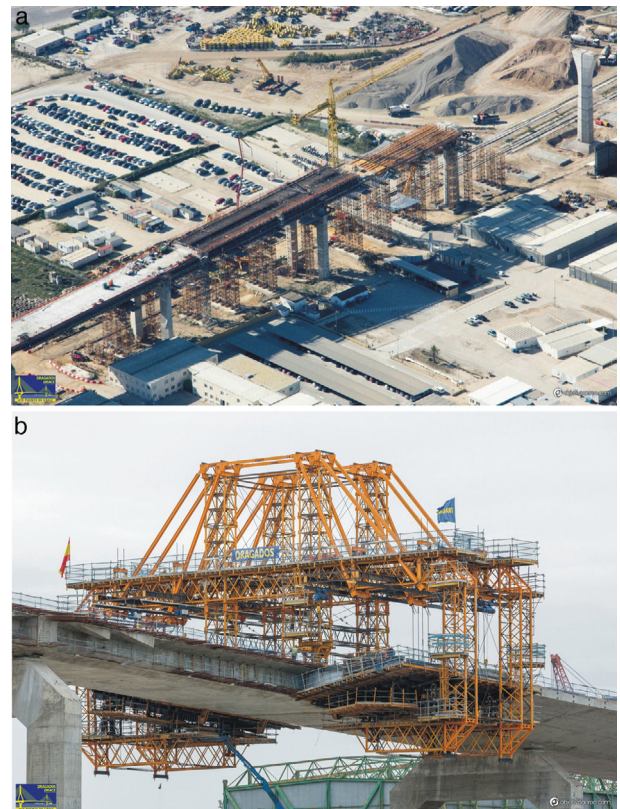


Figura 33. (a, b) Construcción del viaducto de acceso al lado de Puerto Real.



Figura 34. Dovela de conexión dintel mixto–dintel hormigón.

Bibliografía

- [1] J. Manterola, M. Martín, A. Martínez, J.A. Navarro, S. Fuente. Puente sobre la Bahía de Cádiz. Congreso ACHE 2011, Barcelona.
- [2] J. Manterola, A. Martínez, J.A. Navarro, S. Criado, S. Fuente, G. Osborne, et al. Construcción del puente sobre la Bahía de Cádiz: Aspectos avanzados de su análisis. Congreso ACHE 2014, Madrid.
- [3] J. Manterola, A. Martínez, J.A. Navarro, S. Fuente, Bridge over the Cádiz Bay, Spain, en: 37th IABSE Symposium Madrid 2014, Engineering for Progress, Nature and People, 2014, pp. 532-533.
- [4] A. Martínez Cutillas, J.A. Navarro González-Valerio, S. Fuente García, Proyecto del tramo atirantado del Puente de la Constitución de 1812 sobre la bahía de Cádiz, Hormigón y Acero. 67 (2016) 71-85.
- [5] S. Fuente García, A. Martínez Cutillas, J.A. Navarro González-Valerio, Modelización estructural avanzada en el proyecto y construcción del Puente de la Constitución de 1812 sobre la bahía de Cádiz, Hormigón y Acero. 67 (2016) 159-172.
- [6] J.A. Navarro González-Valerio, C. Lucas Serrano, Cálculo y control detallado del proceso de construcción del tramo atirantado del Puente de la Constitución de 1812 sobre la bahía de Cádiz, Hormigón y Acero. 67 (2016) 111-122.



Las empresas de ingeniería Alvartis y G.O.C. han llevado a cabo, con éxito, la coordinación de seguridad y salud durante la construcción del Puente de la Constitución de 1812 sobre la Bahía de Cádiz.

