Ampliación del Puente de Rande. Diseño del Proceso Constructivo

Widening of the cable stayed bridge of Rande strait. Construction process design

Hugo Corres Peiretti[a], Javier de Cabo Ripoll[b], Joaquín Arroyo Marquez[c], Julio Sánchez Delgado[d]

[a] Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. FHECOR Ingenieros Consultores. Consejero hcp@fhecor.es

[b] Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. FHECOR Ingenieros Consultores. Jefe de Proyecto jcr@fhecor.es

[c] Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. PONDIO Ingenieros. Consejero Delegado jarrayo@pondio.com

[d] Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. FHECOR Ingenieros Consultores. Dtor. Técnico. jsd@fhecor.es

RESUMEN

Este artículo sintetiza el estudio del proceso constructivo de la ampliación del puente atirantado de Rande perteneciente a la autopista AP-9 y situado entre las ciudades de Vigo y Pontevedra, Galicia. Se trata de la primera ampliación de capacidad de un puente atirantado en el mundo, aumentando el número de carriles mediante dos nuevos tableros laterales, con la dificultad añadida de realizarse manteniendo el puente pre-existente en servicio durante toda la obra.

ABSTRACT

This article summarizes the study of the construction process of the widening of the cable-stayed bridge of Rande strait belonging to the AP-9 motorway and located between the cities of Vigo and Pontevedra, Galicia. This is the first expansion of capacity of a cable-stayed bridge in the world by increasing the number of lanes by means of two new decks and with the added difficulty of being carried out while maintaining the bridge in service throughout the work.

PALABRAS CLAVE: puente atirantado, ampliación, avance en voladizo, izado, cajón mixto

KEYWORDS: cable-stayed bridge, widening, incremental launching method, lifting, composite box

1. Introducción

La singularidad de la configuración estructural de la ampliación del Puente de Rande hace que los criterios habituales para plantear el diseño y el cálculo del proceso constructivo de un puente atirantado [1] [2] no sean de aplicación, pues este caso la geometría de montaje está influenciada por el comportamiento del puente pre-existente que se mantiene en servicio durante la ejecución.

Por otra parte, en el proyecto de construcción se proponía una ejecución del tablero mediante avance en voladizo disponiendo los carros de izado en las dovelas previamente instaladas, como es habitual en la ejecución de grandes estructuras sobre masas de agua [3]. Pero la flexibilidad transversal de la ampliación, con capacidad de giro longitudinal desaconsejó la puesta en práctica de este proceso, debido a la complejidad del diseño de un sistema de izado con capacidad de corrección de importantes giros transversales, la variación brusca de giro al cargar la dovela

desde elementos flotantes y la dificultad para determinar la geometría de fabricación de la dovela para un correcto ensamblaje. La alternativa que más independizaba el proceso de montaje del tablero era el recurso de carros suspendidos del tablero pre-existentes, pero la limitación de carga que era capaz de asumir dicho tablero llevó a implementar una solución de compromiso mediante dos carros: un situado sobre la ampliación ya construida, que, durante el izado, tiraría del extremo dorsal de las nuevas dovelas, y un carro suspendido del tablero pre-existente, que tiraría del extremo frontal de la dovela.

Un proceso singular en todo sistema de avance en voladizo es la ejecución de la dovela inicial o dovela "0". En este caso las dificultades de la maniobra eran debidas a la necesidad de izado por el exterior de los pilonos, el tamaño necesario de la dovela "0", doble del tamaño de la dovela tipo, y la interferencia del izado de dicha dovela con las grúas torres adosadas a uno de los fustes de cada pilono

2. Descripción del puente pre-existente y su ampliación

Para facilitar la exposición del proceso constructivo se incluye a continuación una breve reseña descriptiva tanto del puente pre-existente como de su ampliación.

El Puente de Rande cruza la Ría de Vigo, en Pontevedra (España) desde 1981. La estructura principal proyectada por el ingeniero italiano De Miranda consiste en un puente atirantado de 694,54 m de longitud total con 400,14 metros de vano principal y vanos laterales de 147,2 m. Las pilas principales son de 118,6 m de altura y sirven de elemento del que parten, a modo de abanico, 20 parejas de tirantes de los que pende el tablero. Este únicamente apoya físicamente en las pilas laterales mediante un péndulo metálico que sirve a su vez como elemento antilevantamiento de los vanos laterales.

El tablero es metálico y tiene una sección transversal, de 2,46 m de canto, que dota al puente de una plataforma de 23.46 m de ancho que se reparte en dos aceras de 1,0 m de ancho, una mediana de 1,0 m ancho y por dos carriles de circulación por sentido.

El tablero está formado por cuatro vigas longitudinales principales, dos interiores "doble T" y dos exteriores con sección cajón en donde se anclan los tirantes. Transversalmente se disponen diafragmas principales cada 21,06 m, coincidiendo con el anclaje de los tirantes en el tablero, y entre dos principales se disponen cinco diafragmas secundarios.

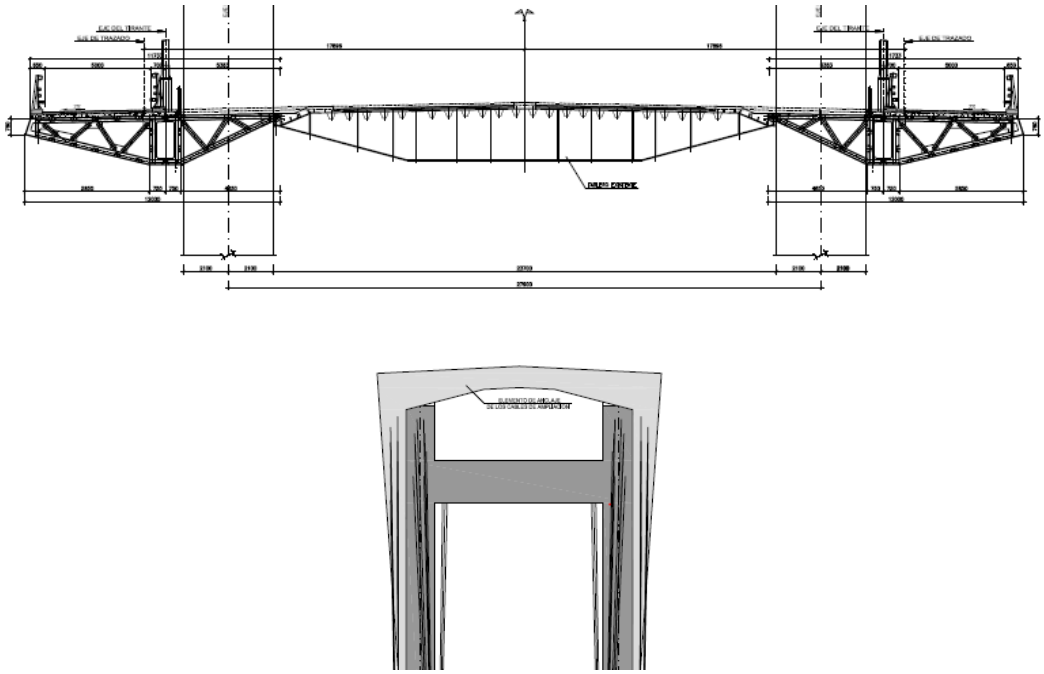
Como se ha indicado anteriormente, cada una de las pilas principales presentan dos familias de 20 tirantes, esto es, un total de 80 tirantes, con una distancia fija entre anclajes de 21,06 m. La configuración de éstos es la de cordones embebidos en una vaina de polietileno inyectada con lechada de cemento, tecnología en desuso desde la década de los 90. Los tirantes están formados por un número variable de cordones, entre 33 y 91, de 0,60" de diámetro y 140 mm^2 de área.

La ampliación consiste en disponer sendas plataformas laterales 7,1 m de ancho que permite albergar un nuevo carril por sentido. La solución estructural de cado uno de los nuevos tableros es una sección mixta formada por un cajón metálico de 2,3 m de canto máximo, en la zona más cercana al tablero existente, que disminuye hasta 0,76 m en el borde exterior. Sobre este cajón se dispone una losa de 0,2 m de espesor.

La conexión de estos tableros con el central está resulta mediante celosías metálicas verticales con triangulación tipo "Warren" y rótulas esféricas industriales (UIA) en el extremo interior.

Para sostener los nuevos tableros se disponen sendas familias de cables que, en su extremo inferior se anclan al cajón metálico del

tablero y en el extremo superior a un elemento metálico de fijación situado en la coronación de cada uno de los fustes de las pilas principales. La separación longitudinal de los anclajes en el tablero de los nuevos tirantes coincide con los del tablero central, 21,06 m, de modo que los anclajes de ambos en el tablero están en una misma sección transversal, unidos mediante las celosías metálicas indicadas anteriormente.



3. Singularidades del proceso constructivo

El proceso constructivo de los nuevos tableros se realizó mediante el método clásico de avance en voladizo pero con una serie de particularidades de gran complejidad que lo han hecho singular:

- Proceso de izado de las dovelas de inicio o dovelas "0"
- Conexión lateral al tablero pre-existente y limitada capacidad de las rótulas de conexión para transmitir fuerzas longitudinales.
- Influencia de la elevada deformación vertical del tablero central pre-existente durante el montaje de la ampliación. Y la elevada deformación transversal (giro sobre un eje longitudinal) de los tableros de ampliación durante su montaje.
- Uso de dos carros de izado por frente. Uno superior situado en la dovela del frente y otro inferior colgado del tablero actual.

A continuación se analiza cada uno de estos condicionantes en el estudio del proceso constructivo.

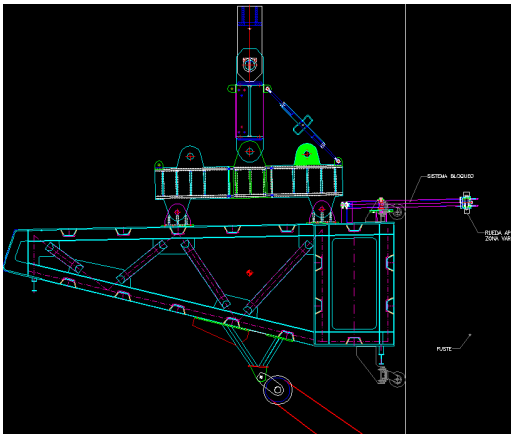
Figura 3. Izado de la dovela de cierre

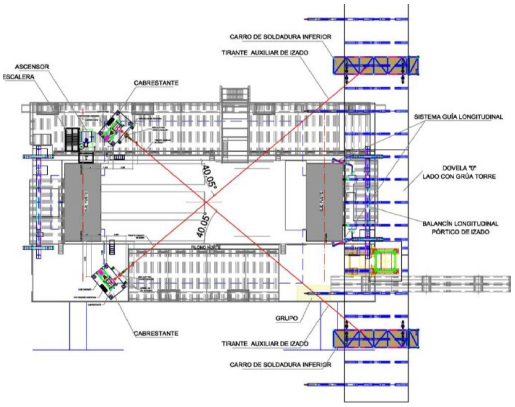
3.1. Montajes de las dovelas 0

Una de las maniobras más reseñable durante la ejecución de las obras fue el montaje de las dovelas "0", y en particular las situadas en el pilono norte lado este y en el pilono sur lado oeste, ya que por imposibilidad de espacio y tiempo hubo que reforzar y agujerear la dovela para permitir que las grúas torre las atravesasen y que el izado de las mismas se hiciesen con la grúa ya dispuesta

Figura 4. Dovela "0" NE con la grúa torre atravesándola

En las siguientes imágenes se puede ver el sistema de guiado durante el izado.





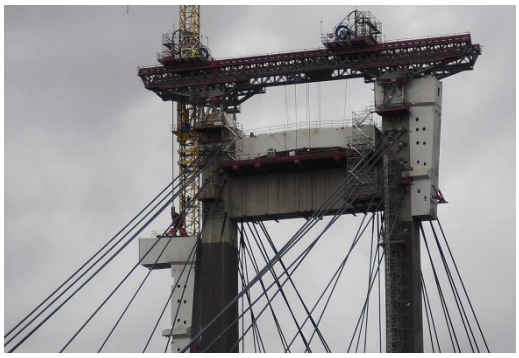
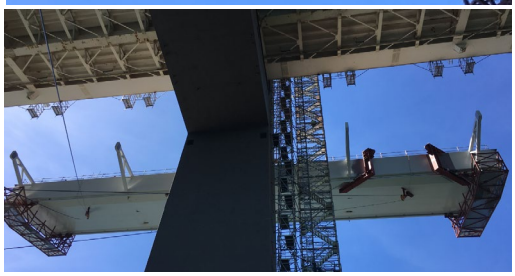


Figura 5. Dovela "0" NE con la grúa torre atravesándola



Ante vientos transversales que intentasen alejar la dovela del pilono, los "vientos" transversales en tensión permitían retener la dovela de manera que sólo despegan las ruedas superiores del sistema de rodadura para el viento máximo de diseño de acuerdo a la IAP-11 según la duración de la maniobra, que se estimó en menos de 3 días.

El sistema de "vientos" estaba formado por dos cabrestantes con reenvío de 16 T de capacidad total. La conexión de las poleas del reenvío a la dovela, en su platabanda inferior, se realizaba a través de sendos "trípodes". Para un mejor comportamiento frente a la acción del viento en sentido longitudinal los tirantes se cruzan en el espacio. Las proyecciones de los "vientos" en planta formaban un ángulo de 40,05º con el eje transversal del tablero.

Los cabrestantes estaban anclados a un muerto de anclaje formado por una zapata de hormigón armado de 3,5x2,3x0,5 m^3. Adicionalmente, y a fin de impedir el vuelco de la zapata en situación de parada accidental y actuando el viento de diseño de la instrucción IAP-11, era necesarios disponer un contrapeso de 0,77 T opuesto a la dirección de tiro. El reenvío se anclaba a la cimentación del pilono (o la plataforma metálica dispuesta sobre ella) por medio de un marco de volteo en donde se dispone un gato que permitía controlar la tensión en los cables.

Para permitir que los cables se crucen en el espacio uno de los cabrestantes está adelantado 1,0 m respecto al otro.

Adicionalmente al sistema de "vientos" auxiliares de retenida, se dispuso un sistema de guiado longitudinal durante toda la maniobra para evitar desplazamientos longitudinales de la dovela durante el izado debido a la acción del "viento de maniobra".

Este sistema estaba formado por:

- Un cilindro hidráulico
- Una viga transversal formada por dos UPN-160
- Un sistema de tope formado por una rueda de 5 T de capacidad
- Un enanos de anclaje de la viga transversal y del cilindro hidráulico a la dovela

El funcionamiento del sistema consistía en programar el cilindro hidráulico para que durante todo el izado ejerciese una presión mínima de 30 kg/cm^2 garantizando así que siempre la rueda estuviese en contacto físico con el fuste del pilono. El sistema permitía una presión máxima de 200 kg/cm^2 en el cilindro, lo que supone una reacción máxima en la rueda de 2,56 T. Desde el punto de vista geométrico, la carrera de 500 mm del pistón permitía garantizar el adecuado funcionamiento del sistema.

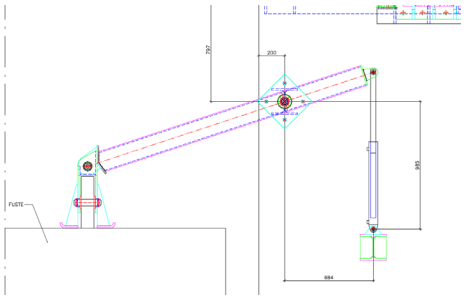


Figura 7. Sistema de guiado longitudinal (vista en planta)

Este sistema fue definido por medio de modelos 3D de elementos finitos tipo barra en donde se analiza globalmente el equilibrio de la dovela sometida a la acción del viento y retenida por los "vientos" y el sistema de rodadura mediante cálculos no lineales (despegue de ruedas) y en segundo orden.

Para distintas alturas y direcciones del viento el estudio se hizo para siguientes hipótesis: ausencia de viento y con "vientos" en tensión, el viento de maniobra (viento medio de 55 km/h a 130 m de altura) y el viento accidental normativo con periodo de retorno de 2 años.

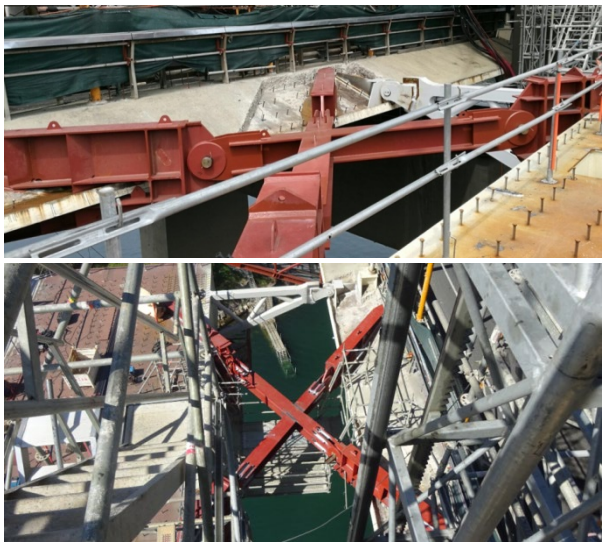
El resultado del estudio fue determinar la tensión que debían detener los "vientos" en situación de maniobra para distintas alturas de izado, la tensión a la que habría que poner los mismos en una hipotética parada accidental y las cargas en el sistema de rodadura en ambas situaciones.

En relación al desplazamiento de la dovela se obtuvieron desplazamientos transversales máximos de 16 mm en situación de izado y de 80 mm en situación accidental. Longitudinalmente, gracias al sistema de guiado, o al sistema de tope en situación accidental, no se producían movimientos.

3.2. Conexión con tablero pre-existente. Capacidad limitada de las rótulas de conexión para transmitir fuerzas longitudinales.

Las rótulas esféricas industriales (UIA) presentan una capacidad limitada para transmitir fuerzas longitudinales, capacidad muy inferior a la necesaria para trasmitir las fuerzas que los nuevos tableros transmitían al central pre-existente, por el desequilibrio de cargas en los tirantes, entre un lado y otro de las pilas principales, hasta disponer las dovelas sobre las pilas extremas y el sistema antilevantamiento.

Figura 8. Rotulas esféricas industriales de conexión entre los tableros de ampliación y el central



El hecho que el centro de gravedad de la carga permanente de los tableros de ampliación esté situado hacia exterior del tablero, del entorno de 2,5 m respecto al plano de los nuevos tirantes, supone una torsión importante en el tablero equilibrada como pares de fuerzas de signo contrario en los nuevos tirantes y en las rótulas de conexión con el tablero central.

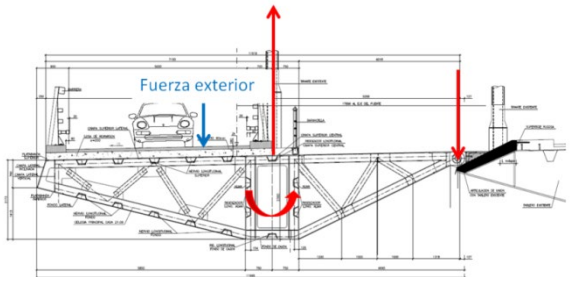


Figura 10. Transmisión de cargas entre los tableros nuevos y el existente

Esta deformación del tablero central provoca giros de eje longitudinal importantes en los tableros de ampliación, y por ende, en los anclajes de los tirantes. Durante el proceso constructivo se alcanzaban giros teóricos en los tirantes de hasta 32 mrad.

3.4. Uso de dos carros de izado por frente

Debido a la gran flexibilidad de los nuevos tableros durante el avance en voladizo no fue factible disponer un único carro superior por frente de avance para el izado de las dovelas ya que su peso y el de la dovela izada producirían giros muy elevados en el tablero difíciles de gestionar por el carro para permitir un izado vertical.

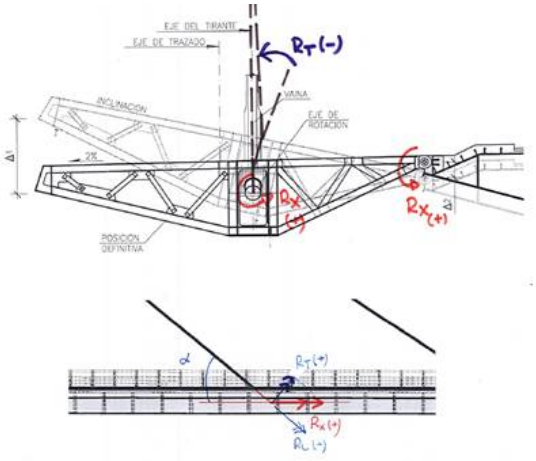


Figura 11. Esquema de los giros producidos en los tirantes nuevos debido a la flexibilidad transversal del sistema estructural

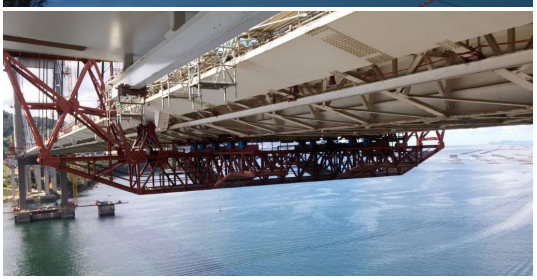
Tampoco era factible disponer un único carro inferior colgado del tablero central existente ya que este no tenía capacidad estructural suficiente para soportarlo.

Por tanto, se optó por izar las dovelas mediante un carro superior en la dovela del frente de 49 T de peso y otro inferior de 124 T colgado del tablero actual.

De esta forma, se aligeraban los pesos de ambos, los giros en la dovela del frente eran asumibles por el sistema hidráulico de

regulación de las patas del carro superior para mantener los gatos de izado apoyados en un plano perfectamente horizontal y el carro inferior valdría adicionalmente para los trabajos de rehabilitación de la estructura metálica del tablero central.

Las dovelas de cierre del vano principal se izaron mediante los carros superiores, habiéndose desmontado previamente los carros inferiores de forma parcial.



4. Secuencia de montaje y efecto de la flexibilidad de la estructura

La secuencia de un ciclo tipo de montaje de las cuatro dovelas simétricas respecto a una pila principal consistía en:

- Izado de las dovelas del vano principal.
- Unión con las dovelas en espera y tablero existente.
- Liberación de carga de los carros
- Tesado de tirantes
- Izado de dovelas del vano lateral
- Unión con las dovelas en espera y tablero existente.
- Liberación de carga de los carros
- Tesado de tirantes
- Avance de los carros inferiores
- Ferrallado y hormigonado de las losas superiores de las cuatro dovelas
- Avance de los carros superiores

En las figuras siguientes se muestran, para el frente de la dovela izada del lado del vano principal, las fases de izado y tesado de las dovelas del vano principal, y una vez equilibrada con las dovelas del vano lateral, las fases de movimiento de los carros y hormigonado de la losas superiores de cuatro dovelas. Tomando como puntos de control de

deformación la viga de borde del tablero de ampliación (punto A), el eje de los nuevos tirantes (punto B) y la unión rotulada (punto C) se observa la variación importante de deformaciones que se producían durante el ciclo tipo.

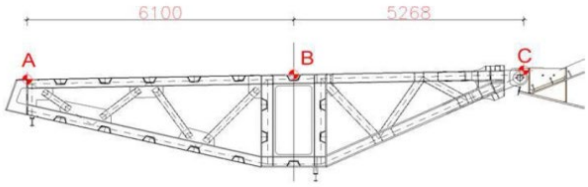


Figura 14. Esquema de puntos de control de deformación de los nuevos tableros durante el montaje

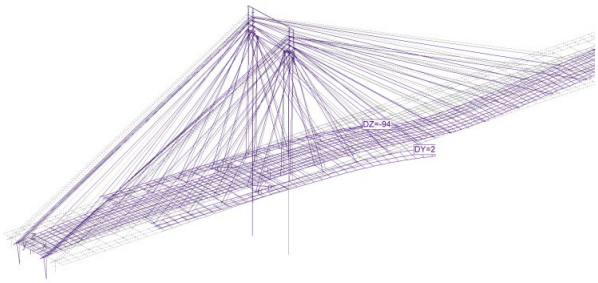


Figura 15. Izado de dovela del vano principal (A=-94 mm; B=-75 mm; C=-53 mm)

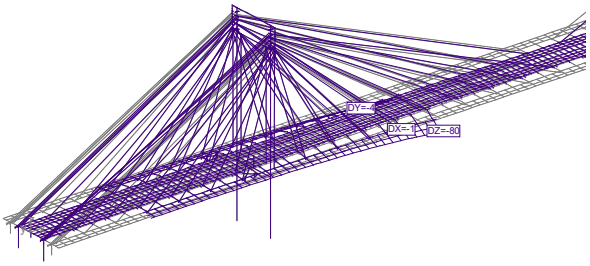


Figura 16. Liberación de carga de los carros (A=-80 mm; B=-35 mm; C=+7 mm)

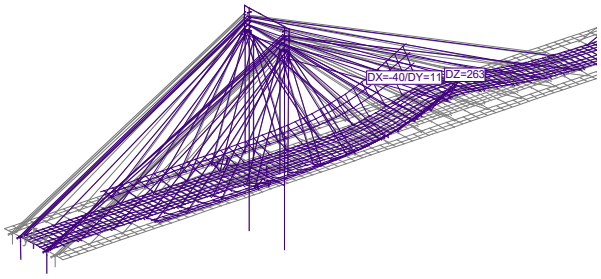


Figura 17. Tesado de los tirantes de las dovelas del vano principal (A=263 mm; B=179 mm; C=+86 mm)

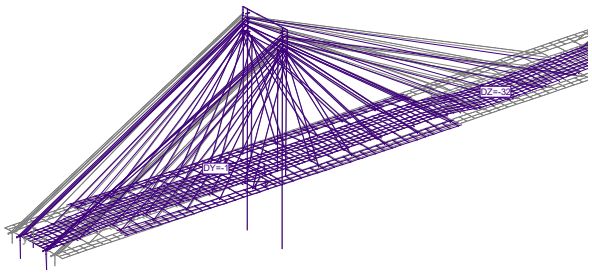


Figura 18. Avance de los carros inferiores (A=-10 mm; B=-5 mm; C=-1 mm)

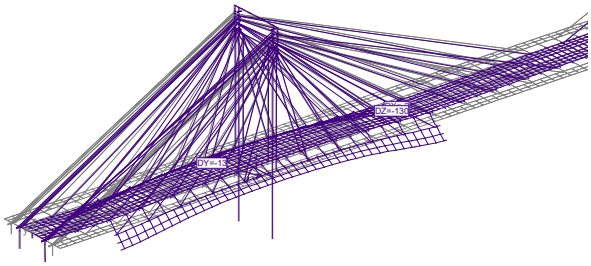


Figura 19. Hormigonado de las losas (A=-130 mm; B=-69 mm; C=-14 mm)

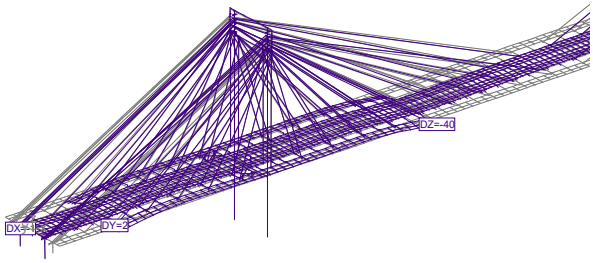


Figura 20. Avance de los carros superiores (A=-40 mm; B=-28 mm; C=-15 mm)

5 Criterios de cálculo.

Los criterios seguidos para las comprobaciones estructurales (tanto de la estructura principal como de los elementos auxiliares) durante el proceso de montaje se inspiraron en los Eurocódigos [4] [5]:

- Coeficiente de mayoración del peso propio de la dovela a izar: 1,50
- Coeficiente de mayoración del peso de los carros y sus elementos auxiliares: 1,35
- Coeficiente de toma de carga para tener en cuenta la interacción con la pontana: 1,20
- Viento de diseño de los carros correspondientes a un periodo de retorno de 10 años.

- Sobrecarga de construcción en las plataformas de los carros de 2 kN/m2.
- Consideración de la caída accidental de una pieza izada con un coeficiente de amplificación dinámica de 2,0.

6. Objetivo del proceso constructivo y cotas de montaje

El objetivo de proceso constructivo era que al final del mismo los tableros de ampliación y el central quedasen a la misma cota teniendo en cuenta el bombeo del tablero central y el peralte del 2% de los nuevos tableros y con las cargas en los tirantes indicadas en proyecto. Esto en cotas relativas significa que para cada sección del puente la deformada al final del proceso en los tres puntos de control fuese la misma.

Por ello, una vez obtenidas las deformaciones que experimentaban los tableros al final del proceso constructivo y verificado todos los condicionantes del mismo (giros en tirantes, cargas en rótulas y cruces de "San Andrés",….) se obtenían las cotas de montaje/fabricación como la inversa del giro transversal teniendo en cuenta la cota que tendría el del tablero central en el momento de la unión con la dovela y su cota al final del proceso constructivo.

En la siguiente figura se muestra para una sección, y de forma esquemática, la determinación de las cotas de montaje/fabricación (rojo) a partir de la deformación al final del proceso constructivo (azul) para obtener la deformada final deseada (verde)

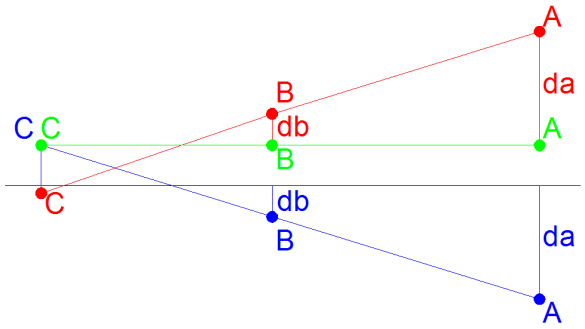


Figura 21. Esquema de determinación de las cotas de montaje/fabricación de las dovelas

7. Conclusiones y agradecimientos

El puente de Rande es el primer puente atirantado del mundo en que se lleva a cabo una ampliación de capacidad aumentando el número de carriles por medio de dos nuevos tableros a ambos lados del puente actual. La singularidad de su configuración ha llevado a tener que diseñar varios procesos de construcción singulares para poder responder a los numerosos requisitos planteados durante la ejecución.

La construcción de la ampliación ha supuesto un gran reto ingenieril, teniendo en cuenta especialmente que el puente se mantuvo en servicio durante toda la obra.

Los autores desean expresar su agradecimiento por la confianza depositada por la UTE RANDE, constituida por DRAGADOS y GRUPO PUENTES, en FHECOR Ingenieros Consultores y PONDIO Ingenieros para la participación en el proceso constructivo de la ampliación de este puente como asistencia técnica. Asimismo quisiera agradecer a Felipe Tarquis y Héctor Bernardo de GGRAVITY Engineering su estrecha colaboración durante toda la obra.

Referencias

[1] M. Virlogeux. Erection of cable-stayed bridges. The control of the designed geometry.

International Conference AIPC, FIP, Cable-stayed and suspensions bridges. Deauville. 1994
[2] H. Svensson. Cable-Stayed Bridges. 40 Years of Experience Worldwide. Ernst&Sohn. Berlín.
[3] H.Corres, J. de Cabo y J. Sánchez. Ingeniería de lo efímero en la construcción del tablero del Viaducto del río Ulla. VI Congreso de ACHE. Madrid 2014
[4] UNE-EN 1991-1-6. Eurocódigo 1. Parte 1-6- Acciones durante la ejecución. AENOR.2010
[5] EN 1991-3. Eurcode 1. Part 3. Actions induced by cranes and machinery. CEN.2006.