

PUENTE DE VIRGEN DE LA PEÑA (1) DISEÑO Y ANÁLISIS GENERAL

Oscar Saiz Sánchez^a, Jose Antonio Crespo Martínez^b,

Domingo Lorenzo Esperante^c

^a Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. SILGA SL. o.saiz@silga.es

^b Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. SILGA SL. j.a.crespo@silga.es

^c Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. SILGA SL. d.lorenzo@silga.es

RESUMEN

El futuro puente sobre el río Saja en la localidad de Virgen de La Peña, Cantabria, es un puente colgante de tres vanos con una distribución de luces de 14'00 + 68'00 + 14'00 metros. El tablero del puente, que es mixto, está sustentado por péndolas que cuelgan de las catenarias dispuestas en dos planos verticales uno en cada extremo de su sección. Las catenarias, que están formadas por dos cables cada una, están separadas 14.20 metros en sentido transversal. Las péndolas, de cable único, sostienen a tablero por medio de riostras transversales.

ABSTRACT

The bridge over the Saja river in the town of Virgen de La Peña, Cantabria, is a three-span suspension bridge with a distribution of 14'00 + 68'00 + 14'00 meters. The deck, which is composite with steel beams and reinforced concrete slab, is supported by vertical hangers that hang from the catenaries arranged in two vertical planes one at each end of its section. The catenaries, which are formed by two cables each, are separated 14.20 meters in transverse direction. The hanger ropes support the board by means of transverse braces.

PALABRAS CLAVE: Puente, colgante, catenaria, péndolas.

KEYWORDS: Bridge, suspension, catenary, hanger ropes.

1. Introducción

El nuevo puente cruza el Río Saja a la entrada de la localidad cántabra de Virgen de La Peña, de la que toma su nombre. Sustituye a un puente que debido a su estrechez dificulta el tráfico en ese punto de la carretera autonómica CA-283. El puente existente presenta una anchura total de

plataforma de 6'00 metros, medidos entre los bordes exteriores del tablero, que acoge a dos barandillas, dos aceras, y la calzada. Esta anchura tan exigua impide el cruce de dos vehículos pesados y dificulta sobremanera el tránsito peatonal. El trazado en planta presenta graves

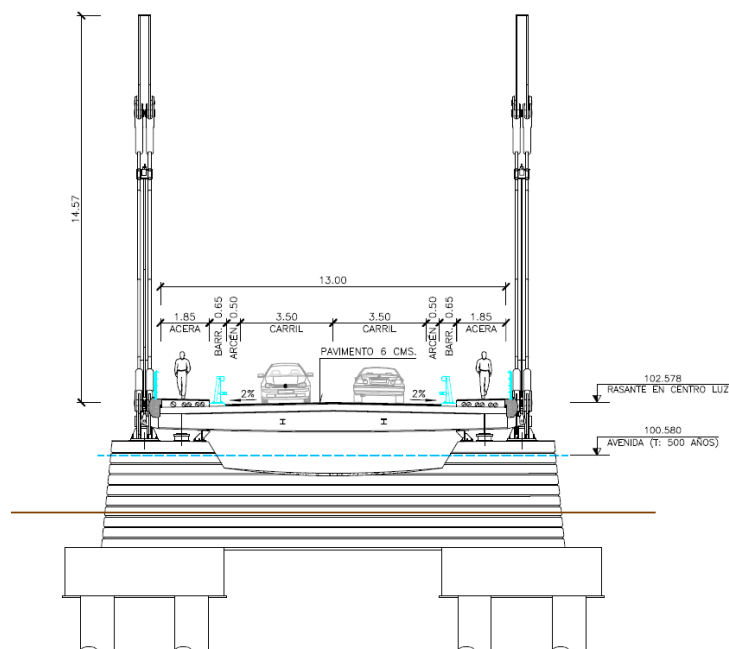
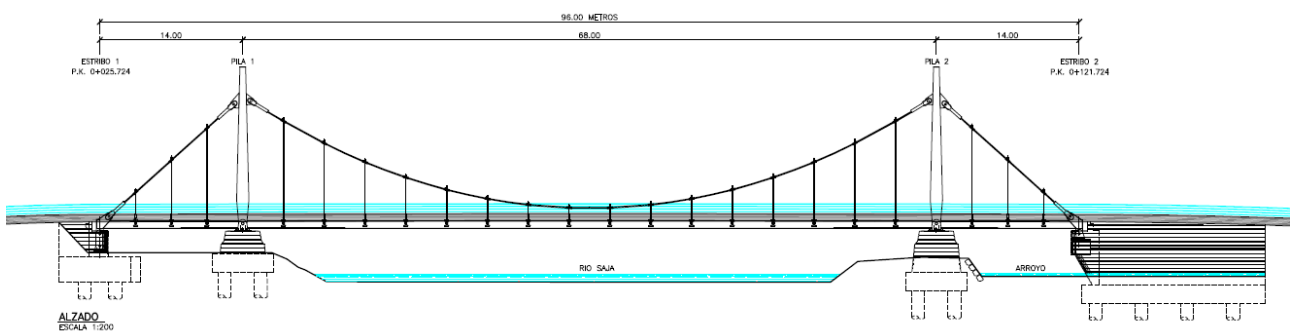
deficiencias debido a la existencia de una curva y contra curva, ambas de radios muy reducidos. Con la construcción de este nuevo puente se

mejora también este aspecto, disponiendo una rotonda en un extremo y eliminando la curva y contra curva en el otro.

2. Diseño

El puente, de los denominados colgantes, está compuesto por dos estribos, dos pilas, un tablero y el conjunto de cables para la sustentación del mismo. La configuración longitudinal corresponde a tres vanos con luces de 14'00 + 68'00 + 14'00 metros. Transversalmente el

tablero está soportado por dos planos de cables principales y péndolas, separados 14.2 metros. Los extremos inferiores de las péndolas se anclan y sostienen al tablero por medio de unas vigas metálicas transversales.



La geometría global del puente se muestra en la figura 3, y en la figura 4 el sistema resistente longitudinal.

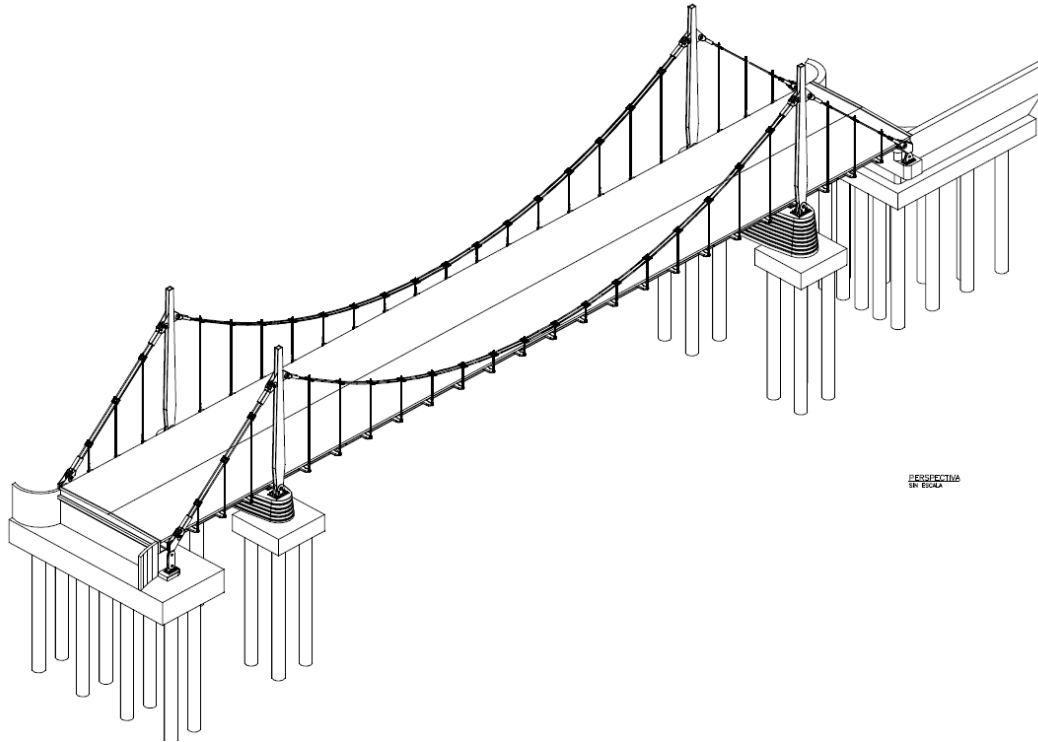
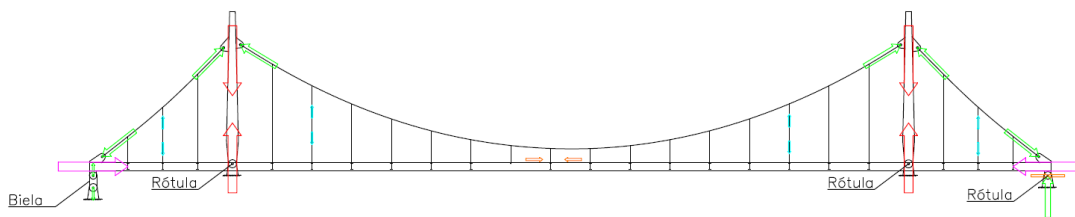


Figura 3. Vista 3D de la estructura del puente.



Como se puede ver los esfuerzos horizontales procedentes de los cables principales laterales se resisten por el tablero que actúa como una biela comprimida a tal efecto. Con ello se consigue que las componentes gravitatorias de las acciones sólo produzcan reacciones verticales sobre pilas y estribos. Se cambian las reacciones horizontales sobre estribos por la compresión en el tablero. Las reacciones verticales en los estribos se compensan fácilmente con su peso

propio. En el estribo 1 se disponen unas bielas verticales, mientras que en el estribo 2 unas rótulas que impiden el desplazamiento horizontal. Con este sistema se liberan los acortamientos y dilataciones longitudinales del tablero evitando los esfuerzos que su coacción produciría.

Los esfuerzos longitudinales debido al tráfico y viento los absorben las rótulas fijas del estribo 2.

Los mástiles metálicos en pilas que sustentan los cables principales están sometidos a compresión simple, para conseguirlo se les ha dotado de unas rótulas en su extremo inferior y se ha diseñado la geometría de los cables portantes para que sus

prolongaciones (imaginarias) se crucen en el eje del mástil. Los únicos esfuerzos de flexión provendrán de la acción del viento.

A continuación se muestran con más detalle algunos elementos del puente.

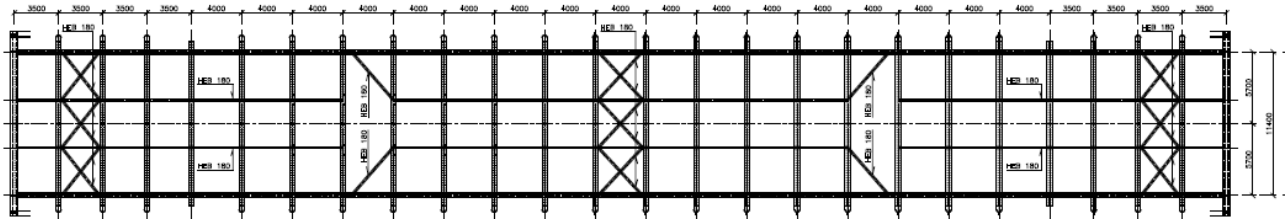


Figura 5. Estructura metálica del tableros. Planta.

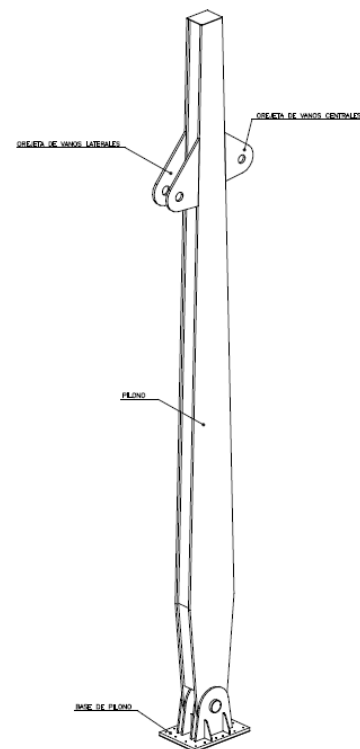
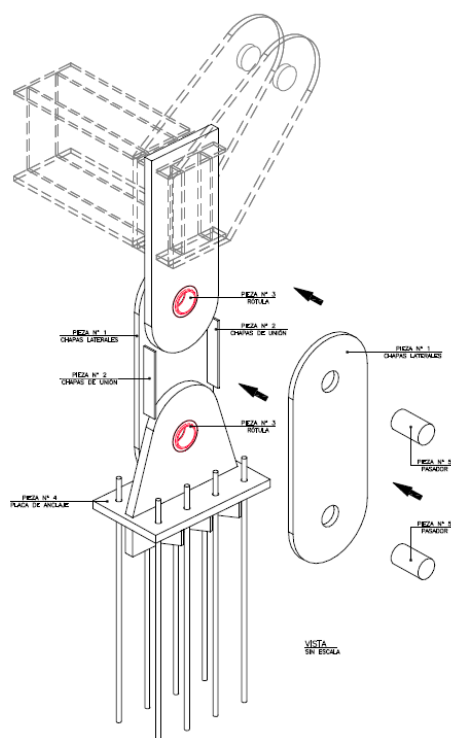
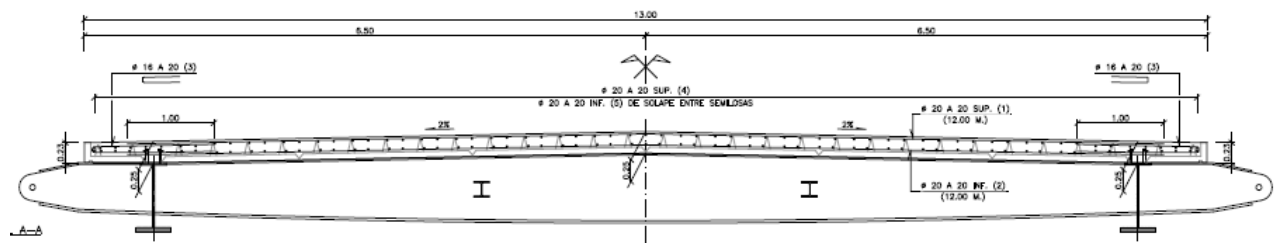


Figura 7. Bielas del Estribo 1.

Dado que la profundidad a la que se encuentra el sustrato competente, que varía entre 7 y 10 metros por debajo de la superficie del terreno, todas las cimentaciones se ha diseñado como profundas. Para ellos se han utilizado pilotes de 1.25 metros de diámetro empotrados en la roca sana (arenisca de grano fino a medio).

2. Análisis estructural

El análisis general del puente se ha realizado por medio de un modelo de elementos finitos que contiene el tablero, los mástiles y los cables. El contorno de este modelo está delimitado por las placas de apoyo de la biela del estribo 1, los mástiles de pila 1 y 2, y las rótulas del estribo 2 en sus respectivos elementos.

Para el análisis de los estribos y las pilas se han confeccionado modelos individuales de elementos finitos de cada elemento.

Todos los modelos y sus análisis correspondientes se han llevado a cabo con el programa Sofistik.

El modelo general contiene elementos lineales vigas para los mástiles y los elementos metálicos del tablero, cables para los cables principales y péndolas, y elementos losa-laja para el tablero. Los cables dobles de los elementos principales se ha sustituido por 1 de sección equivalente.

El modelo del estribo 1 se ha confeccionado con elemento losa-laja para encepado y alzados, y vigas para los pilotes.

Los modelos del estribo 2 y de las pilas contienen elementos viga, para los pilotes, y elementos sólidos para encepados y alzados. En estos casos la utilización de elementos de volumen ha sido motivada por la complicación de las geometrías a representar, difícilmente asimilables a elementos lineales o planos.

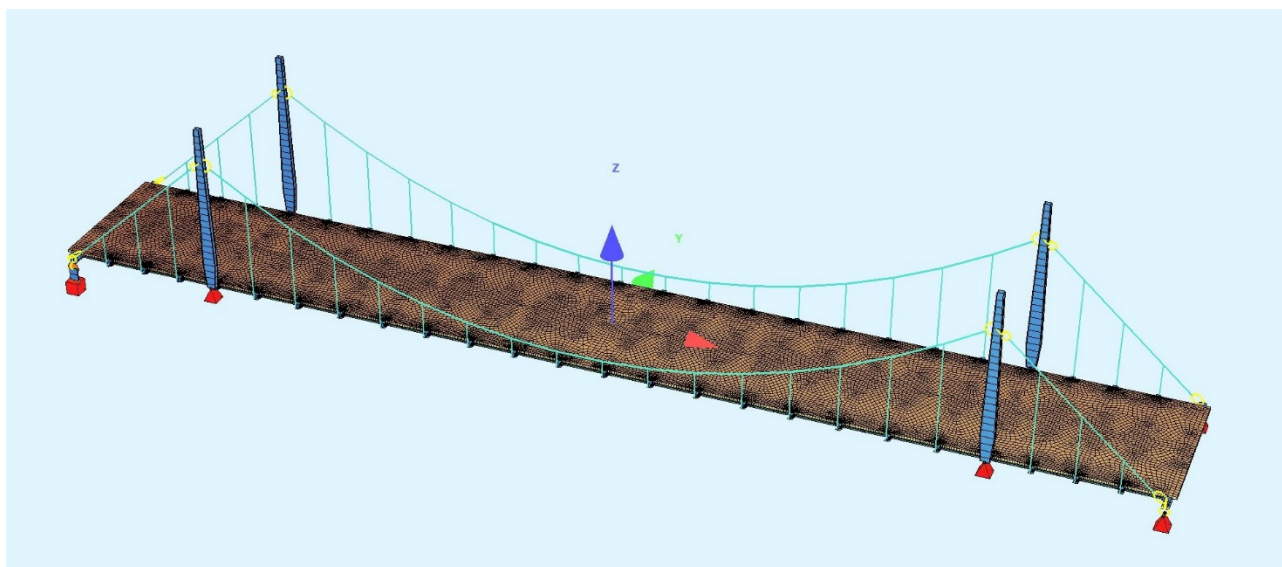


Figura 9. Modelo de elementos finitos. Modelo general

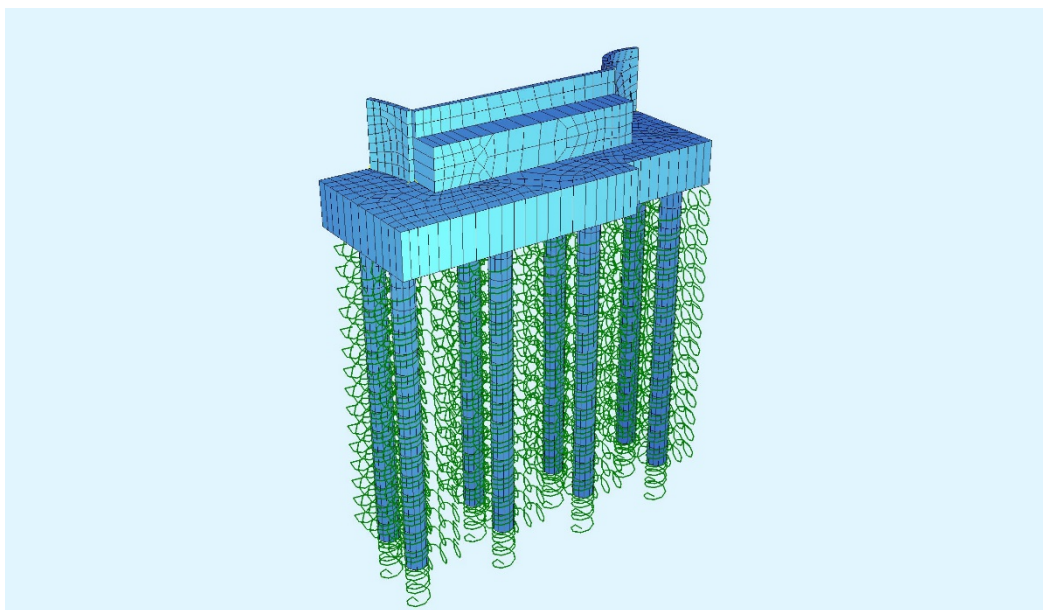
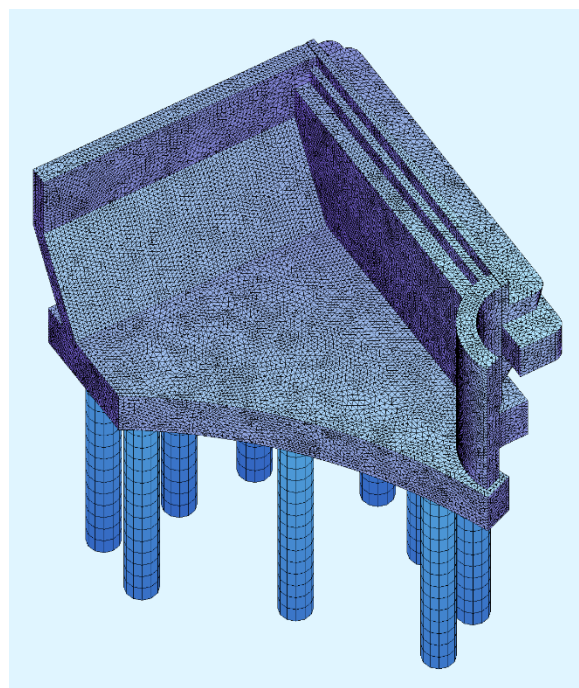
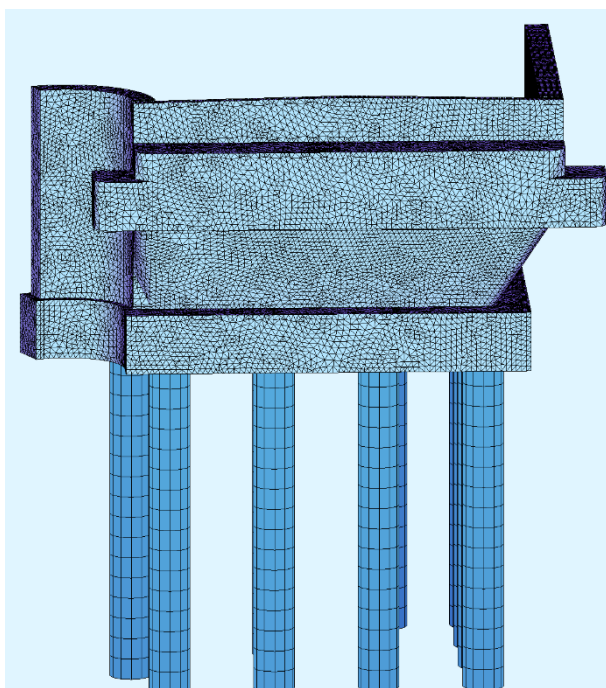


Figura 10. Modelo de elementos finitos del estribo 1



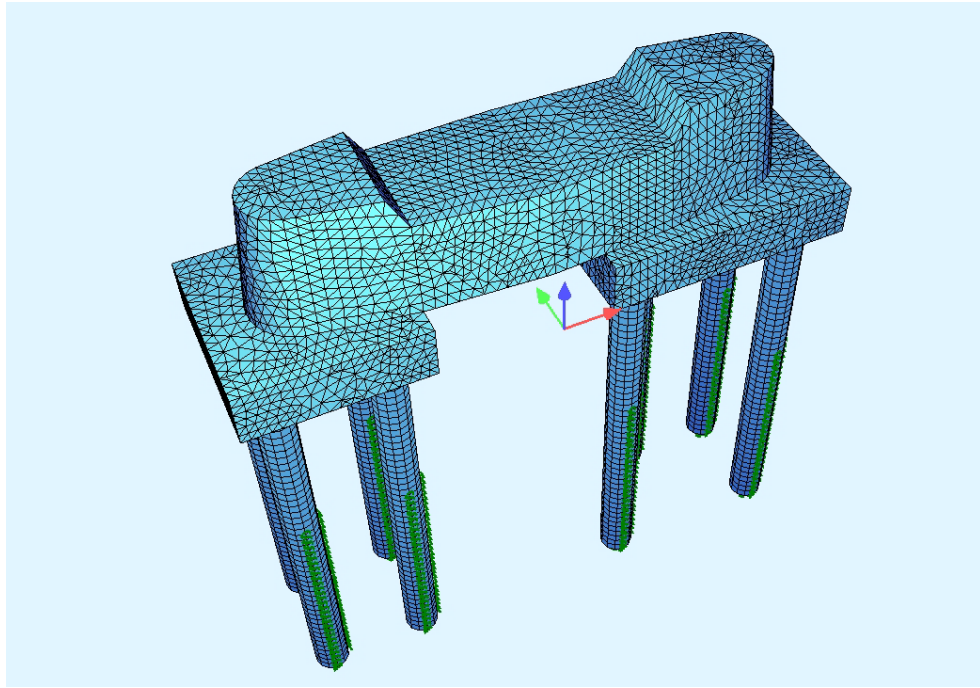


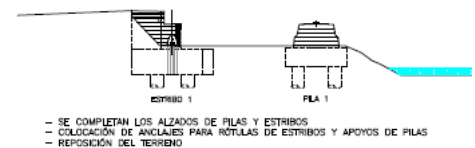
Figura 12. Modelo de elementos finitos de la pila 2

La organización y el tipo de análisis ha estado condicionado por la presencia de los cables, dado que su comportamiento mecánico varía con su estado tensional. Para recoger el comportamiento del conjunto con precisión se ha elegido un análisis en 3º orden, manteniendo el comportamiento elástico de los materiales, excepto la reología y la variación del módulo de elasticidad del hormigón que se ha incluido en el análisis.

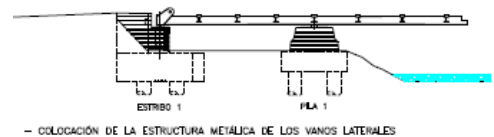
También es necesaria la inclusión del proceso constructivo, fijando una deformación y un estado tensional objetivo al acabarse la construcción del puente.

El proceso constructivo ha estado condicionado por la exigencia de no tocar el cauce durante el montaje del tablero, no pudiendo disponer de ningún punto de apoyo intermedio en el vano central.

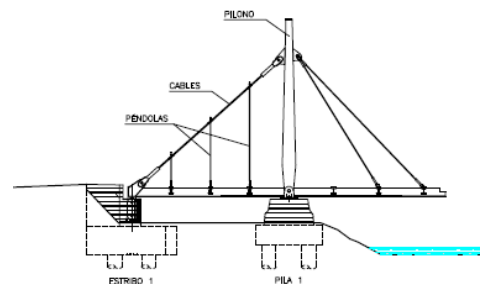
- 1- Se ejecutan los estribos y parte inferior de las pilas.



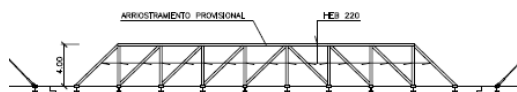
- 2- Se colocan los tramos laterales (27 metros) de la estructura metálica del tablero



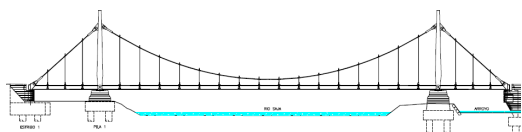
- 3- Se colocan los mástiles y los tirantes provisionales



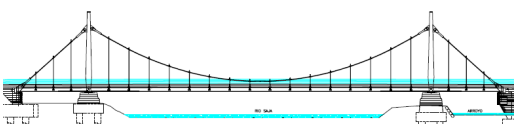
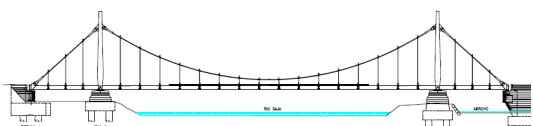
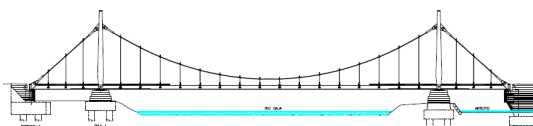
- 4- Se coloca el tramo central rigidizado provisionalmente por una celosía superior.



- 5- Se da continuidad a las vigas metálicas, se colocan los cables, se retira la celosía provisional. Se ajustan las péndolas para obtener la geometría objetivo al final de la construcción.



- 6- Se hormigona la losa del tablero en las fases previstas.



En la fase 5 debemos dejar una geometría de la parte metálica y cables para que una vez acabado el puente tengamos la rasante prevista y los esfuerzos en las péndolas previstos.

Hay que tener en cuenta que una vez hormigonada la losa, sólo serán convenientes pequeños retoques de los esfuerzos en los cables y en la rasante.

El proceso constructivo se ha analizado en teoría de 3º orden reproduciendo las fases hasta la finalización del tablero. Conocida las deformaciones aparecidas entre la fase 5 y el final del puente, se ha aplicado el objetivo de compensarlas negativamente en la misma fase 5, para así llegar a la deformación final prevista.

Se ha considerado la doble simetría del modelo, despreciando pequeños movimientos horizontales debido a que el punto fijo está en el estribo 2. Así que tenemos 11 incógnitas (4x11 péndolas), y 11 grados de libertad que son las flechas verticales en los once puntos centrales de las vigas transversales asociadas a cada péndola (2x11). Si el problema fuese simplemente lineal sería cuestión de la resolución del sistema de ecuaciones de 11 esfuerzos en péndolas, en que cada esfuerzo produce 11 flechas en los puntos mencionados. Dado que el problema es no lineal hay que seguir un procedimiento iterativo para conseguir el resultado perseguido, dado que el esfuerzo de cada péndola produce resultados distintos dependiendo del estado tensional del sistema. Afortunadamente el programa Sofistik aporta tal procedimiento, que funciona adecuadamente siempre y cuando aportemos un estado previo que no se aleje en demasía del que queremos conseguir. Lo que a su vez obliga al usuario a algunas “iteraciones manuales” juiciosas con el comportamiento del sistema, para introducir en la fase 5 unas condiciones iniciales adecuadas.

Conseguido llegar al final de la construcción con las deformaciones y estados tensionales previstos tenemos que aplicarle la reología y acciones variables correspondientes para tener la situación a largo plazo.

Hay que estudiar el efecto de las diferentes acciones variables para asegurar el correcto comportamiento de la estructura en ELS y en ELU. Como sabemos que el problema es no lineal, no es posible obtener resultados correctos para una situación determinada realizando el cálculo del estado tensional producido por cada acción individualmente y realizar la superposición ponderada de los estados tensionales individuales procedentes de cada acción.

Sobre el puente acabado se ha realizado un análisis elástico y lineal de las acciones individuales, que aun siendo “erróneo” nos ha permitido descubrir las posiciones más desfavorables de estas acciones (carros y sobrecarga repartida sobre todo) para obtener las situaciones tensionales pésimas en los diversos elementos, por ejemplo, la posición del carro para la máxima tracción en una biela de E1, o máximo esfuerzo cortante en una sección de las vigas principales del tablero.

En función de lo anterior se han realizado el análisis de combinaciones explícitas, en 3º orden en la que han participado todas las acciones ponderadas tanto para ELS como para ELU.

Los análisis de estribos y pilas se han hecho en régimen elástico y lineal, incluyendo un módulo de balasto lateral y longitudinal en los pilotes. Las acciones provenientes del tablero que se han usado han sido las máximas y mínimas provenientes de las combinaciones explícitas en el modelo general que acabamos de mencionar. Cuando ha interesado convertir los estados tensionales de los elementos de volumen en esfuerzos en secciones, se han realizado cortes donde ha interesado (por ejemplo, base de un muro) y se integrado el estado tensional para convertirlo en axiles, cortantes y momentos.

Por último, se presentan las mediciones de los materiales estructurales del tablero:

- Cables

Tipo Cerrado, con protección Galfan

44 péndolas, entre 1.5 y 10 metros de longitud
Sección 36 mm de diámetro

8 cables laterales con 14.9 m de longitud
Sección 96 mm de diámetro

4 cables laterales con 69.1 m de longitud
Sección 92 mm de diámetro

- Acero estructural

13700 kg de acero S 275 J2 en perfiles

186000 kg de acero S 275 J2 en chapas

- Hormigón

267 m3 de HA 30/B/20/IIa

- Acero en Barras

70876 kg de B 500 S

- Encofrados perdidos

1267 m2 de semilosa autoresistente

En el momento de la redacción de este artículo el puente está en construcción con las obras saliendo de cimentación, y previsiblemente estará acabado cuando se celebre el VIII congreso de ACHE en Santander.

Datos:

Propiedad, **Autonomía de Cantabria**

Empresa constructora, **UTE Ascan-Emesa**

Director de Obra,

D. Carlos L. Delgado Linares

Jefe del Servicio de Proyectos y Obras

Dirección General de Obras Públicas

GOBIERNO DE CANTABRIA

Proyecto y asistencia técnica a la obra,

SILGA SL, Proyectos y Servicios de Ingeniería