

Dos pasos superiores integrales con fuerte esviaje sobre la AP-8 en Irún

Two integral bridges with strong skew over the AP-8 highway in Irun

Juan Luis Bellod Thomas^a, David Sanz Cid^b

^a Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Cesma Ingenieros, S.L. Director General. cesma@cesmaing.com

^b Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Cesma Ingenieros, S.L. Ingeniero. cesma@cesmaing.com

RESUMEN

Las estructuras PS-1 y PS-2 se sitúan sobre la AP-8 y la nueva Ronda Sur de Irún, a pocos metros de distancia entre sí. El PS-1 tiene un único vano de 45.15 m de longitud y ancho variable. Se trata de una estructura integral, puesto que el tablero se empotra en los estribos, y con un fuerte esviaje. El tablero es mixto, con un cajón metálico y una losa superior de hormigón armado, cuyos vuelos se ejecutan mediante una estructura auxiliar. Por su parte el PS-2 tiene una longitud de 70 m, dividida en dos vanos de 23 m y 47 m. El tablero, con doble acción mixta, se empotra en el estribo 1 y se apoya sobre la pila y sobre el estribo 2. El tablero es también mixto; en este caso toda la losa se hormigona sobre prelosa colaborante.

ABSTRACT

The bridges PS-1 and PS-2 fly over the AP-8 and the new *Ronda Sur* Road in Irun and are only a few metres apart from each other. The PS-1 has a single 45.15 m span and variable width. It is an integral structure, since the deck embeds itself in the abutments. It also features a strong skew. The composite deck includes a steel box girder and a top reinforced concrete deck, whose cantilevers are executed by means of an auxiliary structure. On the other hand, the PS-2 has a length of 70 m, divided into two spans of 23 m and 47 m. The deck, with double composite action, embeds itself in abutment 1 and is simply supported over the pier and abutment 2. The deck is also composite, with a pre slab for its whole width.

PALABRAS CLAVE: puente mixto, doble acción mixta, puente integral, rótula plástica

KEYWORDS: composite bridge, double composite action, integral bridge, plastic hinge

1. Introducción

Los dos pasos superiores que son objeto de este artículo se enmarcan dentro del proyecto de ampliación a seis carriles de la AP-8 en el tramo Behobia-Ventas de Irún, dentro del cual estaba incluida la creación de un nuevo enlace que conecte la autopista con el entramado viario de Irún. Dicha actuación fue denominada como “Ronda Sur de Irún” y, para garantizar su permeabilidad sobre la autopista, se planteó la ejecución de estos pasos superiores, entre otras estructuras.

Si bien en el momento de redacción de la presente ponencia aún no se ha realizado la ampliación a seis carriles, tanto los ramales de acceso como los dos pasos superiores se han ejecutado considerando dicha previsión.

Cesma Ingenieros redactó el proyecto de los pasos superiores denominados como PS-1 y PS-2, así como de los muros adyacentes, y realizó las labores de asistencia técnica a la obra y al taller metálico.



Figura 1. Vista aérea de la AP-8 en la zona de los pasos superiores

2. Condicionantes

El principal condicionante para ambas estructuras es el hecho de que deben salvar la autopista AP-8 a la altura del municipio de Irún, que es uno de los puntos estratégicos de la Red de Carreteras Nacional, al ser la principal conexión entre Euskadi (España) y Aquitania (Francia). En concreto, se trata de un tramo de gran intensidad de tráfico todo el año y con un elevado porcentaje de vehículos pesados. Esto condicionó la tipología estructural, por lo que se buscó, en todo caso, soluciones de fácil instalación y con el menor mantenimiento posible.

Adicionalmente, para el caso del PS-1, el trazado del ramal de acceso desde la AP-8 preveía un fuerte esviaje en la estructura, puesto que el ángulo de cruce entre el eje de trazado del ramal y el de la autopista es de 135° . Además, el ramal presenta un ancho variable como

consecuencia del bypass proyectado para disminuir el tráfico en la rotonda adyacente a la estructura.

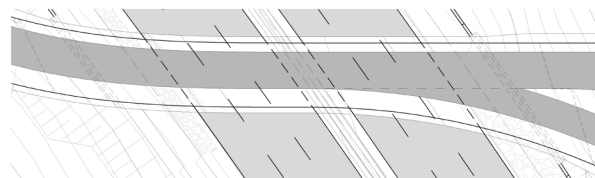


Figura 2. Vista en planta del ramal correspondiente al PS-1

Por su parte el PS-2 no presenta ni esviaje ni ancho variable, pero la topografía y la futura ampliación a seis carriles de la autopista obligaron a definir una distribución de luces muy irregular (23+47), lo que dificultó el dimensionamiento de la estructura.

Respecto a la geotecnia, la campaña realizada detectó roca sana en profundidades relativamente someras, lo que permitió emplear cimentación directa. Sin embargo, aunque inicialmente estaba concebido así para ambas estructuras, finalmente hubo que emplear

cimentación profunda en el PS-2 con objeto de reducir las excavaciones que hubieran sido necesarias para su ejecución. Dichas excavaciones no resultaban viables por la presencia de viviendas cercanas en el estribo norte y por el posible fenómeno de inestabilidad global que se pudiera producir en la ladera situada en el trasdós del estribo sur.

Por otro lado, los muros previstos como aletas de continuación de los estribos del PS-1 eran en su mayoría muros de pie de talud, lo que complicó su diseño. Por su parte, en el estribo 1 del PS-2 el cambio de tipología de la cimentación obligó a definir un muro de bataches con anclajes permanentes al terreno.

Como condicionante final, en ambas estructuras fue necesario garantizar el paso de servicios (agua potable, telecomunicaciones, etc.) a través del tablero y de los estribos.

3. Concepción estructural

Con el objetivo de cumplir los condicionantes anteriores, se plantea la ejecución de dos tableros mixtos, conformados por un cajón metálico abierto de sección trapezoidal y una losa superior de hormigón. El PS-1 se plantea como un puente completamente integral, mientras que se podría decir que el PS-2 es “semiintegral”, puesto que uno de sus estribos lo es mientras que el otro presenta apoyos de neopreno.

Esta tipología permite garantizar el cumplimiento de todos los condicionantes planteados, ya que facilita y simplifica el proceso constructivo, reduciendo significativamente el plazo de ejecución de los trabajos en obra, a la vez que disminuye considerablemente las labores de mantenimiento durante la vida útil de la estructura.

El hecho de que se trate de estructuras mixtas permite mantener en servicio la AP-8 durante la ejecución, siendo únicamente necesario realizar cortes totales nocturnos durante el izado y montaje de los cajones metálicos. Las losas de hormigón se ejecutaron

sin apearse el cajón metálico. En el caso del PS-1, esto se resolvió mediante el empleo de una prelosa central y una estructura auxiliar, unida al cajón, que permitía adaptarse a la compleja geometría de la losa. Por su parte, en el caso del PS-2 se optó por el empleo de prelosas continuas en todo el ancho de la losa.



Figura 3. Estructura auxiliar para el hormigonado de los vuelos del tablero del PS-1

Por otro lado, haciendo que las estructuras sean integrales o “semiintegrales” se consigue eliminar elementos cuya vida útil es inferior a la de la estructura, como es el caso de los apoyos y de las juntas de dilatación. El mantenimiento y la eventual sustitución de estos elementos es una de las principales labores de conservación en este tipo de estructuras, con el consiguiente coste asociado; sin olvidar la afección que implicaría al tráfico en la AP-8.

4. Descripción de los pasos superiores

4.1 PS-1

La estructura del paso superior 1 (PS-1) presenta una longitud total de 45.15 m. El ancho de la sección transversal, motivado por la situación de la estructura, es variable. Desde el inicio de la estructura en el P.K. 1+210.50 hasta el P.K. 1+233.91 el ancho de la sección transversal es constante e igual a 8.3 m, formado por una calzada de 4 m con arcenes de 1 y 2 m, y barreras de 0.65 m. A partir de este punto y hasta el final de la estructura en el P.K. 1+255.65, el ancho varía de los 8.3 m a los 10.83 m. En este caso se mantienen constantes los espacios destinados a la colocación de la barrera y arcenes, variando la calzada de los 4 a los 6.23 m.

El tablero, tal y como se ha comentado anteriormente, es de estructura mixta, con un

cajón metálico inferior y una losa de hormigón armado.

El cajón metálico presenta un ancho inferior constante en la zona inicial del puente de 3.2 m, para variar desde este valor a 5.58 m en su zona final siguiendo el avance de P.K. Las almas laterales son verticales y se rematan por platabandas superiores en donde se establece la conexión con el hormigón. El cajón presenta un canto constante de 1.5 m.

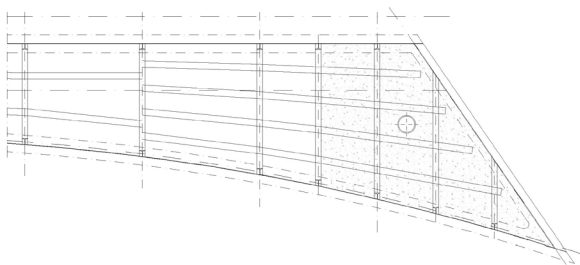


Figura 4. Ancho variable en platabanda inferior

La losa, con voladizos a ambos lados de ancho constante de 2.55 m a lo largo de todo el tablero, presenta un canto constante de 0.25 m.

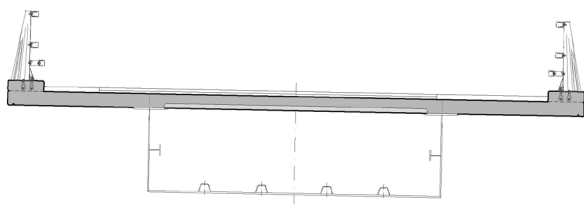


Figura 5. Sección transversal tipo del PS-1

El tablero se empotra en los estribos, dando lugar a un puente integral. Ambos estribos son paralelos entre sí y de anchura 12.32 m y 17 m para cada uno de ellos. La altura total del estribo 1 es de 9 m, mientras que la del estribo 2 es de 8.65 m. Están formados por un muro de 0.60 m de espesor con cimentación

directa por medio de zapatas, cuyo ancho es de 8 m y su canto de 1.4 m.

A ambos lados de los estribos se disponen aletas paralelas a la AP-8. Dichas aletas presentan una altura máxima igual a la de los estribos y una longitud total de 18 m en el caso del estribo 1 y de 30.5 m para el estribo 2. El espesor de las aletas varía en función de su altura, entre un máximo de 0.80 m y un mínimo de 0.30 m. Para aquellos muros de mayor altura se realiza un escalonado en alzado, de tal manera que la coronación tiene siempre un espesor de 0.30 m. Todas las aletas se cimentan mediante zapatas, con anchos que varían de los 5 m a los 7 m, y espesores entre 0.90 m y 0.50 m.

Por último, se dispuso una estructura metálica auxiliar próxima al estribo 2 para permitir el acceso al paso de hombre previsto en la platabanda inferior del cajón metálico.

4.2 PS-2

La estructura se sitúa en una alineación recta en planta y presenta una longitud de 70 m, dividida en dos vanos de 23 y 47 m de luz respectivamente. El ancho de la sección transversal es constante e igual a 12.90 m en toda su longitud, dividida en una calzada de 7.00 m, con dos carriles de 3.50 m cada uno y, a cada lado, un arcén de 0.5 m, un zócalo destinado al anclaje de los pretiles metálicos de 0.65 m y una acera de 1.80 m de ancho.

El tablero, tal y como se ha comentado anteriormente, es de estructura mixta, con un cajón metálico inferior y una losa de hormigón armado.

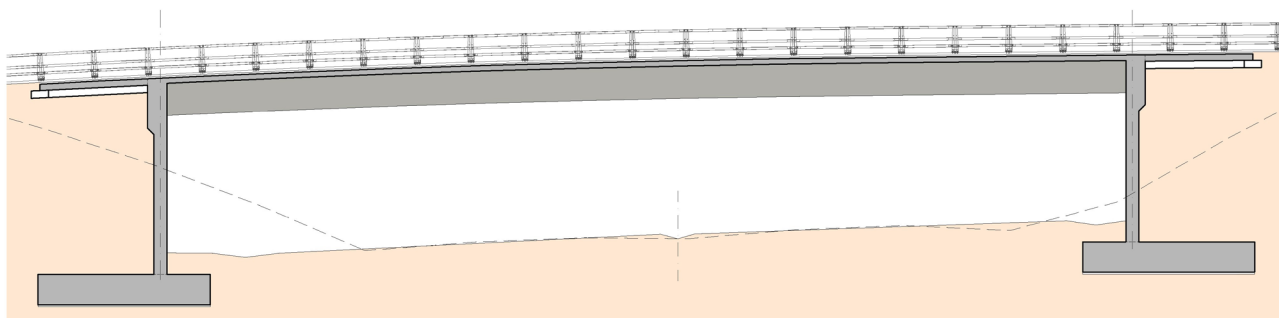


Figura 6. Alzado del PS-1



Figura 7. Vista lateral del PS-1 y estribo integral

El cajón presenta una variación de canto entre 1.30 m en apoyos de estribos y 2.25 m en la sección de pila. El ancho de la platabanda inferior es variable de 5.74 a 4.60 m, mientras que el ancho de las platabandas superiores, tanto de la central como de las laterales, es de 0.60 m. En estos elementos se establece la conexión entre el hormigón y el acero. Las almas laterales son inclinadas, mientras que la central es perpendicular a las platabandas. La inclinación de las almas laterales se mantiene constante.

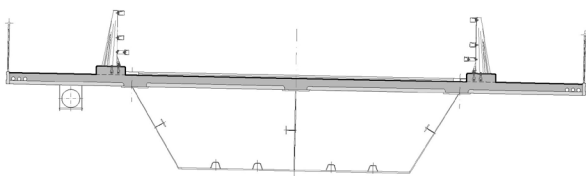


Figura 8. Sección transversal tipo del PS-2

La losa, de 0.25 m de canto constante, presenta voladizos de ancho variable de 2.72 m a 2.80 m en el borde derecho y de 2.80 a 2.88 m en el borde izquierdo del cajón metálico. De uno de los laterales de la losa se cuelga una tubería de agua potable.

Se trata de una estructura con doble acción mixta, puesto que se dispone hormigón de fondo sobre la pila central.

El tablero se empotra al estribo E-1 y se apoya en el E-2 mediante apoyos de neopreno anclados. Ambos estribos son de hormigón armado y están formados por sillas cargaderos sobre pilotes de Ø0.85 m de diámetro. Cada uno de los estribos se cimenta mediante 6 pilotes, cada uno de ellos con una longitud distinta dependiendo del perfil del terreno y de la profundidad a la que se ubica la roca sana. Para el caso del estribo 1, la longitud varía entre los 12.35 m y los 16.15 m, mientras que para el estribo 2 la variación es menor, entre los 16.90 m y los 17.30 m.

Por su parte, la pila presenta sección circular de diámetro Ø1.20 m, con una altura de 10 m, siendo su cimentación directa por medio de una zapata de 7.50 x 5.50 x 1.50 m. Sobre esta zapata se cimenta también el tramo de muro correspondiente que se dispone para contener el desnivel de tierras entre la AP-8 y la Ronda Sur, en previsión de la eventual ampliación del número de carriles. Dicho muro presenta una altura de 5.70 m y una longitud total de 5.50 m. Se prevén juntas de dilatación entre el muro y el fuste de la pila.

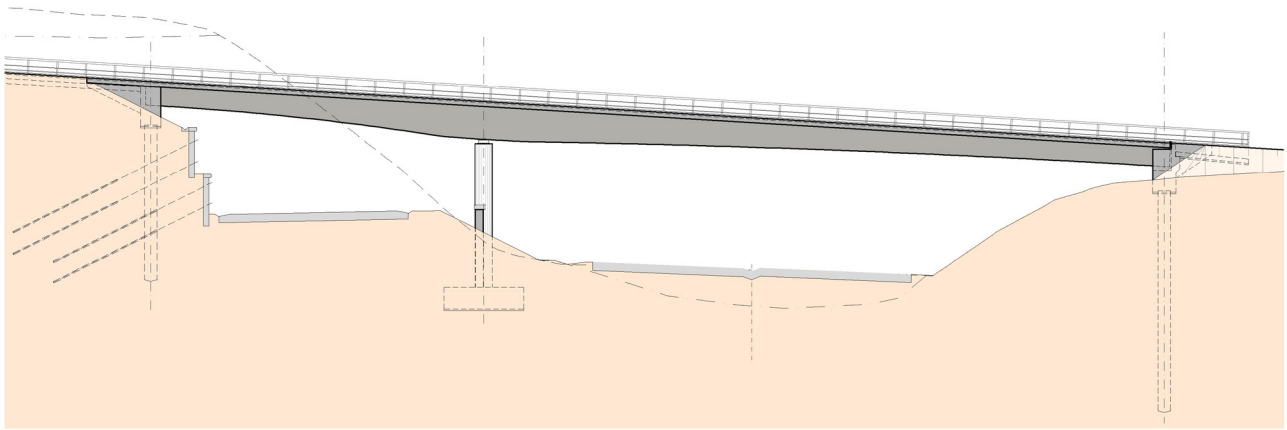


Figura 9. Alzado del PS-1

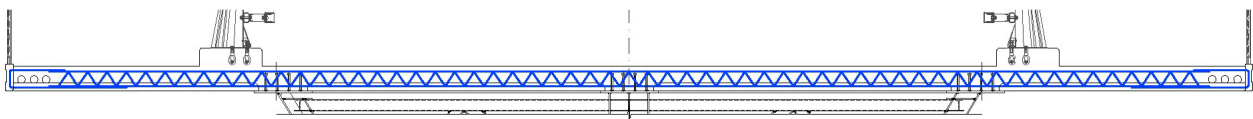


Figura 10. Precosa del PS-2



Figura 11. Vista lateral del PS-2

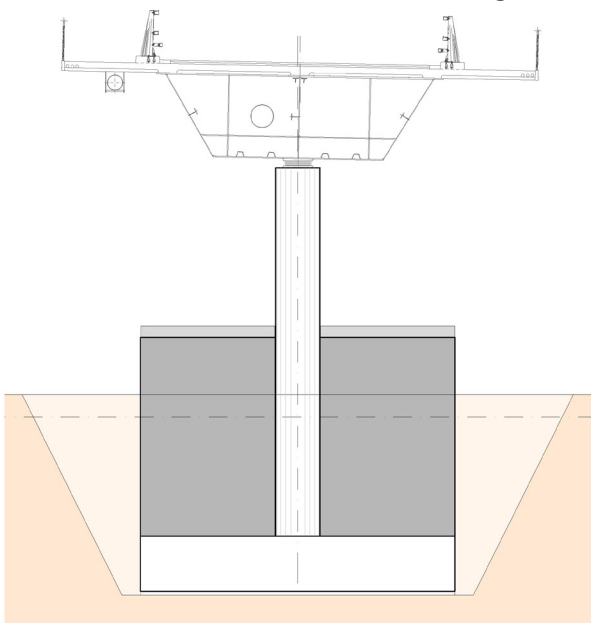


Figura 12. Sección transversal de la pila del PS-2

5. Detalles

El detalle más representativo y de mayor complejidad del proyecto es el de los estribos integrales. Dicho detalle ha de ser capaz de garantizar una correcta transmisión de esfuerzos entre la superestructura y la subestructura, creando un conjunto monolítico. A tal efecto, se dispone un gran número de pernos conectadores en el diafragma de estribo del cajón metálico. Adicionalmente, se realiza un solape entre la armadura del estribo y la armadura de la losa del tablero.

Por otro lado, se plantea la ejecución del estribo en dos fases, de tal manera que el tablero

se apoye provisionalmente mediante unos perfiles HEB sobre el estribo parcialmente ejecutado en primera fase. Posteriormente, una vez terminado el montaje de la estructura metálica, se procede al hormigonado de la parte restante del estribo.

Como comentario adicional, en los estribos y en los diafragmas se disponen pasatubos para posibilitar la instalación de los servicios previstos en el tablero de la estructura. En algunos casos, dichos pasatubos coincidieron con rigidizadores, por lo que fue necesario estudiar en detalle la transmisión de esfuerzos.

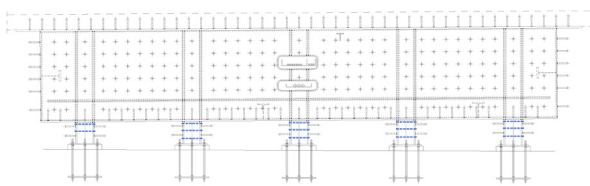


Figura 13. Estribo del PS-1

6. Verificación estructural

La verificación estructural de ambos pasos superiores se realizó con arreglo a la normativa nacional vigente en el momento de redacción del proyecto (IAP-11 [1], EHE-08 [4], etc.) y con arreglo a los Eurocódigos [2] y [3].

6.1 PS-1

La conexión tablero-estribos se contempla como una unión integral con empotramiento perfecto entre los elementos. Para ello se deja embebida una parte del propio cajón metálico (almas y alas), disponiendo conectadores para garantizar la transmisión de esfuerzos acero-hormigón, y se aprovecha el diafragma metálico como elemento resistente, disponiendo, igualmente, pernos conectadores. Para la armadura superior de la losa del tablero se considera la continuidad de la misma, transmitiendo la carga, directamente, a la armadura vertical de los estribos.

La unión tiene un comportamiento claramente tridimensional, ya que, por un lado, las tracciones y compresiones, más o menos distribuidas, que se producen en la losa superior

y en la platabanda inferior del tablero tienden a concentrarse en las zonas de las almas del cajón metálico en el empotramiento del tablero y, por otro lado, la gran rigidez en el sentido perpendicular al eje del tablero del diafragma final mixto de apoyo (diafragma metálico + muro de hormigón) supone que parte de las tensiones longitudinales en las alas de tablero se transmitan por flexión transversal a las zonas más rígidas de la unión (zonas de almas del cajón metálico y zonas laterales con mayor espesor de muro vertical). Puesto que este comportamiento tridimensional es difícil de plantear mediante cálculos simplificados, se procedió a la realización de un modelo de elementos finitos de la unión, en el que se introduce la estructura de hormigón con elementos tipo sólido y la estructura metálica con elementos tipo placa.

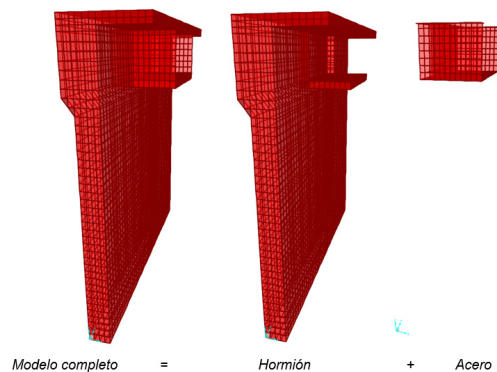


Figura 14. Modelo de cálculo conexión

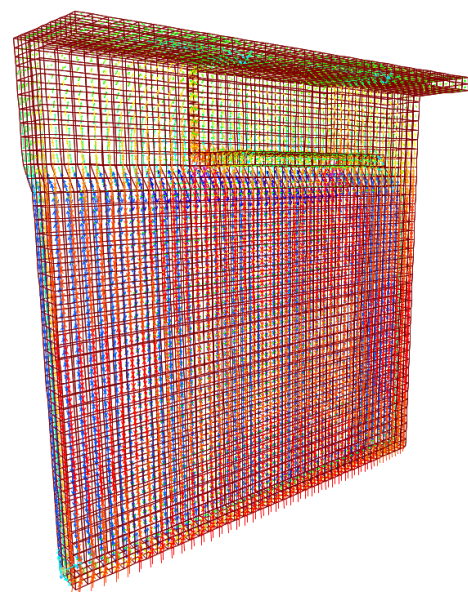
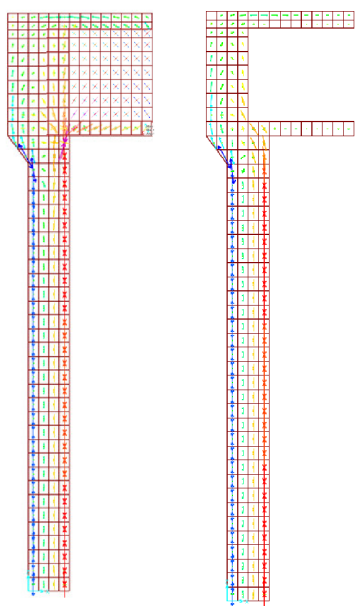
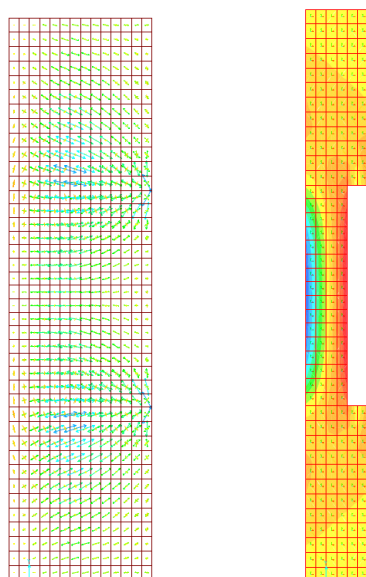


Figura 15. Distribución de tensiones en el hormigón



Figuras 16a y 16b. Tensiones principales en sección por almas del cajón y sección entre almas



Figuras 17a y 17b. Concentración de tensiones en losa superior del tablero y flexión transversal en la zona con menor rigidez de la riostra

Una vez comprobado el mecanismo resistente por el que se produce la transmisión de esfuerzos entre el tablero y los estribos es necesario cuantificar dichos esfuerzos que, fundamentalmente, dependen de la relación entre las rigideces del tablero y del alzado de los estribos, que determina la ley de momentos del tablero, y de la rigidez del empotramiento de los estribos en las cimentaciones, ya que esta determina la coacción ejercida por los estribos a

las deformaciones impuestas longitudinales del tablero y, por tanto, los esfuerzos en el alzado de los estribos

Para poder encajar la estructura en unas dimensiones y costes razonables es necesario tener en cuenta que la rigidez real de las secciones de hormigón viene determinada por su comportamiento altamente no lineal, por lo que se realizó un modelo global no lineal considerando diagramas momento-curvatura de la estructura. En este modelo se incluyeron el tablero, los estribos y la cimentación, modelizando con elementos tipo placa las chapas metálicas, las losas de hormigón, los estribos y las zapatas; y con elementos tipo barra la rigidización del tablero.

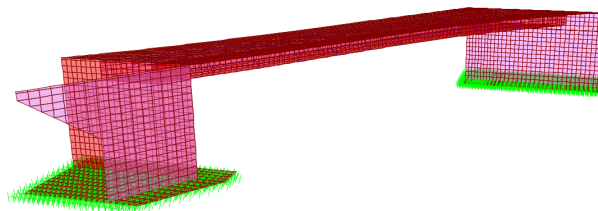


Figura 18. Modelo de cálculo del PS-1

Para representar las rótulas plásticas, que simulan el comportamiento no lineal del hormigón, se introducen elementos tipo barra en las secciones superior e inferior de los muros de los estribos que, como se ha indicado anteriormente, son las secciones que determinan el comportamiento de la estructura.

Para cada una de las rótulas se especifican diagramas momento-curvatura de diseño en los que se define el punto de agotamiento de la sección y tres puntos intermedios que permiten caracterizar adecuadamente el comportamiento no lineal de la sección de hormigón armado.

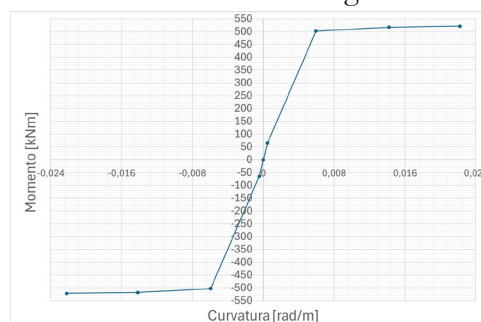


Figura 19. Diagrama momento-curvatura de una de las rótulas definidas

6.2 PS-2

Para el caso del PS-2 se estudió pormenorizadamente la interacción suelo-estructura de los pilotes de los estribos, teniendo en cuenta la variabilidad del perfil geotécnico y el perfil topográfico en cada uno de los estribos.

A tal efecto se realizaron modelos RIDO que permitieron caracterizar dicha interacción y obtener la rigidez de los pilotes en cabeza, que fue la condición de contorno que se introdujo en el modelo global de cálculo, mediante una longitud de empotramiento equivalente.

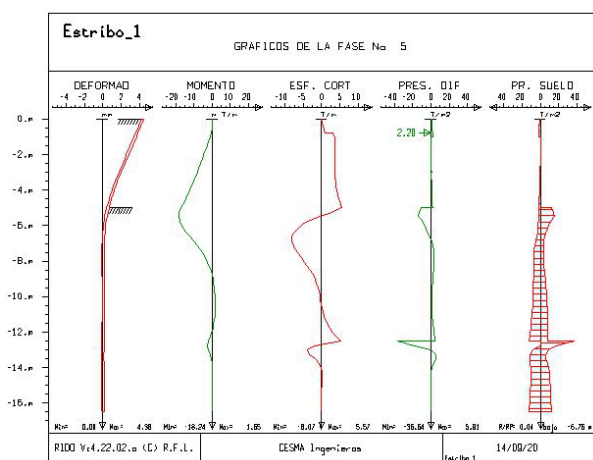


Figura 20. Resultados del cálculo realizado en RIDO para obtener el empotramiento equivalente

7. Proceso constructivo

Tal y como se introdujo al comienzo de la ponencia, el proceso constructivo buscó en todo momento reducir la afección a la AP-8 al mínimo imprescindible. Por ello, el montaje de los cajones metálicos se realizó mediante cortes nocturnos.

En el PS-1 cabe destacar que el relleno del trasdós de los estribos se realizó tras completar la ejecución de la superestructura y del empotramiento entre estribo y tablero, de tal forma que el empuje de tierras no actuara en su totalidad cuando los estribos aún presentaban un esquema estructural de muro ménsula.

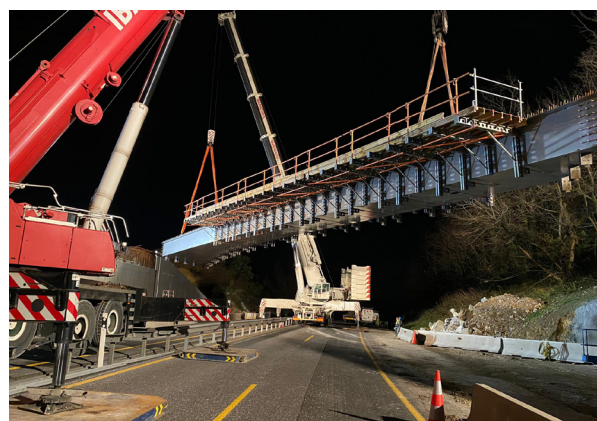


Figura 21. Montaje del PS-1 en corte nocturno

Para el caso del PS-2 se destaca que se colocó primero el vano largo sobre dos torres de apeo provisionales, una de ellas cimentada sobre la zapata de la pila y la otra sobre una zapata provisional dispuesta a media ladera. El motivo de montar primero el vano largo es evitar el eventual levantamiento del apoyo provisional del cajón sobre el estribo 1.

Adicionalmente, cabe mencionar que Cesma participó en las labores de asistencia técnica al contratista durante la obra y colaboró estrechamente con el taller encargado de la fabricación de la estructura metálica.

Entre otras cuestiones, fue necesario adaptar parte de los detalles del proyecto a las condiciones de fabricación o de suministro del propio taller. Por ejemplo, para el caso de la platatabanda inferior de los cajones resultó necesario definir una soldadura de empalme longitudinal, debido al gran ancho de la platatabanda, superior al de las piezas de acero comerciales.



Figura 22. Volteo del cajón metálico en taller en el que se aprecia un empalme longitudinal en la platatabanda inferior

Asimismo, se definieron todos los elementos auxiliares necesarios para el izado de las piezas. En concreto, se obtuvo la posición del centro de gravedad de cada pieza para disponer

las orejetas de izado de forma que el peso quedara uniformemente distribuido. También se definieron y verificaron dichas orejetas.

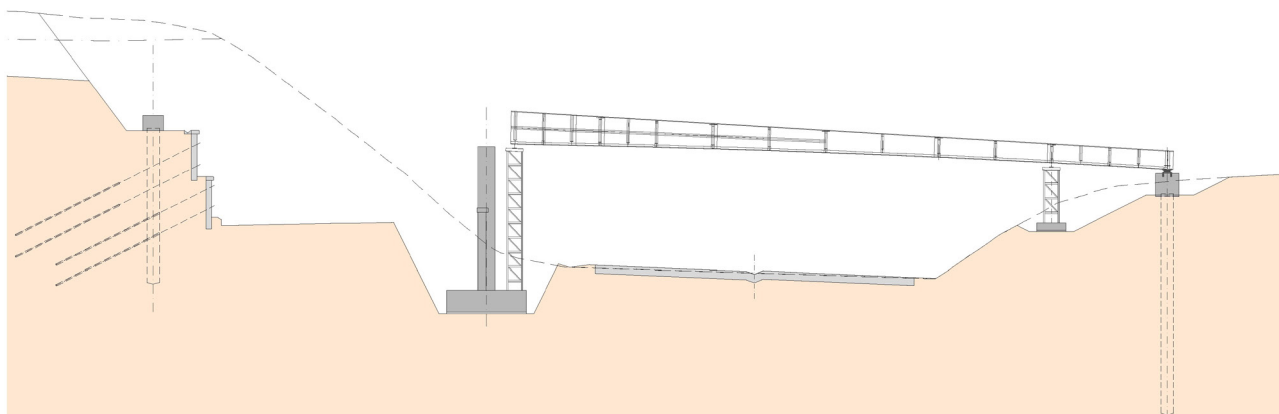


Figura 23. Montaje del cajón metálico del PS-2

Referencias

- | | |
|---|--|
| [1] IAP-11. Instrucción de acciones en puentes de carretera | [3] Eurocódigo 4. Proyecto de estructuras mixtas de acero y hormigón |
| [2] Eurocódigo 3. Proyecto de estructuras de acero | [4] EHE-08. Instrucción española del hormigón estructural |

Datos de la obra

Ubicación	Irún, Guipúzcoa
Año de ejecución	2020-2021
Propiedad	BIDEGI. Diputación Foral de Guipúzcoa
Proyecto constructivo y asistencia técnica	Cesma Ingenieros
Empresa contratista	UTE Construcciones Moyua – Altuna y Uria

Datos técnicos PS-1

Longitud total	45.15 m
Ancho del tablero	Var. de 8.3 a 10.83 m
Canto del tablero	1.75 m
Espesor medio de hormigón in situ	0,25 m
Cuantía de acero estructural en tablero	188 kg/m ²
Cuantía de acero de armar en tablero	54 kg/m ²
Presupuesto de ejecución material	814 738 €

Datos técnicos PS-2

Longitud total	70 m
Luces	23-47 m
Ancho del tablero	12.9 m
Canto del tablero	Var. de 1.55 a 2.5 m
Espesor de prelosa prefabricada	0.08 m
Espesor medio de hormigón in situ	0.25 m
Cuantía de acero estructural en tablero	187 kg/m ²
Cuantía de acero de armar en tablero	45 kg/m ²
Presupuesto de ejecución material	849 669 €