

Proyecto y Ejecución del Puente Postesado sobre la Rambla del Vínculo en Roquetas de Mar, Almería.

Design and Construction of the post tensioned bridge over the Rambla del Vínculo in Roquetas de Mar, Almería.

Luis Miguel Salazar Martín^a, Jorge Domingo Navarro Rubio^b, José Luis Navarro Martínez^c y José Antonio Bravo Arrebola^d

^a Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Tensio Engineering. CEO. lsalazar@tensio.es

^b Dr. Arquitecto. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Arquitecto Técnico. NR Proyectos CEO jorgenavarro@nrproyectos.com

^c Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Estudio de Ingeniería Fomintax, S.L.P. Director de la Obra. joseluisnavarro@fomintax.es

^d Ingeniero Técnico Industrial. Ovisa Pavimentos y Obras S.L.U. Jefe de Obra. joseantonio.bravo@probisa.com

RESUMEN

El nuevo puente sobre la Rambla del Vínculo en Roquetas de Mar está constituido por un dintel de hormigón postesado de sección PI invertida para superar la limitación de canto con un espesor máximo de 50 cm, con esquema resistente de viga continua hiperestática, optimizando el trazado del postesado para minimizar interferencias. La estructura tiene dos vanos de 27.35 m, esviaje de 39° y vigas de 2 m de canto total que dejan un ancho destinado al tráfico rodado de 8.70 m. Posee dos voladizos ciclopeatonales de 3,15 m de ancho con un diseño estético dinámico, una pila tabique pilotada en el cauce y estribos cargadero con pilotes de hasta 20 m. Cuenta con elastómeros como estrategia antisísmica eficiente.

ABSTRACT

The new bridge over the Rambla del Vínculo in Roquetas de Mar features a post-tensioned concrete girder with an inverted PI cross-section, designed to overcome height limitations with a maximum depth of 50 cm. The load-bearing system is a hyperstatic continuous beam, optimizing the post-tensioning layout to reduce interference. The structure spans two sections of 27.35 m with a 39° skew angle and 2 m-deep girders, providing an 8.70 m wide roadway. It includes two 3.15 m wide pedestrian and bicycle overhangs with a dynamic aesthetic design, a pile-supported wall pier in the channel, and abutments with piles up to 20 m long. Replaceable elastomers as an efficient anti-seismic strategy.

PALABRAS CLAVE: canto reducido, postesado, gran esviaje, puente viga, interferencias armaduras.

KEYWORDS: reduced depth, post-tensioned, large skew angle, beam bridge, rebar interferences.

1. Motivación de la solución estructural

Para dar una solución de paso que conectara las márgenes de la Rambla del Vínculo entre la Avenida Reino de España y la Carretera de Alicún, en Roquetas de Mar, Almería, se

planteaba una solución poco convencional, toda vez que no era admisible la disposición de varias pilas en el cauce y las cotas de los puntos de entronque del nuevo vial estaban muy ajustadas,

con poco margen para subir la rasante, por lo que el canto disponible era muy ajustado.

Tras una fase de estudio tipológico donde se valoraban la iconicidad, sencillez de ejecución, plazo y coste, se valoraron opciones con torres y tirantes de hormigón armado o postesado (Figura 1) y otras soluciones estructurales singulares más habituales, como puentes tipo arco de tablero inferior (bow-string), por ejemplo, con mayor impronta estética.

Tras la fase de estudio, se optó por la solución de PI invertida, con losa de hormigón armado ayudada por dos vigas postesadas de gran porte ejecutadas sobre la cota de rodadura para que los vehículos “discurran dentro del puente y no sobre él”. Las vigas independizan el paso rodado del peatonal, consiguiendo una barrera física segura para los peatones que hace más amable el uso peatonal del puente. La sección transversal obedece al canto disponible limitado que queda para el elemento estructural, con objeto de dejar el resguardo necesario para la máxima avenida calculada y para no modificar las rasantes de los elementos viarios existentes que conecta.



Figura 1. Algunas imágenes de la solución con mayor iconicidad

Dado el carácter urbano de la obra de paso, cuenta con alumbrado ornamental con LED que pueden cambiar de color, atrayendo a los usuarios a cualquier hora del día a pasear por la zona de expansión de la ciudad. (Figura 2)



Figura 2. Vista nocturna de la estructura

Finalmente, las barandillas en color blanco, como el hormigón de la parte vista de las vigas, hacen que el puente tenga cierto aspecto de banda blanca a la vista, con aspecto ligero y dinámico, que se difumina en el entorno, eliminando la sensación de masividad que sí se percibe al pasear por sus aceras (Figura 3).

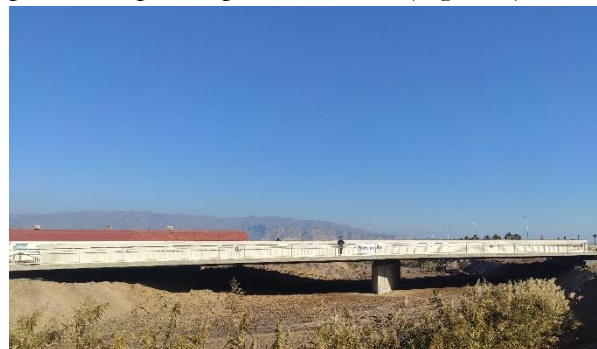


Figura 3. Vista del alzado del puente terminado previa a la inauguración

2. Descripción general

La estructura consta de un dintel de hormigón postesado de dos vanos iguales de 27.35 m con esviaje de 39° y ancho total de 17 m. La sección transversal del tablero consta de dos vigas de 2 m de canto y 1 m de ancho, con sendos voladizos de 3.15 m de ancho. El canto de éstos es variable, de 0.30 m en el arranque a 0.20 m en la punta, lo que confiere ligereza a la par que un dinamismo estético lateral, con elementos facetados (Figura 4).

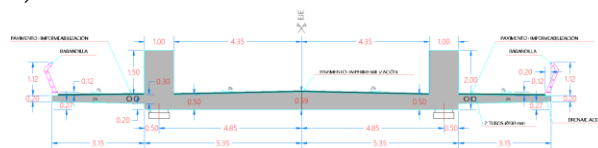


Figura 4. Sección tipo del puente

Por su parte, la porción de tablero entre vigas, que presenta un ancho destinado al tráfico rodado de 8.70 m, es suficiente con un canto estructural de 0.50 m, sobre lo que se añade lo necesario por el bombeo transversal del 2%. Así, la relación canto/luz de la estructura sin contar las vigas sobrepuestas es de 1/55, mientras que considerando la altura de las vigas es de 1/14. La relación canto/luz de 1/55 no era viable con las soluciones habituales de losa postesada, que están entre 1/18 y 1/32, con mayores cantos mínimos para estas luces.

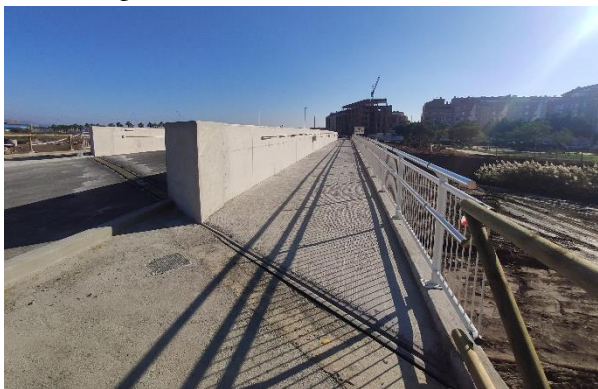


Figura 5. Detalle del voladizo de la margen derecha, donde se aprecia el fuerte esviaje

3. Planteamiento general de los elementos estructurales que constituyen el puente

3.1 Tablero

El esquema resistente es el de una viga continua hiperestática de dos vanos, con fuerte esviaje. Se trata de un puente con sección transversal en PI invertida. Se tienen dos elementos resistentes muy destacables, que son las vigas longitudinales de 2 m de canto que alojan en su seno el postesado, con 4 tendones de 37 cordones de 0,6" por viga, de trazado parabólico.

La losa del tablero entre vigas tiene un comportamiento transversal, si bien para cargas puntuales como las de los vehículos pesados, aparece una fuerte componente de efecto membrana. Los voladizos funcionan fundamentalmente de forma transversal, como ménsula. La relación entre luz de vano y el ancho

del núcleo de la sección, junto con su esviaje, no permite la consideración clara de la sección del puente como elemento viga o losa para el cálculo longitudinal del tablero en cuanto al centrado de las cargas excéntricas, para resistir los esfuerzos procedentes de éstas, gracias al mecanismo de torsión (como en un puente viga clásico, más largo que ancho) o la flexión transversal (como sucede en un puente losa, donde predomina el ancho de la losa frente a la luz) [1].

3.2 Subestructura

Los estribos son cargaderos pilotados, dada la baja capacidad portante del terreno más superficial.

La forma de la pila, con tabique con tajamar y encepados extremos ha sido fruto de un laborioso análisis de soluciones, buscando el mejor compromiso entre eficiencia estructural y optimización de materiales.

Tras el estudio de mercado, la maquinaria más fácilmente disponible era para diámetros de pilote de Ø850 mm, por lo que fue el diámetro elegido, para facilitar luego la adquisición en obra.

La estrategia sísmica elegida se basa en el aislamiento de la estructura mediante aparatos elastoméricos zunchados, de 800x800x102(77) en pila y 450x600x84(60) en estribos. No es necesario establecer bloqueos longitudinales o transversales de ningún tipo.

Los apoyos son sustituibles, como se preconiza en la normativa EN-1337-3 [2]. Por ello, se han tenido en cuenta los gatos hidráulicos más habituales en el mercado y se ha dimensionado la estructura para el apoyo local de estos gatos, dejando el espacio y el armado local necesarios.

4. Durabilidad y materiales

Según el Código Estructural [3], la estructura debe tener una vida útil de 100 años.

La estructura se emplaza a menos de 1000 m del mar.

4.1 Hormigones

El tablero se realiza con hormigón HP-40/F/20/XS1.

Los encepados, pilas y estribos se realizan con hormigón HA-30/F/20/XC2+XA2, empleando la consistencia líquida para los pilotes, como preconiza el PG-3 [4] y la derogada EHE-08 [5].

4.2 Aceros

Todos los aceros para barras de armar son del tipo B 500 SD, al estar en zona sísmica.

Los cables de pretensado son del tipo Y 1860 S7. La tensión de rotura del acero es de $f_u = 1860$ MPa. Se emplean cordones de 140 mm^2 , de acuerdo con EN-10138-3 [6].

5. Características estructurales. Aspectos derivados de los resultados del cálculo

Para evaluar de forma adecuada el comportamiento del tablero como viga o losa se realizaron varios modelos de cálculo que aportaron una visión detallada del mismo.

5.1 Modelos

Para evaluar el comportamiento del tablero como viga o losa, dado que sus dimensiones lo sitúan en la frontera entre los dos comportamientos estructurales, se realizaron sendos modelos, tomando como resultado la envolvente de ambos casos. De esta forma se analiza la estructura de forma completa, para ajustar los cálculos al comportamiento real esperado. (Figura 6, Figura 7 y Figura 8).

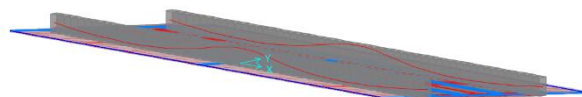


Figura 6. Modelo de placas para el cálculo transversal y local del tablero

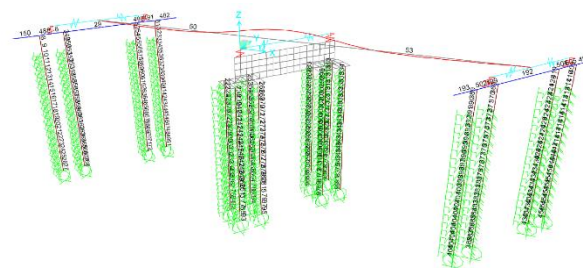


Figura 7. Modelo de barras para el diseño longitudinal del tablero y la subestructura

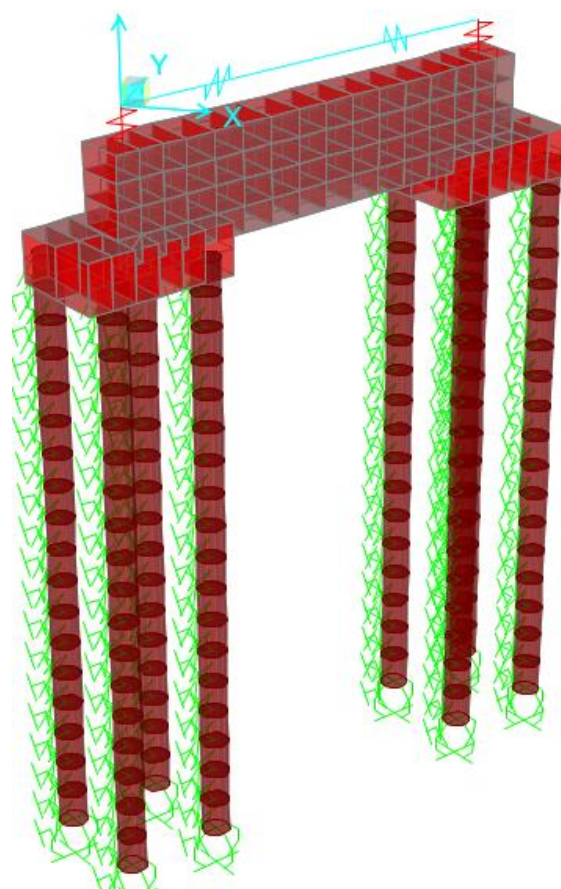


Figura 8. Vista isométrica del modelo empleado para la pila

5.2 Ancho eficaz de las secciones

Se emplean los anchos eficaces recogidos en el Código Estructural. Se calculan de acuerdo con el Manual de RPX-95 [7] y al art. 3.2.1 del Anejo 25 del Código Estructural. Estos anchos se emplean en las verificaciones tensionales y en las de rotura.

5.3 Coeficiente de reparto o de excentricidad

Al existir excentricidad en las cargas viarias y adicionalmente al arrastre por cortante, existirá un reparto desigual de tensiones normales en las vigas del puente. Para captar este efecto se ha utilizado el concepto de coeficiente de reparto o excentricidad.

Para ello se ha utilizado el modelo placa del puente, donde se han situado diferentes posiciones de las sobrecargas uniformes y de los vehículos pesados. Al existir esviaje, las dos vigas no se cargan exactamente igual, por lo que es preciso aplicar también el coeficiente de reparto para las cargas distribuidas uniformemente.

Las tensiones obtenidas en el modelo placa se han integrado en dos semisecciones del puente, obteniéndose valores de momentos flectores diferentes, más altos en la semisección de la viga que queda retrasada, existiendo por lo tanto M_{max} y M_{min} , con un momento total $M_{total} = M_{min} + M_{max}$.

Se define el coeficiente de excentricidad o reparto como:

$$C = 2 \frac{M_{max}}{M_{total}} \quad (1)$$

Tabla 1. Coeficientes de reparto para las distintas cargas

Tipo de carga	Coeficiente de Reparto (adim.)
Uniforme	1.07
SCuso	1.89
Vehículo Pesado	1.4

El enfoque descrito garantiza que se pueda realizar un diseño estructural más preciso y seguro, al tener en cuenta los factores complejos que afectan la distribución de tensiones y momentos en el puente.

5.4 Rasante entre hormigones

Al ser una sección hormigonada por fases, especialmente las vigas principales, que son de una enorme responsabilidad en la integridad

estructural, es preciso analizar el correcto comportamiento a rasante de las uniones, especialmente la sección alma-alma: La junta entre hormigones de la viga de 1x2 m debe resistir el esfuerzo rasante que solicita dicha unión. Se calcula según art. 6.2.5 del Anejo 21 del Código Estructural.

5.5 Pila tabique. Viga de gran canto

Con la ayuda del modelo de placas de la pila se analizó la armadura necesaria para el tabique de ésta, al ser una región de discontinuidad (Figura 9).

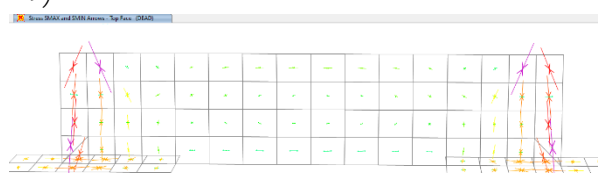


Figura 9. Tensiones principales en el tabique

6. Descripción general de las fases de construcción

Los métodos de ejecución del puente han sido los habituales cuando el cauce es de aguas torrenciales y poco profundo, siendo los más rápidos, económicos y que plantean menos riesgos a la ejecución de la obra.

6.1 Subestructura

La ejecución de los pilotes de 0.85 m de diámetro se realizó preparando accesos para la maquinaria de perforación, colocación de armadura y hormigonado (Figura 10).

Los estribos cargadero se ejecutaron en dos fases de hormigonado, una para el cuerpo principal y otra para el espaldón, dejando la ferralla sin colocar en la zona donde luego las vigas necesitarán espacio para acceder a las vainas y placas de anclaje de la familia inferior del postesado (Figura 11).



Figura 10. Ejecución de pilotes con barrena continua, de hasta 20 m de profundidad



Figura 11. Subestructura preparada para recibir el tablero

La pila tabique posee dos encepados de 4 pilotes cada uno, presentando un perfil hidrodinámico (Figura 12).



Figura 12. Armado de la pila tabique, sobre los encepados pilotados

6.2. Tablero

Una vez ejecutados los estribos y la pila, se realizó una mejora del terreno de la sombra del tablero, para apoyar la cimbra cuajada en terreno

competente, comprobando la capacidad portante a través del Ensayo de Carga con Placa (NLT-357/98) [8].

Se instalan los neoprenos, que no necesitan ser anclados. Sobre la cimbra se monta la ferralla y las vainas de postesado, realizando el replanteo en planta y alzado indicado en los planos (Figura 13 y Figura 15).



Figura 13. Imagen general del puente durante el montaje de la ferralla, con el trazado de las vainas sobre pila

Antes del hormigonado es siempre oportuno enfilar los cables de pretensado, protegiéndolos debidamente de la corrosión, especialmente a menos de 1 km del mar.

Se realiza un primer hormigonado de la sección, que toma los primeros 50 cm de canto de la viga, junto a la losa intermedia y los voladizos (Figura 14).



Figura 14. Hormigonado de la parte inferior de la losa del puente

Tras montar el encofrado de las vigas (Figura 15), se hormigona el resto de éstas, con el debido tratamiento para la junta de hormigonado creada entre las dos fases, mediante agua a presión. Una vez endurecido el

hormigón, se realiza el tesado de los tendones empleando un gato multicordón, al haber previsto sitio para el mismo desde la fase de Proyecto (Figura 16).



Figura 15. Zonas de anclaje de los tendones de postesado, previo al hormigonado

Se realiza posteriormente la inyección de las vainas y el remate de los extremos de las vigas, para pasivar los macizos de anclaje de los tendones en ambos extremos del puente. Se realizó el tesado desde ambos extremos, con la secuencia establecida, para que la entrada en carga de la estructura fuese lo más simétrica posible.



Figura 16. Momento del enhebrado del gato multicordón

Finalmente, se realizan todos los acabados del puente, como firmes, pintura para la zona peatonal, imbornales, juntas, barandillas e iluminación.

7. Aspectos destacables

7.1. *Sección transversal y comportamiento estructural*

Se trata de una sección en PI invertida, con un fuerte esviaje, que produce efectos de arrastre por cortante, diferentes repartos de esfuerzos entre vigas y efectos locales de esquina, así como efectos membrana en la losa entre vigas longitudinales. Esto hace que el tablero sea de tipología singular, conociendo los autores pocos casos en los que se emplea dicha sección.

7.2. *Aislamiento sísmico*

Se utiliza el método de cálculo modal espectral de la NCSP-07 [9], que es el método de cálculo tipo para evaluar el efecto de la acción sísmica sobre los puentes.

Como consecuencia de las rigideces de los neoprenos elegidos, el diseño sísmico permite llevar los periodos fundamentales de la estructura a la rama descendente del espectro, realizando una optimización de materiales en la subestructura, al reducir esfuerzos sísmicos, dado que la aceleración sísmica de cálculo en el emplazamiento es de $0.17 \cdot g$, por lo que conviene reducir esfuerzos en la subestructura.

Se obtiene el siguiente espectro de respuesta con el sismo último, que es el que se carga en el programa de cálculo para obtener las acciones y desplazamientos horizontales en los diversos elementos, teniendo un periodo longitudinal y transversal de 1.34 s, en la rama descendente del espectro (Figura 17).

Es importante notar que si la frecuencia propia de la estructura se sitúa en la rama ascendente del espectro, pequeñas variaciones de la frecuencia real se traducen en grandes variaciones de la aceleración de cálculo, por lo que conviene analizar detenidamente la estructura y considerar la aceleración de meseta, de forma conservadora.

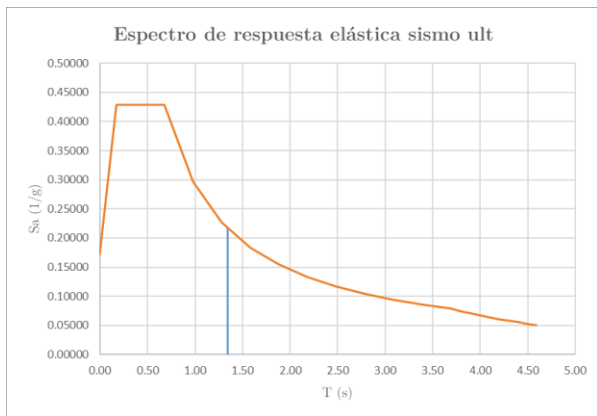


Figura 17. Espectro de respuesta elástico de la estructura, con los periodos marcados

7.3. Trazado del postesado

La técnica del postesado en puentes losa simétricos de dos vanos ha sido profundamente utilizado en ingeniería, sin embargo, toda vez que el espacio para alojar las vainas y especialmente las placas en los extremos es muy limitado, es necesario plantear un trazado dividido en dos familias, una de dos tendones

que se anclan en la parte inferior de la viga y otra de otros dos tendones que se anclan en la parte superior de la viga, haciendo que exista espacio para las placas de anclaje (Figura 18, Figura 19 y Figura 20).

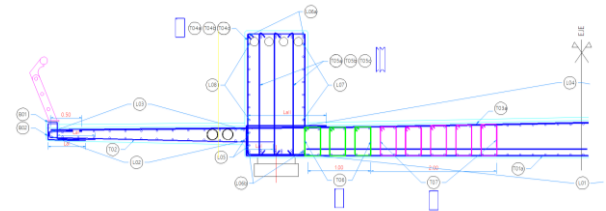


Figura 18. Detalle de los planos de armado

Lo más importante del trazado del postesado es que esta separación en dos familias hace que la interferencia a la armadura transversal de la losa del tablero sea mucho menor a la que ocurriría si los 4 tendones se dispusieran en un único trazado, dado que la entrada en la parte inferior de la losa sería mucho más plana y afectaba a muchas más barras transversales.



Figura 19. Ferrallado del tablero, con las vainas en fase de ajuste de trazado

Esto hace que los tendones no solo tengan variaciones de posición en un eje longitudinal, sino que tienen también un pequeño movimiento en transversal, para adoptar el trazado necesario para poder estar las cuatro vainas en la cara inferior de la viga en centro de luz y en la cara superior en su paso sobre pila (Figura 20).

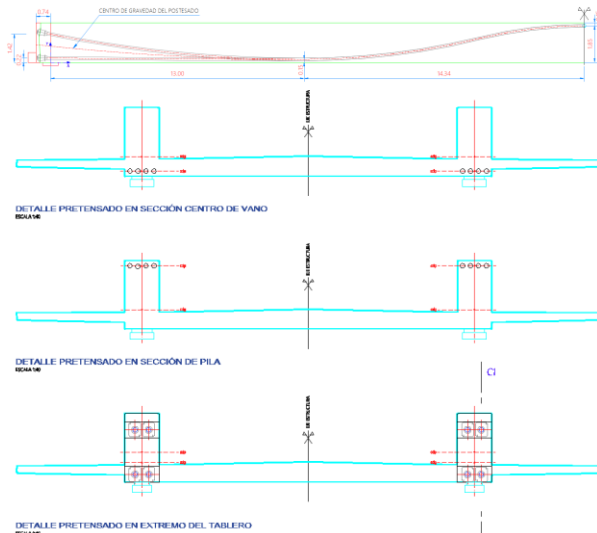


Figura 20. Trazado del postesado en los planos de Proyecto

7.4. Estudio de interferencias

Debido a los espesores tan exigüos presentes en el diseño del puente y relacionado con lo expuesto en el punto anterior, fue necesario un riguroso estudio de las posibles interferencias de armaduras y vainas que podrían surgir en obra, analizando ya desde el proyecto los espacios disponibles para las armaduras, interferencias entre ellas, factibilidad de enhebrar las armaduras que debían cruzarse (armadura de bandas de encepados con la armadura longitudinal de los pilotes, por ejemplo) y especialmente las vainas de postesado con la armadura pasiva del tablero (Figura 21, Figura 22 y Figura 23).

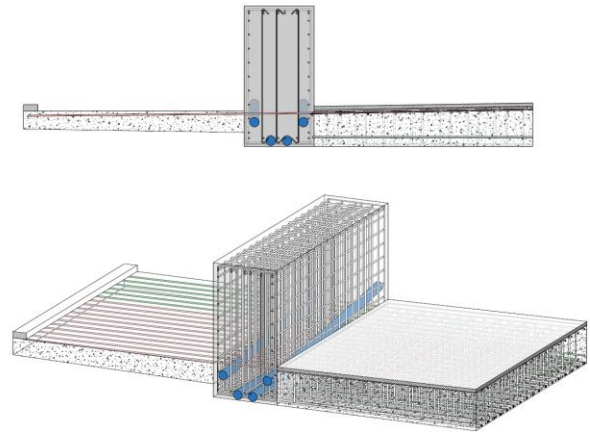


Figura 21. Modelo 3D realizado para el estudio de interferencias y colocación de ferralla (I)

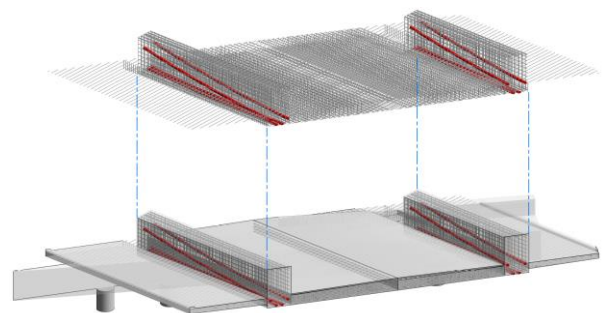


Figura 22. Modelo 3D realizado para el estudio de interferencias y colocación de ferralla (II)

Para detectar las posibles colisiones y analizarlas en la fase previa a la ejecución, se realizó un completo modelo 3D de la estructura donde pudieron comprobarse las afecciones y valorar las posibles formas de corrección o mitigación en obra.

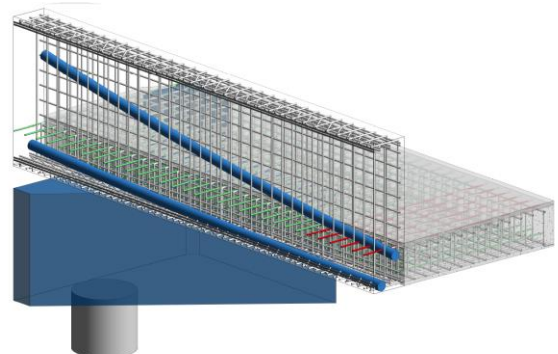


Figura 23. Modelo 3D realizado para el estudio de interferencias y colocación de ferralla. En rojo las barras que interfieren. (III)

8. Conclusiones

A tenor de lo expuesto anteriormente, se puede colegir lo siguiente:

- Se ha empleado una sección en PI invertida en hormigón postesado, de la que los autores conocen pocos casos realizados. Esta sección es válida para luces medias, con relaciones canto/luz de 1/55 (sin contar con el canto de los elementos portantes).
- En este tipo de estructuras es preciso tener en cuenta el arrastre por cortante y el coeficiente de excentricidad o reparto para el correcto diseño estructural de los elementos del tablero.
- El aislamiento sísmico en estructuras de mediana entidad debe perseguir alejar las frecuencias propias de respuesta del puente de la rama ascendente y meseta del espectro de respuesta, situándolas en la parte posterior de la rama descendente para minimizar la acción sísmica.
- El estudio de colisiones es crucial en las fases tempranas del proyecto, incluso en los primeros tanteos del trazado del postesado, por la interferencia que presenta el trazado de las vainas con la armadura pasiva del tablero, especialmente con la armadura superior transversal del tablero.

Agradecimientos

Agradecer el trabajo de los siguientes profesionales que han intervenido en el proyecto y en la ejecución de la obra, entre otros:

Francisco Javier Parrón Cruz. ICCP. Estudio de Ingeniería Fomintax, S.L.P. Ingeniero de Proyecto.

Greta María García Poveda. ICCP. Estudio de Ingeniería Fomintax, S.L.P. Ingeniero de Proyecto

Salvador Ponce Moreno. Ingeniero Técnico Industrial. OVISA Pavimentos y Obras S.L.U. Delegado de Obras

Alejandro David Salazar Martín, Ingeniero Civil. Tensio. Ingeniero de Proyecto.

Referencias

- [1] Monografía M-12 de ACHE. Ejemplo de tablero de hormigón pretensado según la normativa española.
- [2] Asociación Española de Normalización (UNE), UNE-EN 1337-3: Aparatos de apoyo estructural. Parte 3: Aparatos de apoyo de elastómero, Madrid: UNE, 2005.
- [3] Gobierno de España, Real Decreto 470/2021, de 29 de junio, por el que se aprueba el Código Estructural, BOE, núm. 164, pp. 87068-87076, 10 de julio de 2021.
- [4] Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3), Madrid: Secretaría General Técnica, 2021.
- [5] Comisión Permanente del Hormigón, Instrucción de Hormigón Estructural EHE-2008, Ministerio de Fomento, Madrid, 2008.
- [6] European Committee for Standardization (CEN), EN 10138-3: Tendones de pretensado. Parte 3: Alambres, Bruselas: CEN, 2006.
- [7] Ministerio de Fomento, Manual de aplicación de las recomendaciones de RPX-95 y RPM-95, Madrid: Secretaría General Técnica, 1995.
- [8] Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), Ensayo de carga con placa (NLT-357/98), Madrid: CEDEX, 1998.
- [9] Ministerio de Fomento, Norma sismorresistente de puentes (NCSP-07), Madrid: Secretaría General Técnica, 2007.