

Estructuras en la Fase 2 de los Nuevos Accesos a la Ampliación Sur del Puerto de Barcelona

Structures at the New Accesses to the Barcelona Port Southern Extension. Phase 2

Miguel Ángel Higuera Antón^a, Amaya Hernando Martín^b, Pedro Arias Crespo^c,
Ignacio Gandía Pérez^d, Antonio José Madrid Ramos^e, Miguel Ángel Pindado Rodríguez^f

^a Máster Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. PROES. Director de Proyectos. miguelangel.higuera@proes.es

^b Máster Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos. PROES. Directora de Proyectos. amaya.hernando@proes.es

^c Máster Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. PROES. Director de Proyectos. pedro.arias@proes.es

^d Ingeniero Civil. Máster en Estructuras, Cimentaciones y Materiales. PROES. Jefe de Proyecto. ignacio.gandia@proes.es

^e Máster Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. PROES. Director Técnico. antonio.madrid@proes.es

^f Máster Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Port de Barcelona. Director Projectes i Infraestructures Exteriors de Connexió.
miguelangel.pindado@portdebarcelona.cat

RESUMEN

Proes ha proyectado las estructuras de los “Nuevos Accesos a la Ampliación Sur del Puerto de Barcelona. Fase 2”, en UTE con Socotec. Las estructuras más singulares se localizan en dos ubicaciones. Hay una glorieta a varios niveles que conecta el nuevo acceso con la Ronda del Port. Alberga seis estructuras y ha supuesto un reto desde el punto de vista geotécnico, por los terrenos en los que se asienta. La otra estructura singular es un viaducto de 641,75 m de longitud, que discurre paralela a la costa en dirección norte, sobre terrenos que se ganarán al mar. Los vanos tienen una luz tipo de 37,25 m y la sección transversal una anchura de 23,60 m, albergando dos carriles por sentido y aceras.

ABSTRACT

Proes has designed the structures for the “New Accesses to the Barcelona Port Southern Extension. Phase 2”, in a Joint Venture with Socotec. The most outstanding structures are located in two locations. There is a multi-level roundabout that connects the new access with Ronda del Port. It contains six structures and has been a challenge from a geotechnical point of view, due to the soil on which it sits. The other outstanding structure is a 641,75 m long viaduct that runs parallel to the coast in a northerly direction, on land that will be reclaimed from the sea. The typical spans are 37,25 m long and the cross section is 23,60 m wide, housing two lanes in each direction and sidewalks.

PALABRAS CLAVE: viaducto por fases, hormigón pretensado, pilotes profundos, precargas.

KEYWORDS: segmental viaduct, prestressed concrete, deep piles, preloads.

1. Introducción

El ámbito del proyecto de ampliación sur del Puerto abarca el antiguo cauce del río Llobregat y la zona marítima situada entre la terminal BEST y el muelle de la Energía. Con objeto de

independizar la actuación correspondiente a la ampliación de la explanada marina y los atraques asociados a la misma, se han organizado dos proyectos: la Fase 2A, en la que se incluye el

nudo viario situado en el cauce del río Llobregat, y la Fase 2B, que discurre paralela a la costa en las zonas ganadas al mar por el futuro Atraque 35. En la Figura 1 se muestra una vista general de la actuación.

2. Fase 2A

2.1 Zona de glorieta del enlace

La glorieta proyectada tiene un diámetro exterior de 120 m y alberga viales de dos carriles. Dispone de un itinerario para peatones y ciclistas y contempla dos futuras líneas ferroviarias. En el enlace se proyectan seis estructuras, todas ellas con sección de marco de hormigón armado.

La glorieta se sitúa en el antiguo cauce del río Llobregat y actualmente se están realizando unas precargas para la mejora del terreno. En el proyecto definitivo de esta zona, ha sido necesario ampliar estas precargas existentes. Se han estimado los asientos esperables una vez concluido el proceso de consolidación,

realizando modelos con Plaxis. Se ha comprobado que los asientos esperables en las estructuras serán reducidos, pero no despreciables.

Tras realizar un estudio de alternativas, se concluyó que la solución más adecuada era la indicada de marcos de hormigón armado. Presentan las ventajas de adaptarse perfectamente a la geometría de los ramales y de transmitir unas tensiones muy reducidas a la cimentación, con lo que se minimizan los efectos de los asientos (Figura 2).

Los principales aspectos de la configuración de las estructuras proyectadas son:

- Su geometría es muy variada y algunos cruces se producen con un gran esviaje. En las zonas de entrada y salida de las estructuras se han aligerado la losa superior y los hastiales, proporcionando un mayor valor estético y permitiendo el paso de la luz natural al interior (Figura 3).

- Debido al gran esviaje de los cruces, las estructuras tienen mucha longitud. Con el objeto



Figura 1. Vista general de la actuación. Fase 2A (glorieta) a la izquierda y Fase 2B (viaducto) hacia la derecha.

de minimizar los efectos de los asientos en las estructuras, se han dispuesto juntas de dilatación en la totalidad de la sección de los marcos cada 10 m. De este modo, la estructura se comporta como una sucesión de “rebanadas” dispuestas unas a continuación de otras, permitiendo una mejor adaptación a los posibles asientos. Esta configuración se extiende a los tramos en los que se aligeran la losa superior y los hastiales y a las zonas de transición entre ambos tipos de secciones, así como a los muros asociados.

- Las luces más comunes en estas estructuras oscilan entre los 10 y los 13 m, valores habituales para esta tipología estructural.

- Se ha evitado el efecto longitudinal de los asientos con las juntas indicadas. En sentido transversal, no es posible evitarlo. Por ello, se ha tenido en cuenta en el cálculo, considerando un asiento diferencial entre los hastiales de 2,5 cm, aunque su efecto en la estructura se ha reducido, teniendo en cuenta su evolución a lo largo del tiempo y la fluencia del hormigón de la sección.

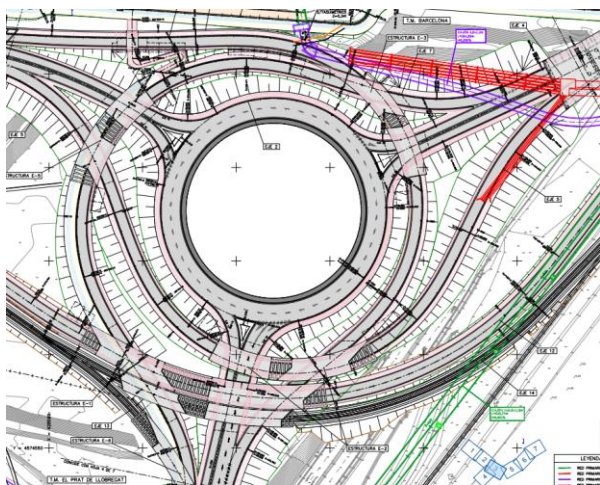


Figura 2. Planta de las estructuras del enlace.

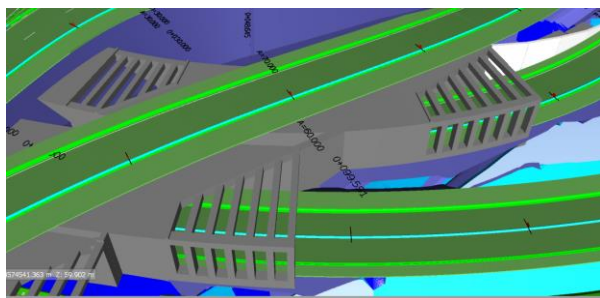


Figura 3. Vista de las estructuras con aligeramientos en losa y hastiales.

Hay casos, como el de la Estructura E-1, en los que discurren en paralelo un vial de carretera y un ramal ferroviario. En este caso, se ha optado por diseñar dos marcos en paralelo, en lugar de un único marco bicelular, en la línea de diseñar estructuras adaptadas a los asientos que se puedan producir, tras la realización de la precarga.

Dado que los dos marcos discurren en paralelo y están separados transversalmente a una distancia inferior de 3 metros, ha sido necesario disponer entre las estructuras un relleno de piedra tipo grava 20/40, de acuerdo con las indicaciones geotécnicas.

En el caso de la sección del marco por el que discurre el ferrocarril, como la distancia del eje de la vía del ferrocarril a la cara interior de los hastiales es inferior a 5 metros, no ha sido posible disponer la sección aligerada en los hastiales, porque los pilares no aguantarían la fuerza de impacto ferroviario por descarrilamiento exigida por el EN1991 (Figura 4).

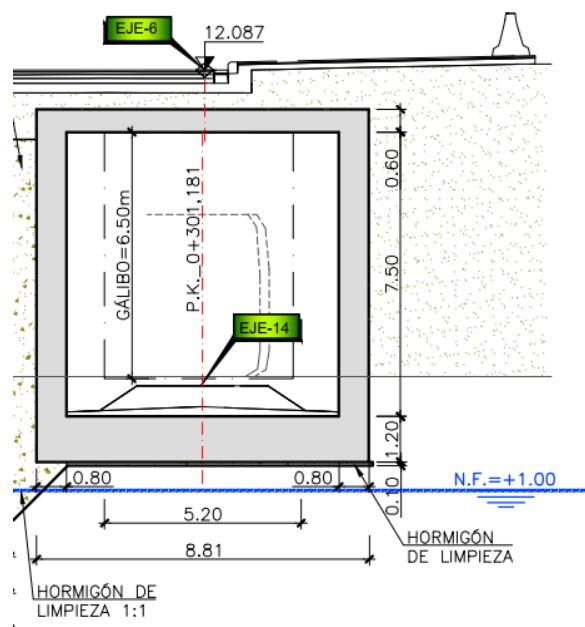
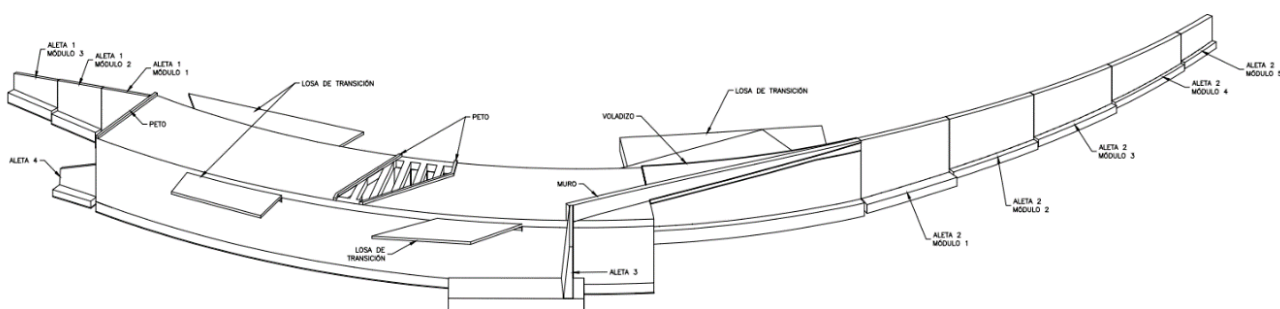


Figura 4. Sección transversal E-1 (ferrocarril).

La presencia de múltiples elementos en la zona ha requerido desarrollar soluciones con una geometría complicada, que requieren comprobaciones estructurales complejas.



Es el caso de la Estructura E-3, mostrada en la Figura 5, que en el cruce bajo uno de los ramales presenta un gran esviaje y en su parte final se encuentra con un colector, que interferiría con la estructura. Por esta razón, mientras que en la primera parte del cruce mantiene la tipología tipo marco, en el último tramo ha pasado a ser una estructura en voladizo que, apoyándose en un muro longitudinal, no produce ninguna afectación al colector. En la Figura 6 se muestra la sección desarrollada en la zona de la interferencia.

2.2 Estructuras fuera del enlace

En las inmediaciones del enlace, fuera de la glorieta elevada, se han proyectado un muro de gran longitud, una pasarela, una galería y un marco para un desvío provisional.

La estructura más destacada es la pasarela peatonal, que permite dar continuidad al itinerario peatonal y ciclista sobre las vías del ferrocarril.

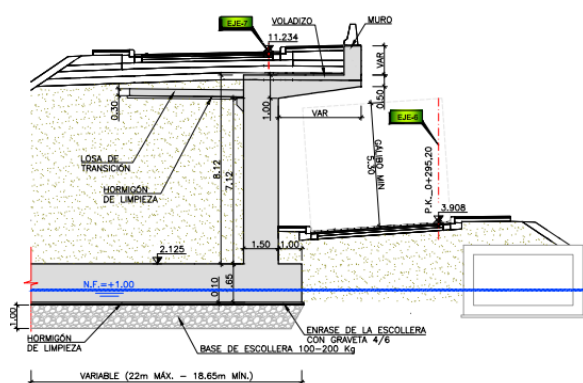


Figura 6. Sección transversal del voladizo de la E-3.

El salto de las vías se resuelve con una estructura hiperestática de hormigón postesado, con un ancho total de 6,00 m (5,40 de ancho útil para el paso de bicicletas y peatones) y un canto de 1,35 m. En el tramo sobre las vías, la pasarela tiene una luz máxima de 33 metros y consta de cuatro vanos hiperestáticos con distribución de luces 19,35+25,00+33,00+20,20 m. La relación canto/luz del tablero es 1/24, habitual para este tipo de estructuras (véase Figura 7).

La rampa de acceso de la pasarela se resuelve con dos tramos independientes, que forman una U en planta, y se encuentran estructuralmente separados mediante una junta. Cada uno de estos tramos es hiperestático y consta de varios vanos de 10,50 m de luz máxima, que se resuelven mediante una losa de hormigón armado de 0,60 m de canto (relación canto/luz de 1/18). El ancho total de la rampa coincide con el del tramo postesado.

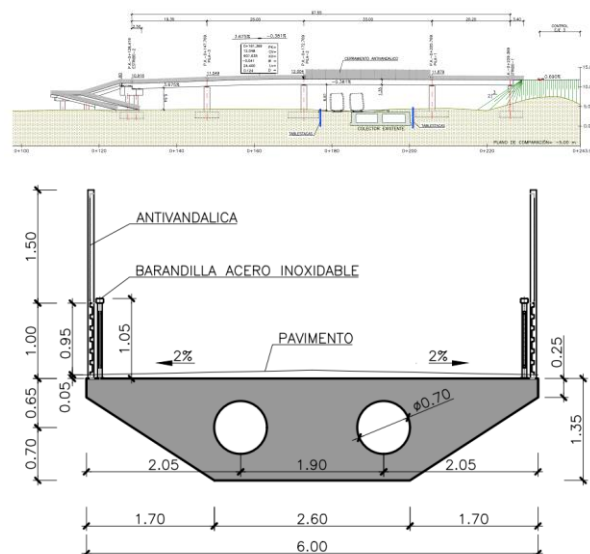


Figura 7. Alzado y sección pretensada de la pasarela.

2.3 Estructuras de la playa de control

En este apartado se incluyen una marquesina, diferentes elementos de cimentación y un foso de comunicación.

El elemento estructuralmente más interesante es la marquesina. Tras un estudio de alternativas, se seleccionó la solución que se muestra en la Figura 8. Con el objetivo de minimizar los pilares a la vez que se cuidaba la estética, se ha diseñado una estructura tipo árbol, en la que de cada pilar central nacen cuatro vigas, dispuestas a 45° respecto a los carriles. Estas grandes vigas en voladizo soportan los diferentes planos de cubierta, con una inclinación mínima del 5%, lo que permite una construcción sencilla y una correcta evacuación del agua de lluvia.

Las dimensiones en planta son 26 x 47 m. El gálibo mínimo es 6,50 m, por lo que se adopta esa dimensión para la altura del pilar desde el suelo hasta el arranque de las vigas.

Las vigas principales son de canto variable. En todo el perímetro se dispone una cercha para dar soporte al peto de cubierta y a los paneles de señalización. (Figura 9).



Figura 8. Vista de la marquesina.

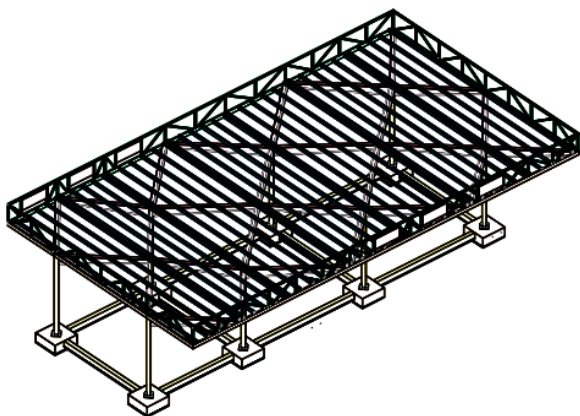


Figura 9. Modelo estructural de la marquesina.

3. Fase 2B

Esta fase comenzará una vez que el Atraque 35 y su explanada estén construidos. Se habrá ganado terreno al mar y la topografía inicial será una superficie de terreno en torno a la cota +4,0.

3.1 Viaducto

El viaducto comienza en las inmediaciones de la glorieta de la Fase 2A y se extiende en una longitud de 641,75 m, justo hasta el comienzo del futuro Atraque 35. El trazado en planta discurre entre una curva a izquierdas y una posterior curva a derechas. La distribución de luces es 23,00+30,00+15x37,25+30,00 m (véase Figura 10). En el vano 4 se pasa sobre un ramal de la actuación, en los vanos 5 y 6 sobre sendas vías de ferrocarril que cruzan con fuerte esviaje, en el vano 8 se salva la prolongación de un colector y hay una glorieta que rodea la pila 8. El trazado en alzado está condicionado por los gálibos que hay que respetar en cada uno de los elementos sobre los que discurre el trazado.

Se realizaron numerosos encajes, tanto del trazado geométrico como de la distribución de luces hasta llegar a una distribución de luces tan regular y constructiva como la indicada.

Estructuralmente se ha diseñado una solución de viga cajón bicelular pretensada continua, con un canto de 1,80 m (relación canto/luz de 1/20,7). El proceso constructivo es el clásico de fases, construyendo en cada fase 4/5 de un vano y 1/5 del siguiente.

En las fases 1 y 2, debido a la influencia de la glorieta, el ancho de la sección es variable, pasando de 28,96 m sobre el estribo 1 a 23,60 m en la fase 3, ancho que ya se mantiene constante en toda la longitud de la estructura. En la zona de ancho variable se ha diseñado una sección cajón tritelular.

La sección transversal tipo alberga elementos de contención laterales, aceras, dos carriles por sentido y un elemento de contención intermedio separando los dos sentidos de la circulación.

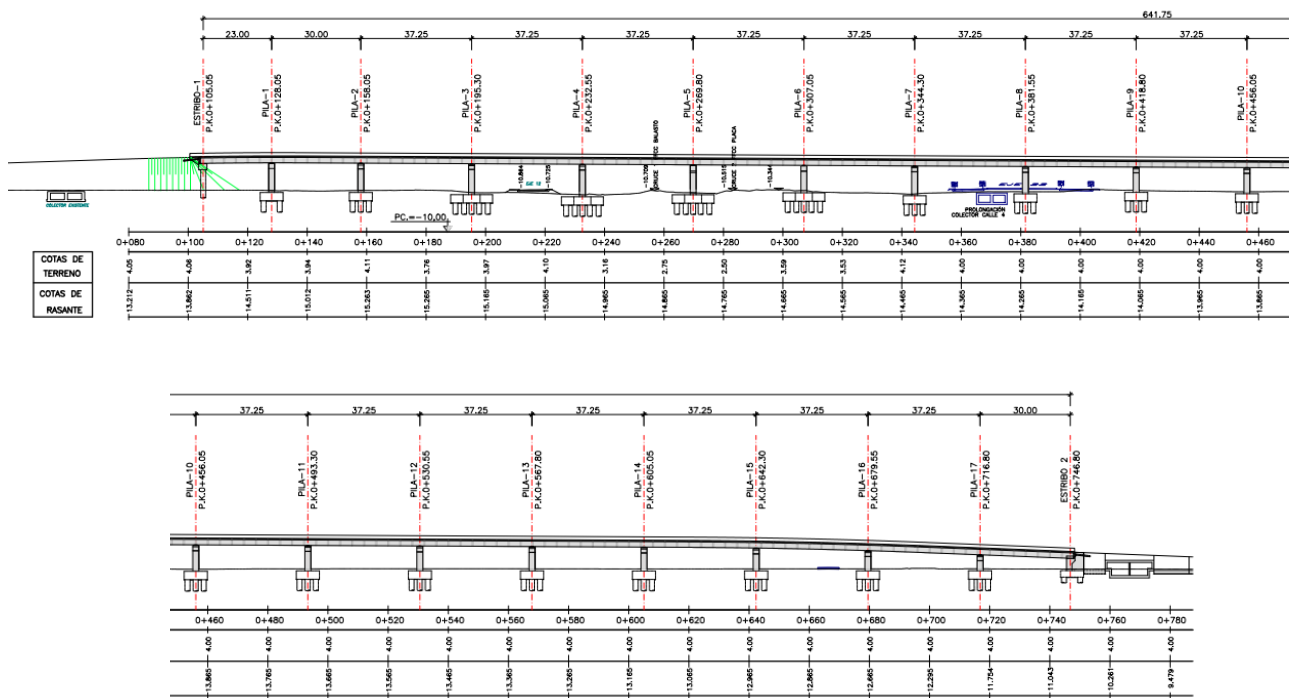


Figura 10. Alzado con la distribución de vanos del viaducto.

Como puede apreciarse en la Figura 11, la sección es simétrica. Tras la contención lateral, se dispone una acera de 2,80 m, un arcén exterior de 0,50 m, dos carriles de 3,50 m y un arcén interior de 0,50 m. Seguidamente se dispone la mediana de 0,70 m, en la que se instala un elemento de separación con la calzada del otro sentido, de análogas dimensiones.

En la zona de ancho constante, el tablero tiene una anchura de 23,60 m y el núcleo central del cajón 12,58 m. Para lograr el ancho total necesario de tablero, se disponen jabalones transversales, que permiten hormigonar sobre ellos la parte restante de la losa superior. En la zona de ancho variable, los jabalones son idénticos, manteniendo la estética exterior.

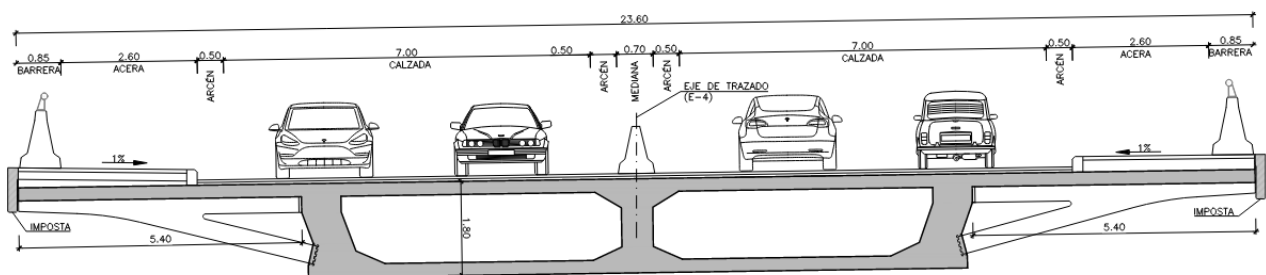


Figura 11. Sección transversal del viaducto en zona de ancho constante (cajón bicelular).

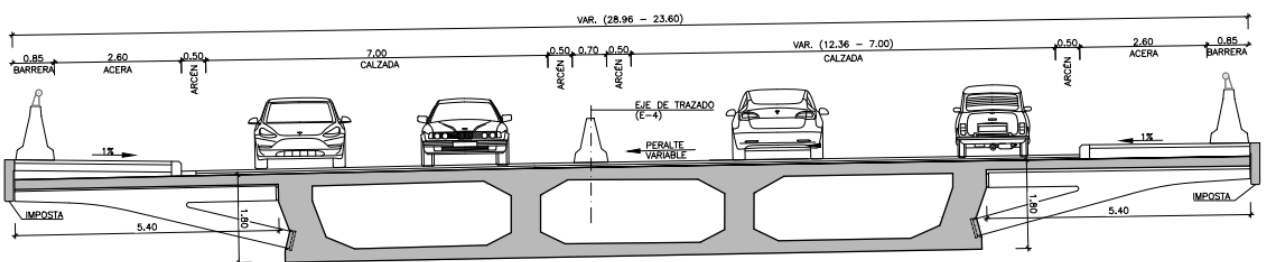


Figura 12. Sección transversal del viaducto en zona de ancho variable (cajón tricelular).

- Fase 1: 4 almas x 6 cables de 19T15.
- Fase 2: 4 almas x 6 cables de 25T15.
- Fases 3 a 17: 3 almas x 6 cables de 25T15.
- Fase 18: 3 almas x 6 cables de 16T15.

- Como ejemplo, en la figura 13 se muestra el pretensado en planta y en alzado del pretensado en las fases 3 a 17.

El diseño de los movimientos en planta resulta especialmente elaborado, por la necesidad de mantener las distancias entre cables y a los paramentos, así como el empleo de curvas y contracurvas que cumplan los radios mínimos establecidos por los suministradores de los cables. El tesado siempre se realiza desde los frentes de fase.

En el tablero también se dispone un pretensado transversal para montar los jabalcones. Está constituido por barras de

Diagrama de un puente de 3.50 m de luz entre pilas, con un eje de alma central y una junta de fase a 1.15 m de la pila derecha.

[illegible]

M.A. Higuera, A. Hernando, P. Arias, I. Gandía, A.J. Madrid, M.A. Pindado / IX CONGRESO ACHE – GRANADA 2025

Se han estudiado varias alternativas para el diseño de las pilas y se ha dado prioridad al enfoque estético sobre el meramente resistente. Teniendo en cuenta los elementos que hay que salvar y el gran esviaje de muchos de ellos, se considera que la solución más adecuada es un diseño de pila que recoja las reacciones de las tres almas del cajón y las concentre en un único punto, en el que se dispondrá la cimentación. Con este planteamiento, se han diseñado pilas con forma de marco trapezoidal, con su lado mayor adaptado a la geometría del tablero y el inferior unido a la cimentación. En la Figura 17 se muestra el detalle del conjunto pila-tablero y en la Figura 18 una infografía del viaducto.

cercanas: por un lado, el gálibo ferroviario y, por otro, la distancia normativa para no considerar el impacto del ferrocarril contra la pila.

Por ello, la pila 5 tiene una tipología de pila martillo, con un fuste de 3,70x2,00 m (Figura 19).

Otra excepción lo constituye la pila 1, que se sitúa en la zona de ancho variable, ya que, si se siguiera el patrón de dos fustes inclinados, la excesiva anchura requerida imposibilitaría dicha solución. Por ello, ha sido necesario recurrir a ejecutar una pila pórtico con tres fustes.

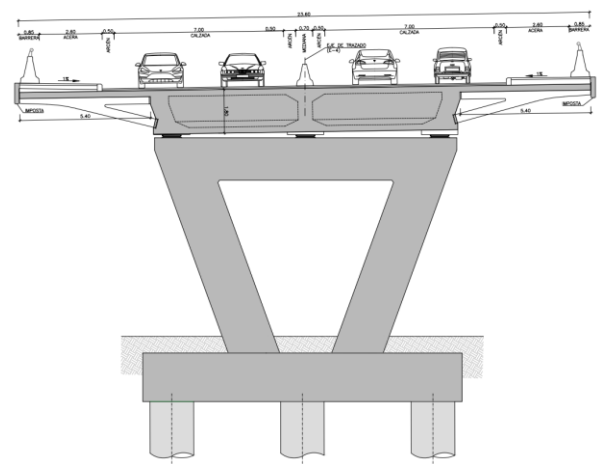


Figura 17. Alzado de pilas tipo.

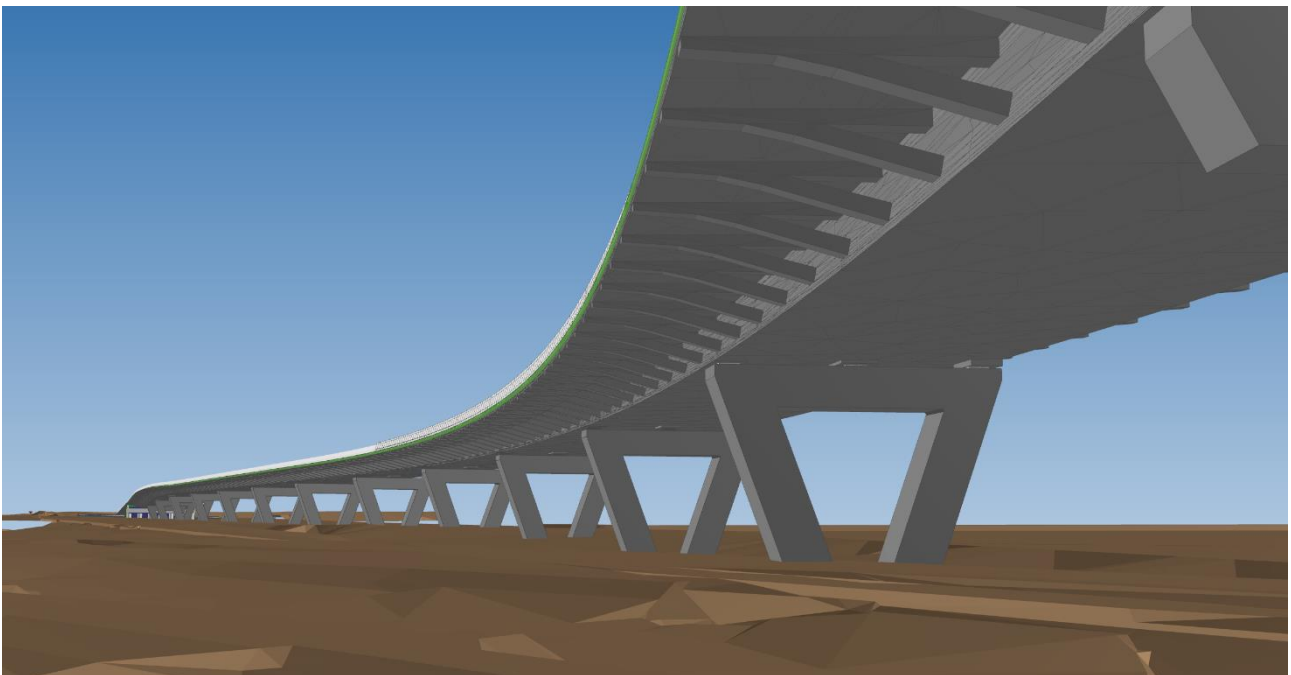


Figura 18. Infografía con la vista general del viaducto. Puede apreciarse el diseño de pilas y jabalcones.

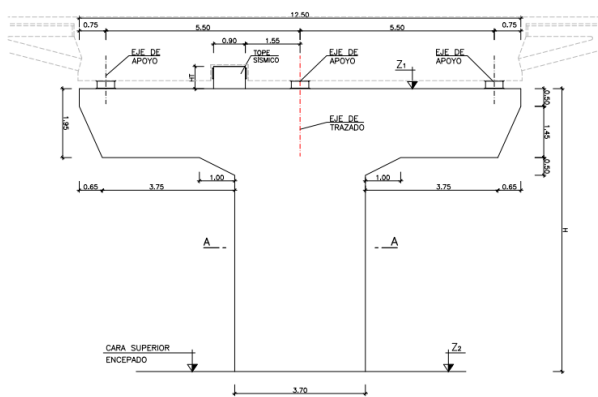


Figura 19. Alzado de pila 5.

A partir de los cálculos, se concluyó que la transmisión de la acción sísmica desde el tablero hasta las pilas no podía realizarse a través de los aparatos de apoyo. Fue preciso disponer un tope sísmico en los dinteles de todas las líneas de apoyo, como se muestra en la Figura 19.

La magnitud de las cargas verticales transmitidas por el tablero ha hecho necesario pretensar todos los dinteles de las pilas.

Todas las cimentaciones son profundas, siendo necesario por motivos geotécnicos disponer pilotes entubados hasta la cota -70.

Todos los encepados tienen 2,80 m de canto. El de la pila 1 está sustentado por seis pilotes de 1,70 m de diámetro. En el resto de las pilas se disponen cinco pilotes por encepado (Figura 20). En las pilas 3 a 6 los encepados se aparecen girados respecto a las pilas, adaptándose a las vías inferiores. Se ha realizado un encaje detallado en cada uno de ellos, para garantizar que es posible su construcción con los elementos que es preciso salvar. El proyecto incluye el dimensionamiento de las pantallas de tablestacas a disponer en cada cimentación para poder excavar los encepados.

El estribo 1 se sitúa sobre el terraplén de la glorieta y consiste en un cargadero pilotado. El estribo 2 se configura como un clásico estribo cerrado con muros en vuelta. La cimentación de ambos estribos es profunda, con pilotes de 1,70 m de diámetro, empleándose seis en el estribo 1 y diez en el estribo 2. Sobre ambos estribos se disponen juntas de dilatación.

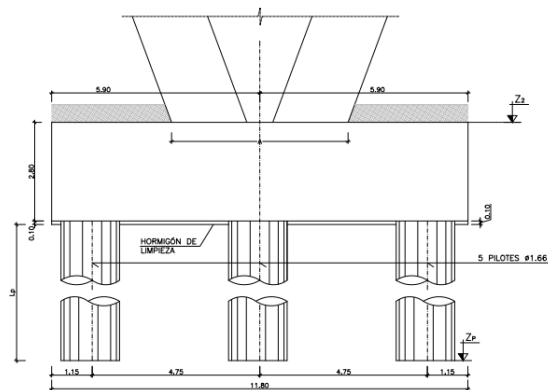


Figura 20. Encepado de pilas 2 y 7 a 17.

Los condicionantes del diseño de los pilotes han sido los siguientes:

- Se trata de pilotes de hormigón armado de gran diámetro, con armadura en toda su longitud. Se proyectan totalmente entubados, con el objetivo de reducir el riesgo de afección al acuífero.

- Se diseñan para soportar una tensión de tope estructural de 5 MPa.

- Los pilotes se construyen sobre un perfil de terreno ya consolidado, de forma que la mayor parte de sus asientos habrán sucedido antes de su construcción. No obstante, en el proyecto se han tenido en cuenta los asientos remanentes por consolidación secundaria.

El proceso constructivo previsto para el viaducto es el siguiente (se hace con cimbra cuajada, salvo en alguna fase, y se considera que se dispone de cimbra para dos fases):

1. Ejecución de pantallas de tablestacas provisionales para proteger colectores y vías existentes.

2. Excavaciones de encepados, ejecución de pilotes, ejecución de encepados. La construcción comenzará en el estribo 1.

3. Retirada de las pantallas provisionales. Construcción de alzados de pilas, comenzando por la pila 1.

4. Montaje de la cimbra de la fase 1.

5. Tablero fase 1. Encofrado, ferrallado y hormigonado del núcleo central. Montaje simétrico de jabalcones y de prelosas. Hormigonado simétrico de losas laterales. Cuando la sección esté completada, tesado de la

fase 1 del tablero. Simultáneamente se monta el segundo juego de cimbra en la fase 2.

6. Desde el momento en que se tesa la fase 1, es posible desmontar la cimbra de fase 1 y trasladarla a la fase 3.

7. Tablero fase 2. Encofrado, ferrallado y hormigonado del núcleo central. Montaje simétrico de jabalcones y de prelosas. Hormigonado simétrico de losas laterales. Cuando la sección esté completada, se procede al tesado de la fase 2 del tablero. Traslado de la cimbra a la fase 4.

8. Este proceso se repite fase a fase hasta completar el tablero. Hay una singularidad en los vanos 5 y 6: en las proximidades de las vías existentes, la cimbra cuajada se sustituye por cimbra porticada.

9. Una vez finalizado el tablero, se procede a su impermeabilización. A continuación, se realiza el montaje de barreras, pavimentado, acabados y limpieza. Tras ello, se realiza la prueba de carga del viaducto y, si su comportamiento es adecuado, se puede poner en servicio.

3.2 Resto de estructuras de la Fase 2B

En esta fase hay dos estructuras más, que permiten el paso de los canales de servicios que discurren por el Puerto. Ambas se han resuelto con marcos bicelulares de hormigón armado.

3. Comentarios finales

Todo el proyecto se ha redactado con metodología BIM. En la fecha de redacción de la presente ponencia, el proyecto completo está finalizado. Se ha recibido y respondido la supervisión de la Fase 2A y se está a la espera de realizar el mismo proceso para la Fase 2B.

A nivel constructivo, en la fecha actual están aplicadas precargas en la ubicación de la glorieta, como se muestra en las Figuras 21 y 22.



Figura 21. Vista de la Av. Ports d'Europa desde la coronación de la zona con precarga.



Figura 22. Vista de la Ronda del Port desde la coronación de la zona con precarga.

Agradecimientos

Propiedad y Dirección del Proyecto: Autoridad Portuaria de Barcelona.

Autoría del Proyecto: UTE Proes – Socotec.