

Viaductos en la Línea de Alta Velocidad Níjar-Almería

Viaducts for the High-Speed Line Níjar-Almería.

José Luis Sánchez Jiménez^{*, a}, Fernando Cea Soriano^b

^a Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Director del Departamento de Estructuras de TYPESA (Madrid, España)

^b Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Jefe de equipo. Departamento de Estructuras de TYPESA (Madrid, España)

RESUMEN

El tramo Níjar-Río Andarax (Almería) de la L.A.V. Murcia-Almería, incluye 16 viaductos: 3 de velas in situ (canto hacia arriba) y 13 resueltos con una viga cajón prefabricada. Las soluciones con viga prefabricada tienen una luz tipo de 40 m, alcanzando luces de 54 m mediante acartelamientos sobre pila. El artículo describe las particularidades del diseño de estos viaductos, desde la homogeneización de los vanos hasta la solución de losa simplemente armada sobre pila para luces de hasta 54 m, pasando por encepados de estribo asimétricos. Se destaca el Viaducto sobre el Río Andarax, de 1414 metros, donde se ha adaptado la solución clásica de vanos isostáticos a una con parejas de vanos conectados.

ABSTRACT

The section Níjar-Andarax River (Almería) of the HS Line Murcia-Almería, includes 16 viaducts: 3 of concrete sails and 13 solved by means of precast box girders. These solutions with precast beams cover typical spans of 40 m, reaching spans up to 54 m using haunches/chamfers over the pier. The article describes the particularities associated to the design of these viaducts, from the homogenization of spans to the simply reinforced sections of slab on piers for spans up to 54 m, and also the asymmetrical pile distribution under abutments. The Viaduct over the Andarax River, 1414 m long, is highlighted, where the classic solution of simply supported spans has been adapted to couples of connected spans.

PALABRAS CLAVE: alta velocidad, LAV, prefabricado, sismo, estandarización, homogeneización.

KEYWORDS: high-speed, HS, precast, seism, standardization, homogenization.

1. Introducción

El presente artículo se centra en el tramo Níjar-Río Andarax (Almería) de la L.A.V entre Murcia y Almería, diseñado por Técnica y Proyectos S.A. (TYPESA). Dicha sección, de 25 km de longitud consiste en un tramo de vía única en el que se incluyen 16 viaductos, un túnel en mina de 800 m, 4 pasos superiores, 9 pasos inferiores y gran cantidad de obras de drenaje y pasos de fauna.

El proyecto se redactó con la premisa de maximizar la estandarización de las soluciones y

minimizar los costes de mantenimiento, siempre con estructuras competitivas en su precio de construcción frente al resto de alternativas disponibles.

Dicha estandarización no abarca exclusivamente la homogeneización de las luces para los viaductos, sino que cubre desde las soluciones para cimentación a los detalles constructivos.

Todo lo anterior, unido al empleo de soluciones prefabricadas para los tableros de los

viaductos, aporta una solución ventajosa tanto para la propiedad (ADIF) como para la contrata.

Lógicamente, la estandarización no debe entrar en conflicto con la flexibilidad. Como se explica más adelante, ese mismo grupo de detalles “tipo” permitió resolver luces de 32 m para los vanos extremos y 40 m, 47 m o incluso

54 m para los vanos intermedios, mediante el uso de cartelas sobre pilas.

Como ejemplo de la flexibilidad en cuanto a la distribución de vanos que aporta el uso de la cartela sobre pila se muestra el Viaducto sobre la Rambla del Arca, donde con vigas de 32 m y 40 m se tienen vanos de 32 m, 40 m, 47 m y 54 m.

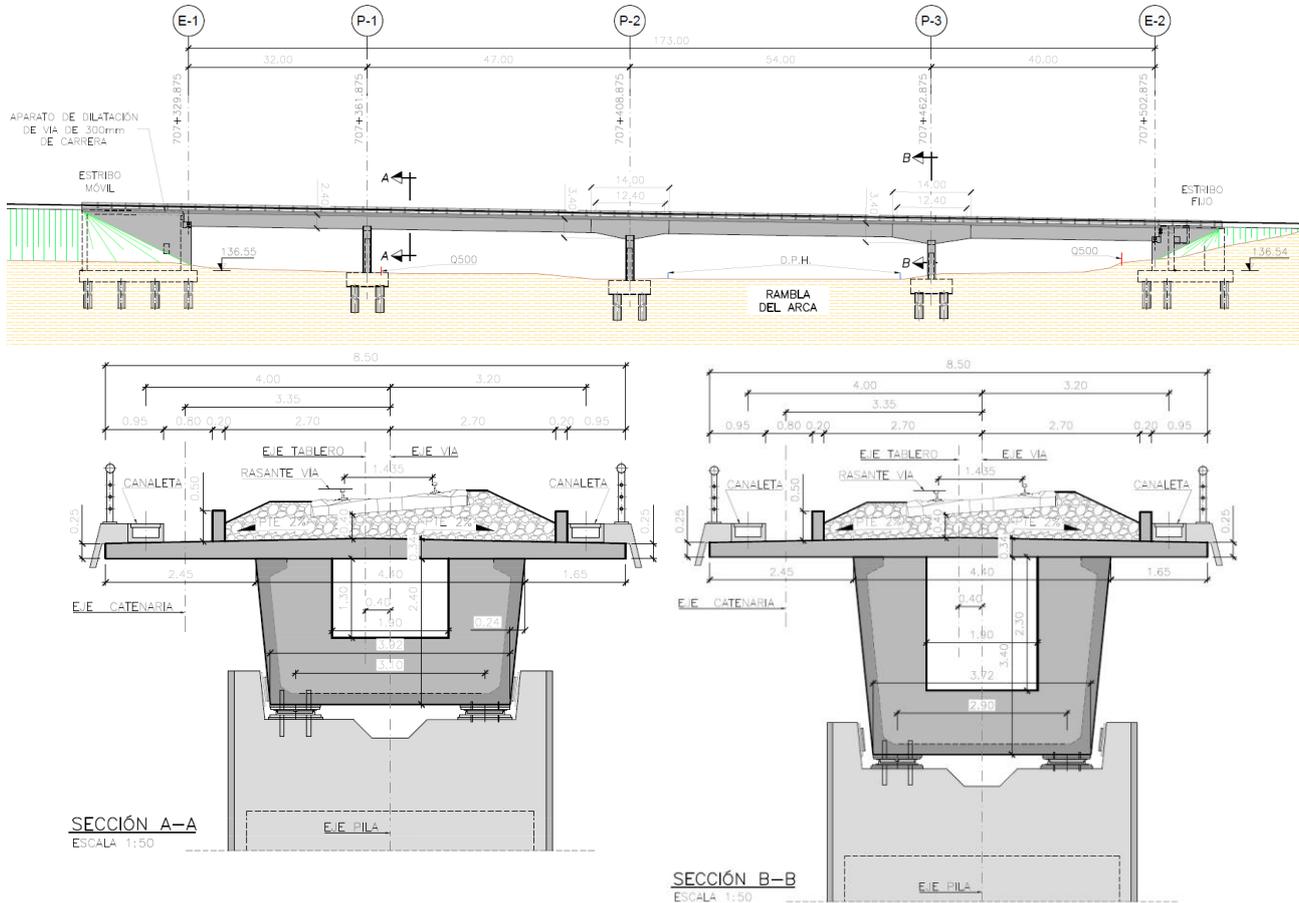


Figura 1. Viaducto sobre la Rambla del Arca. Alzado longitudinal y secciones sobre pila.

Por otro lado, cuando los condicionantes de determinadas estructuras particulares están claramente diferenciados de los del resto, la homogeneización debe abrir la mano a otras soluciones. Este es el caso de tres de los

viaductos, para los que el condicionante crítico era la altura de la rasante respecto a carreteras existentes, lo que requirió de soluciones distintas, con el canto hacia arriba, mediante velas laterales de hormigón postesado.

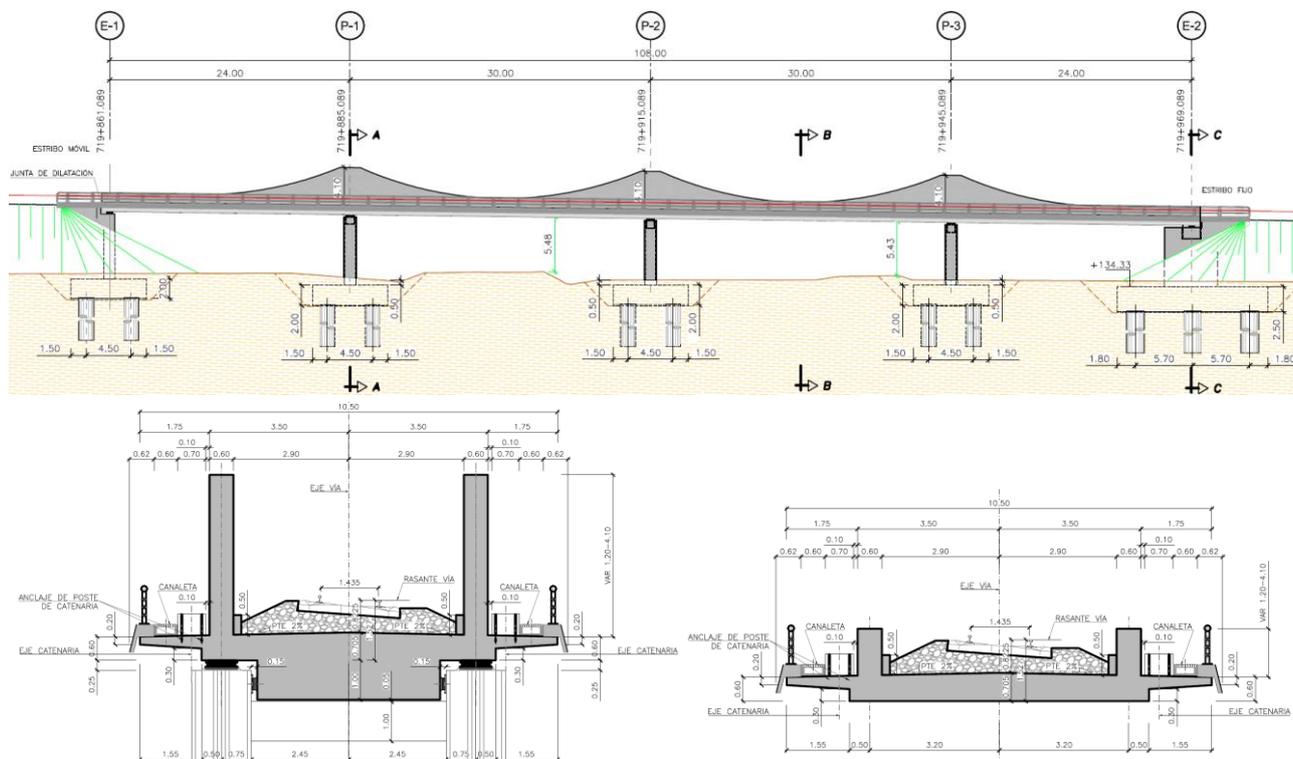


Figura 2. Viaducto sobre la carretera N-347. Alzado longitudinal y secciones tipo.

2. Datos de partida

El tramo Níjar-Almería de la L.A.V. Murcia-Almería se había desarrollado en fases anteriores dividido en tres secciones diferenciadas, todas para doble vía:

- Níjar-Rambla Retamar (Proyecto Básico paralizado en 2013).
- Rambla Retamar-Mayorales (Proyecto Constructivo desarrollado en 2012)
- Mayorales-Almería (Proyecto Básico paralizado en 2013)

Como se ha mencionado, el nuevo proyecto para el tramo conjunto debía desarrollarse para vía simple, por lo que no resultaba viable mantener ninguna de las soluciones de los proyectos de referencia.

Por otro lado, los proyectos anteriores resolvían mediante soluciones distintas, problemáticas muy similares, al analizarse en su conjunto.

3. Diseño Conceptual

El diseño conceptual supuso la primera fase del trabajo desarrollado por TYPESA en este proyecto.

El diseño conceptual es un tema suficiente importante como para merecer un espacio propio. FIB (*Fédération Internationale du Béton – International Federation for Structural Concrete*) ha incluido entre su publicación “*Proceedings of the International fib Symposium on Conceptual Design of Structures*” el artículo [1] “*Guiding Axes on Conceptual Design and their Application to High Speed Railway Viaducts*” (Ejes Rectores del Diseño Conceptual y su Aplicación a Viaductos de Alta

Velocidad) desarrollado por TYPESA dentro del apartado de “materialización”.

En dicho artículo se describe la metodología seguida por los autores en la fase de diseño conceptual y se presenta este proyecto como ejemplo de su aplicación.

4. Elementos representativos del diseño

4.1. Estribos Fijos

El estribo fijo de un viaducto de ferrocarril en zonas con preponderancia de las acciones sísmicas tiende a ser un elemento voluminoso.

Desde el momento inicial, se impuso un criterio adicional de encaje no sólo para las cimentaciones de los estribos sino también para las de pila: evitar los axiles de tracción en pilotes.

Este criterio evita los detalles de conexión de la armadura de los pilotes con la cara superior del encepado, que resultan de complicada ejecución. En primer lugar, como se ha dicho, se determinó la carga del tiro longitudinal. A modo de ejemplo, se muestran los valores calculados para un coeficiente de terreno $C=1.60$ en función de la longitud del tablero:

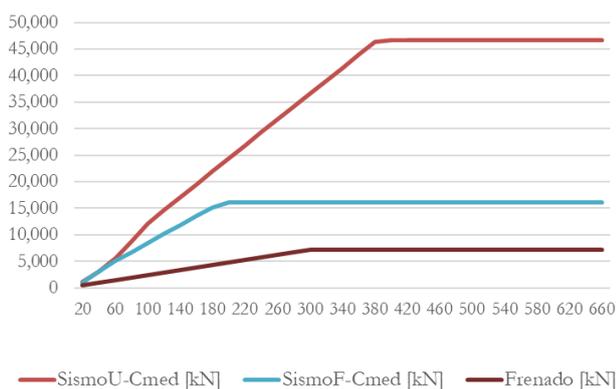


Figura 3. Tiro longitudinal en función de la longitud del tablero (2.44 t/m^2 ; $a_0 = 0.14 \text{ m/s}^2$; $C=1.60$).

Como puede verse, los valores del tiro sísmico longitudinal alcanzan una asíntota en el entorno de los 200 m para el sismo frecuente, los del frenado lo hacen a los 300 m y el sismo último deja de crecer en el entorno de los 400 m. Esto hace que, a partir de dichos 380-400 m, un

aumento en la longitud del tablero no penaliza el punto fijo, salvo por el efecto de las fuerzas de rozamiento adversas. Realmente, el primer modo no moviliza el 100% de la masa, y las fuerzas obtenidas mediante los modelos de cálculo finales, estaban en el entorno del 85% de estas, lo que ratifica la validez de la estimación.

Los encepados de estos estribos fijos se plantearon con el mínimo número de pilotes compatible con las cargas horizontales, incluyendo los empujes y las fuerzas inerciales dependiendo de la altura del estribo. Una vez determinado dicho número de pilotes, se obtuvo la disposición de éstos de manera que se garantizase que la carga era de compresión en todas las hipótesis. Para ello:

1. Se distribuyen los pilotes de manera que se aprovecha el peso de las tierras. Se eliminan los pilotes de la banda central que reducirían la contribución del axil aportando poco brazo en el reparto de momento.
2. Se mantienen los pilotes de la banda central en el frente bajo el muro, donde las compresiones son mayores.
3. Se emplean unos cuchillos dorsales o contrafuertes de manera que se mantiene la rigidez para el reparto de cargas bajo el encepado sin aumentar su canto.
4. Se emplean muros laterales de modo que las tierras del trasdós se limitan a la zona en la que el efecto estabilizador de su peso es mayor que el efecto volcador de su fuerza inercial.
5. Se deja hueco el estribo en la zona donde las cargas verticales son mayores, aligerándolo con el objeto de compensar el hecho de que la carga permanente del tablero está en la zona frontal del estribo.
6. En los estribos con mayor tiro longitudinal, los cables se llevan hacia atrás, al otro lado del hueco citado, con el objeto de emplear toda la longitud de dicha zona para hacer eficaz el conjunto de los muros.

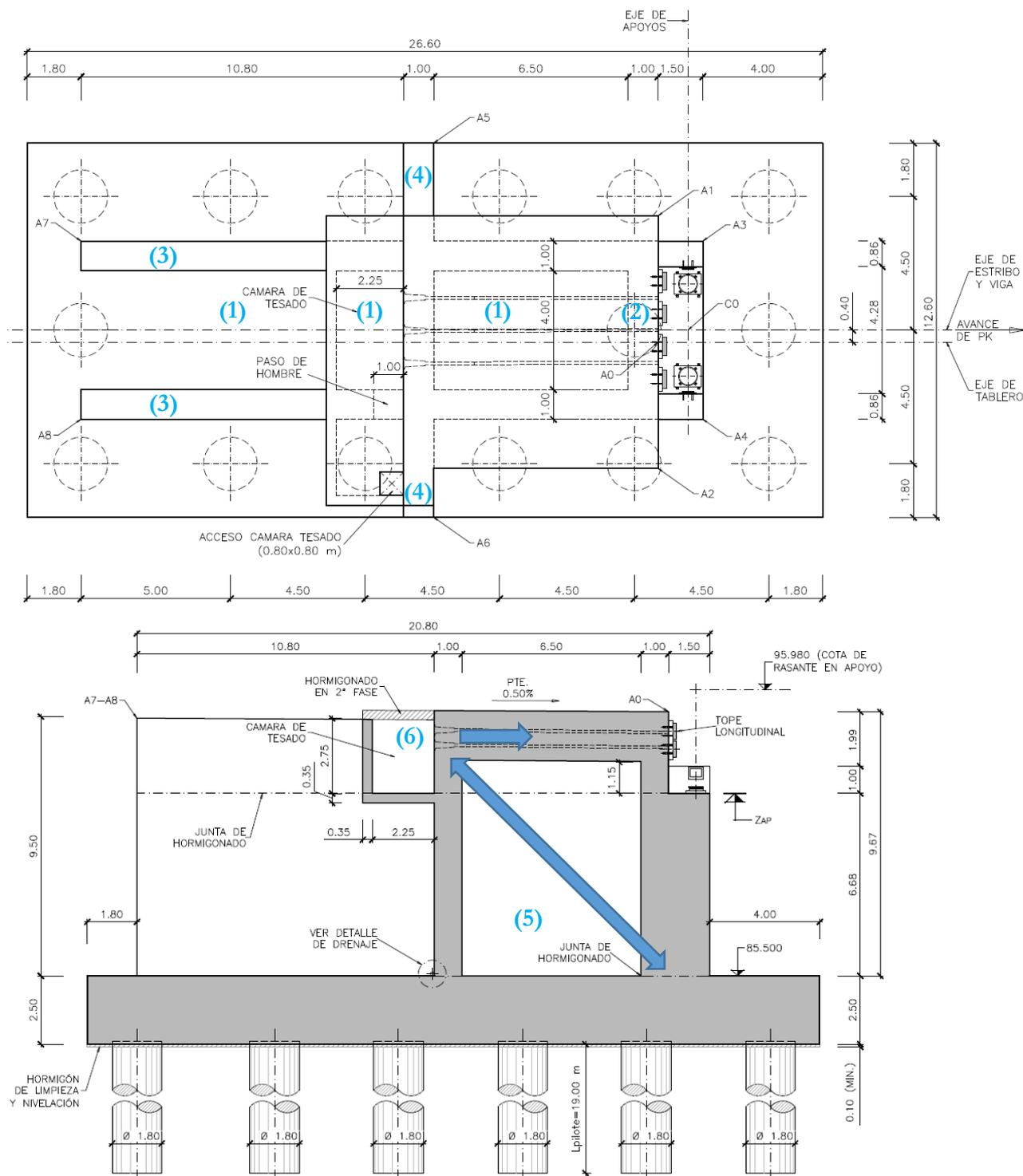


Figura 4. Ejemplo de estribo fijo. Viaducto sobre Rambla de la Sepultura (estribo fijo con máxima carga longitudinal de la L.A.V. Níjar-Almería)

Mediante un cálculo similar, monomodal y con una hoja de cálculo, se determinó el tipo de conexión a emplear. Las conclusiones de dicho

cálculo se muestran en la tabla siguiente, en la que además se incluyen las distribuciones de vanos finalmente planteadas.

Tabla 1. Tipologías estructurales finalmente desarrolladas y materialización de puntos fijos.

Denominación	Vanos	Distribución	Longitud Total (m)	Solución Estructural	Tiro [kN]	Solución Punto Fijo
V. sobre Ctra. Al-3108	3	24+30+24	78	Velas	4,800	Tetón descolgado
V. sobre Autovía A-7 y Rambla de las Ródenas	6	32+2x40+2x39+32	222	Cajones Continuos	20,000	6 barras Ø75
V. sobre Rambla del Inox	4	32+2x40+32	144	Cajones Continuos	14,000	4 barras Ø75
V. sobre Hoya de la Gitana	6	40+54+4x40+32	286	Cajones Continuos	28,500	4 cables de 31 cordones
V. sobre Rambla del Maltés	15	32+12x40+35+28	575	Cajones Continuos	34,500	4 cables de 37 cordones
V. sobre Rambla del Arca	4	32+47+54+40	173	Cajones Continuos	18,500	6 barras Ø75
V. sobre Ramblas de los Césares y Retamar	7	32+3x40+47+54+40	293	Cajones Continuos	28,500	4 cables de 31 cordones
V. sobre Autovía A-7	10	32+3x40+47+48+54+47+40+32	420	Cajones Continuos	35,000	4 cables de 37 cordones
V. sobre Rambla de las Higuieruelas	7	28+35+40+47+54+53+40	297	Cajones Continuos	30,500	4 cables de 31 cordones
V. sobre Rambla del Agua	2	39+39	78	Cajones Continuos	7,500	4 barras Ø75
V. sobre Rambla del Puente de la Quebrada	4	32+40+47+32	151	Cajones Continuos	16,000	6 barras Ø75
V. sobre Rambla de la Sepultura	14	32+3x40+47+54+47+6x38+32	560	Cajones Continuos	39,000	6 cables de 27 cordones
V. sobre Rambla Honda	3	24+30+24	78	Velas	4,800	Tetón descolgado
V. sobre Ctra. N-347	4	24+2x30+24	108	Velas	7,200	Tetón descolgado
V. sobre Arroyo de la Mar	4	40+54+47+32	173	Cajones Continuos	17,000	6 barras Ø75
V. sobre Río Andarax	43	24x32+40+54+40+16x32	1414	Parejas De Cajones	-	-

4.2. Encepados de pilas

Dada la homogeneidad de las luces a lo largo del tramo, resulta inmediato que la carga vertical en la mayor parte de las pilas es muy similar.

Sin embargo, las diferencias entre alturas de pila generan diferencias importantes en los momentos en la base de las mismas, especialmente en los transversales, originados por el sismo en dicha dirección. Por ello, con carácter general, se ha empleado una cimentación con 4 pilotes Ø1.50 m deduciendo, para cada pila, el intereje transversal entre pilotes, de modo que se respete el tope

estructural de los mismos a la vez que se asegura que no llegan a producirse tracciones bajo ninguna de las combinaciones de sismo último.

De este modo, se minimiza el número de pilotes en cada encepado. Eventuales soluciones con mayor número de pilotes en las que aquellos recogidos en la zona central aportan poco (o ningún) brazo frente al momento y detraen parte de la compresión de la carga vertical, harían más difícil evitar las tracciones. En definitiva, con el objeto de evitar las tracciones, es más eficaz un encepado con 4 pilotes que uno con 6, incluso aunque sean del mismo diámetro. Lógicamente, los cantos de encepado crecen con la separación

de los pilotes. Así, a modo de ejemplo, se muestran los encepados menor y mayor del proyecto:

- 7.50x7.50x2.0 para la pila P5 del Viaducto sobre Ramblas de los Césares y Retamar con vanos adyacentes de 47 m y 54 m, pero con una altura de pila de sólo 3.0 m.
- 8.10x14.70x4.0 para la pila P5 del Viaducto sobre la Rambla de la Sepultura con vanos adyacentes de 47 m y 54 m, y una altura de pila en este caso de 17.9 m.

Dentro de la amplia horquilla que definen ambas cimentaciones, se encuentran la totalidad de las pilas del proyecto, donde las dimensiones de cada encepado se obtuvieron “ad hoc” para cada pila en particular.

Como excepción, de las 114 pilas para puentes de viga cajón prefabricada, en 10 fue preciso emplear pilotes de diámetro 1.80 m debido a una baja capacidad del terreno, que hubiese requerido el empleo de pilotes de más de 50 m de longitud.

4.3. Cartelas sobre pilas

Como se ha explicado, las cartelas permitieron extender la viabilidad de la solución planteada de viga cajón a luces de hasta 54 m.

Estas piezas, que se plantean como prefabricadas, tienen una ventaja desde el punto de vista constructivo, puesto que no requieren pretensado, por lo que pudieran ejecutarse en un parque de prefabricados como las vigas o bien a pie de pila para su posterior izado o incluso sobre la pila, apeadas, a la elección de la contrata.

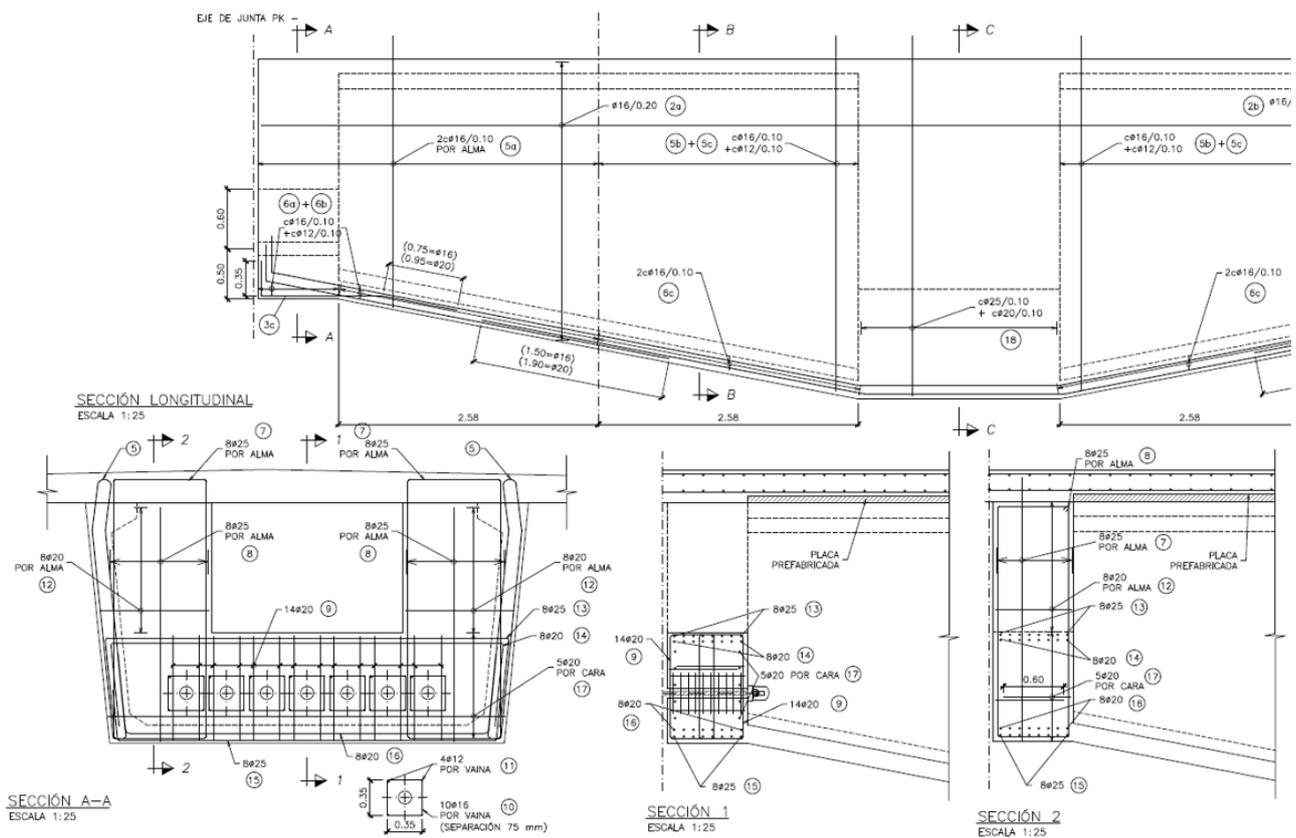


Figura 5. Definición de la cartela armada sobre pila

4.4. Proceso constructivo

En el proceso constructivo se buscó minimizar los momentos negativos sobre pila, con el objeto

de mantener las losas simplemente armadas. Para ello, se recogieron ideas de la construcción del Viaducto de L’Aguilera (TYPESA) así como del Viaducto de La Viñuela (PACADAR), que

tenían luces tipo de 38.0 m en el primer caso y de 35.10 m en el segundo, llevándolas hasta los 54.0 m del presente proyecto.

Los siguientes esquemas muestran un proceso constructivo tipo:

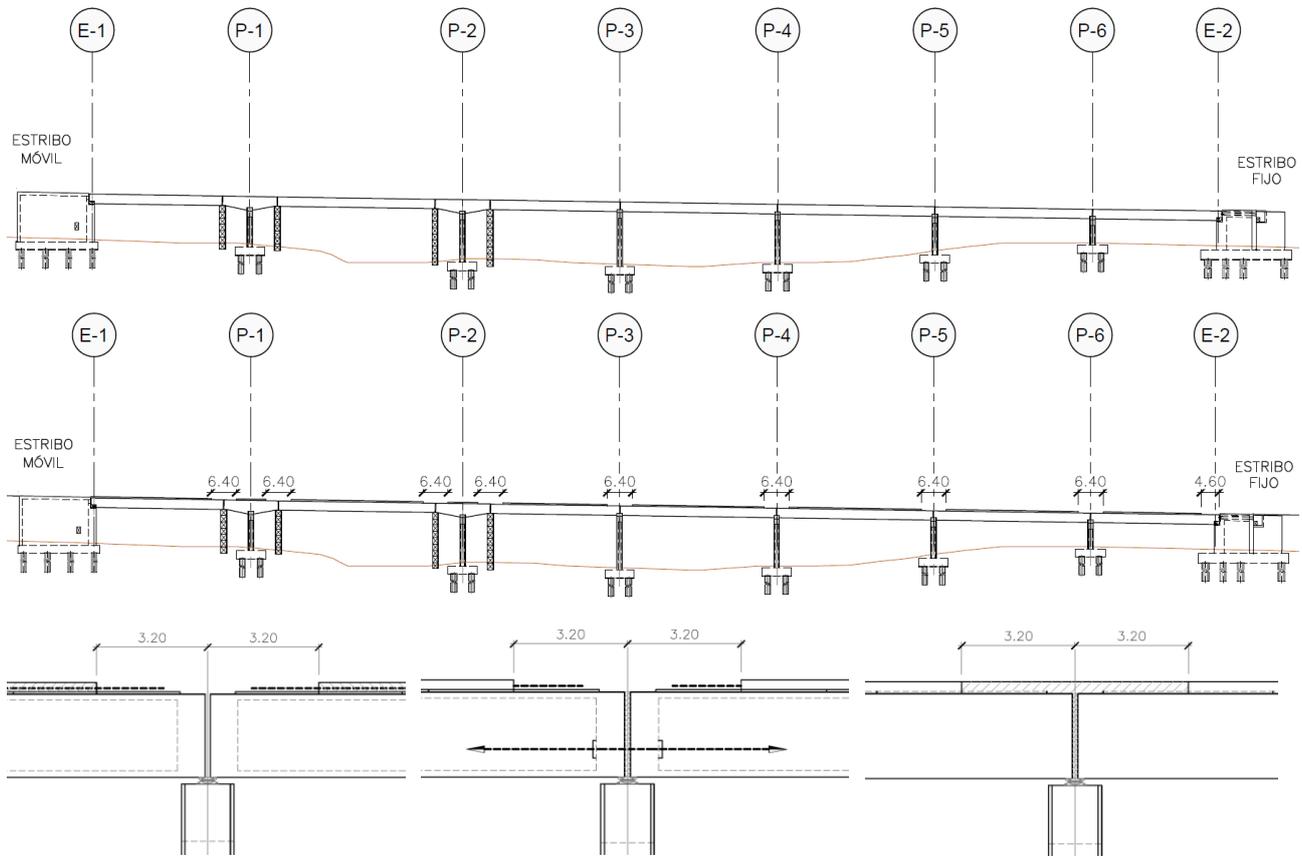


Figura 6. Alzados de proceso constructivo. Viaducto sobre Hoya de la Gitana. Alzado superior para fases 1 y 2, alzado intermedio para fase 3, alzados inferiores para las fases 4, 5 y 7 (véase descripción de fases).

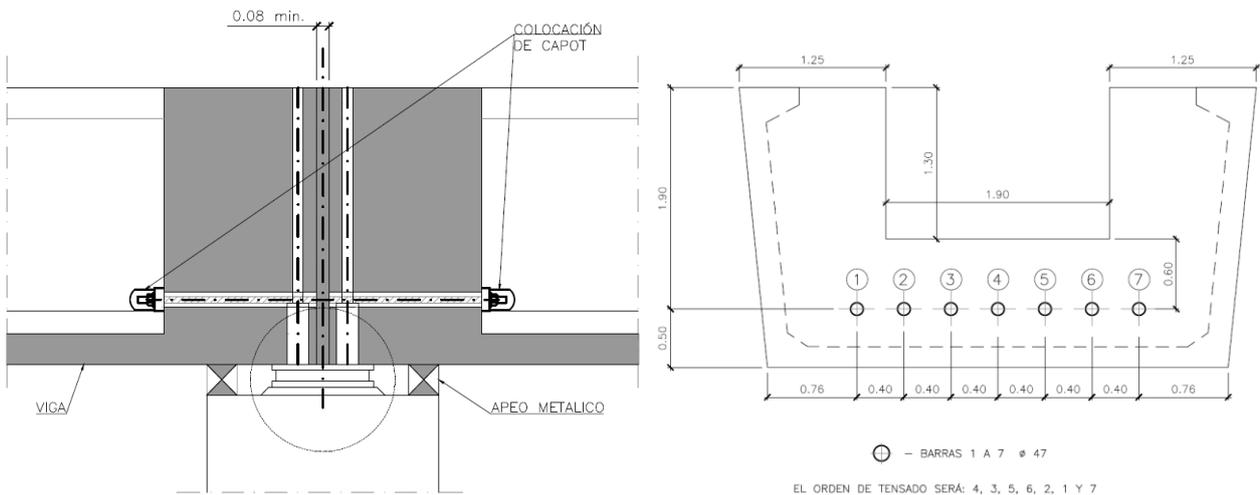


Figura 7. Detalles de proceso constructivo. Izquierda para fase 5.5 (véase descripción de fases) y derecha para la localización de barras de continuidad y orden de tesado.

Dicho proceso constructivo se resume en las siguientes fases:

- Fase 1: ejecución de cimentaciones, pilas y estribos. Replanteo de las mesetas de

apoyo y aparatos de "pots" definitivos. Colocación de apoyos provisionales.

- Fase 2: montaje de vigas prefabricadas, situándolas simplemente apoyadas sobre

- pilas con "pots" bloqueados, evitando los posibles giros de torsión en extremos mediante los apeos provisionales que se colocan a cota definitiva. A continuación se procederá a la inyección de los tubos para "pots". Montaje de cartelas prefabricadas sobre pilas y castilletes.
- Fase 3: colocación de placas prefabricadas del tablero en toda su extensión, excepto 3.20m a cada lado del eje de pilas sin cartela y de castilletes, para mantener el acceso a la zona de unión entre vigas y 4.60m en el entorno del estribo fijo para el tesado del punto fijo.
 - Fase 4: colocación de la ferralla de la losa del tablero "in situ" correspondiente a las zonas del primer hormigonado. Primer hormigonado de la losa "in situ" del tablero, dejando sin hormigonar la zona de esperas de las armaduras correspondientes al último módulo de placas colocado en las zonas de pilas sin cartela y de castilletes.
 - Fase 5: hormigonado mediante mortero de alta resistencia ($f_{ck} > 50$ MPa) de la junta entre vigas. Una vez haya fraguado, tesado de las barras de cosido entre mamparos de viga.
 - Fase 5.1: ejecución de la junta de continuidad entre vigas.
 - Fase 5.2: colocación de vainas corrugadas metálicas Ø81 int. Dentro de las vainas Ø100 int. De las vigas, para evitar la entrada de "grout" durante el hormigonado de la junta.
 - Fase 5.3: encofrado y vertido en la junta de mortero tipo "grout".
 - Fase 5.4: retirada de vainas corrugadas metálicas Ø81 int. Introducción de barras activas y tesado de las mismas. Se tesarán según el orden indicado.
 - Fase 5.5: inyección de vainas con lechada de cemento. Colocación de capot. Continuación del proceso constructivo.
 - Fase 6: tesado de los cables o barras de cosido entre estribo fijo y tablero.
 - Fase 7: colocación de las placas prefabricadas restantes en zonas de pilas. Disposición de la armadura complementaria del tablero en dichas zonas. Segundo hormigonado (final) de la losa del tablero en zonas sobre pilas.
 - Fase 8: retirada de castilletes metálicos.
 - Fase 9: colocación de juntas. Colocación de imposta, barreras y resto de acabados.

3.4. Viaducto sobre el Río Andarax

El Viaducto sobre el Río Andarax supone un caso particular. A la vista de su longitud (1414 m), requería una solución propia con el objeto de poder mantener el criterio de evitar los amortiguadores y minimizar los aparatos.

En caso de haberse aplicado la solución dada a otros de los viaductos más largos del tramo, se hubiese requerido un aparato de dilatación de vía en el estribo libre con mucha capacidad de desplazamiento, entre otras singularidades, como la necesidad de recrecer las riostras sobre las pilas más lejanas al estribo fijo en previsión de los movimientos a largo plazo.

Otra de las particularidades de este viaducto fue que, debido a la fase en la que se encontraba la tramitación con las agencias locales, se requirió mantener el número de pilas que tenía la solución del Proyecto Básico de 2013 dentro de la Cañada Real Río Andarax, lo que limitaba a un máximo de 2 pilas en una longitud de aproximadamente 120 m.

La solución propuesta consiste en una adaptación de la solución clásica de ferrocarril de vanos biapoyados (vía flotante), que hace uso además de algunas de las ventajas de las soluciones tipo empleadas en el resto de los viaductos. Dicha adaptación consistió en parrear

los vanos, solidarizando las vigas dos a dos de manera que una de cada dos pilas era fija. De este modo:

- Se mejora sustancialmente el comportamiento dinámico respecto a una eventual solución de vanos isostáticos, que, a pesar de poder justificarse desde el punto de vista dinámico supone una solución que a priori ADIF prefiere evitar.
- Se emplea la misma viga planteada para los vanos extremos (en estribo libre) del resto de viaductos.
- Se elimina la necesidad de aparatos de dilatación de vía y amortiguadores.
- Se maximiza la estandarización dentro del viaducto, dado que se obtiene un conjunto de vigas todas iguales, con la salvedad de los tres vanos centrales.

Como matiz, la zona del cruce de la Cañada Real no podía plantearse mediante parejas de vanos de 32 m, puesto que hubiese requerido 3 pilas en la cañada. Por ello, para esa zona en particular, se planteó una distribución 40+54+40 con dos pilas fijas. Adicionalmente, las pilas en este viaducto tienen una dimensión longitudinal 0.3 m mayor al resto de las pilas del proyecto, lo que supone una doble ventaja: para las pilas de junta permitiendo el espacio para dos apoyos en longitudinal y para las pilas fijas, mejorando la capacidad frente a las acciones en dicha dirección.

La presencia de esta zona central de 144 m dentro de la cadencia de tableros de 64 m, sin ningún aparato de dilatación de vía, se analizó en detalle mediante un cálculo de interacción vía-tablero.

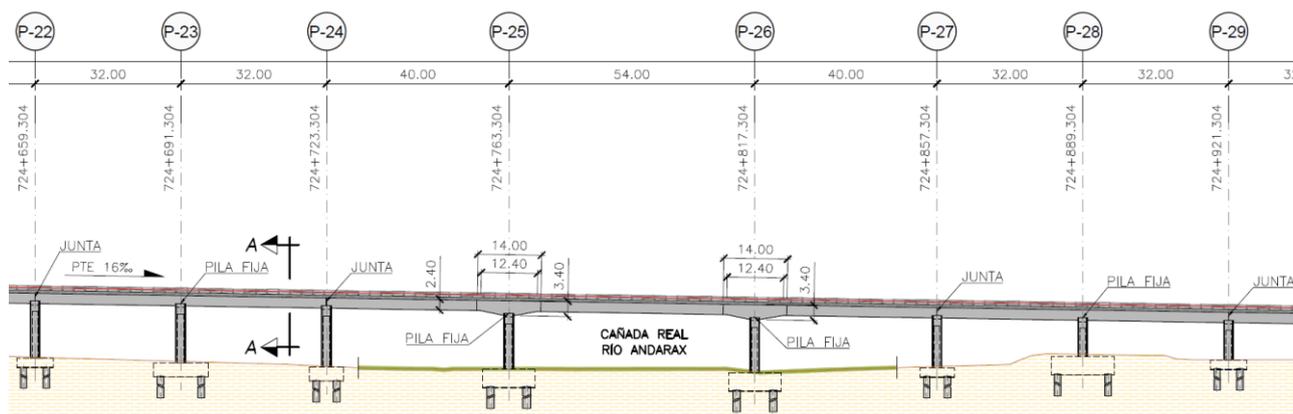


Figura 8. Viaducto sobre el Río Andarax. Alzado longitudinal en la zona de la Cañada Real.

Agradecimientos

Queremos agradecer a nuestros compañeros Ignacio Javier Navarro Martínez, María Díaz Blanco y Sebastián Iglesias Carbonell por su participación en el desarrollo de los viaductos prefabricados.

De igual manera, queremos dar nuestro agradecimiento a Calter Ingeniería por su desarrollo del cálculo de los viaductos de velas.

Referencias

[1] Sánchez Jiménez J.L., Cea F., Guiding Axes on Conceptual Design and their Application to High Speed Railway Viaducts,

Proceedings of the International fib Symposium on Conceptual Design of Structures.