

Diseño de subestructura de los Viaductos para la L.A.V. Murcia-Almería. Tramo: Lorca-Pulpí

Substructure design of Viaducts for the Murcia-Almería High-Speed Railway. Segment: Lorca-Pulpí

Héctor Bernardo Gutiérrez^a, Luis Cristóbal Álvarez^b, Pablo Loscos Areoso^c, Juan José Sánchez Ramírez^d, Pablo Raúl García Carromero^e, David Higuera Mora^f

^aDr Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Pontem Engineering Services S.L. Director de Operaciones. hbernardo@pontem.es

^bIngeniero Civil. Pontem Engineering Services S.L. Ingeniero de Proyecto. lcristobal@pontem.es

^cIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. Ferrovial Construcción. Coordinador Proyectos de Estructuras. ploscos@ferrovial.com

^dIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. Ferrovial Construcción. Jefe Departamento de Estructuras. i.j.sanchez@ferrovial.com

^eIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. Acciona infraestructuras. Jefe de Oficina Técnica. prgarcia@acciona.com

^fIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. Acciona infraestructuras. Jefe de Producción de Estructuras.

david.higuera.mora@acciona.com

RESUMEN

Este trabajo trata el diseño de la subestructura de seis viaductos de la L.A.V. Murcia-Almería en el tramo Lorca-Pulpí. Los viaductos, hiperestáticos de doble viga artesa, tienen luces entre 25 y 40 m, con longitudes totales de 72 a 376 m. La acción sísmica presenta aceleraciones básicas de 0,13 g (Pulpí) y 0,14 g (Lorca), por lo que la estrategia sísmica, ha sido objeto de análisis. La solución elegida es la clásica, donde el punto fijo se ubica en uno de los estribos, anclando el tablero con barras pretensadas, solución que en los viaductos más largos se encontraba al límite de su viabilidad. En el diseño se considera la interacción suelo-estructura, a efectos de optimizar la respuesta sísmica de los viaductos.

ABSTRACT

This work addresses the design of the substructure for six viaducts on the Murcia-Almería High-Speed Rail line, specifically in the Lorca-Pulpí segment. The viaducts, hyperstatic with double box girders, have spans ranging from 25 to 40 m and total lengths between 72 and 376 m. Seismic action is a determining factor in the design, with basic accelerations of 0,13 g (Pulpí) and 0,14 g (Lorca). The fixed point is located at one of the abutments, where the deck is anchored using prestressed bars. The design considers soil-structure interaction to optimize the seismic response of the viaducts.

PALABRAS CLAVE: AVE, viaductos, sismo, prefabricado, artesas, interacción suelo-estructura, pilotes

KEYWORDS: HSR, viaducts, seismic, prefabricated, box girders, soil-structure interaction, piles

1. Introducción

Los viaductos que se presentan a continuación pertenecen a la línea de Alta Velocidad entre Murcia y Almería, en el tramo Lorca – Pulpí. Su denominación es la siguiente:

- Viaducto sobre el Arroyo de los Pelegrines.
- Viaducto sobre la Vereda de los Charcones.
- Viaducto sobre la Rambla de los Charcones.
- Viaducto sobre la Cañada Real de Granada a Cartagena.
- Viaducto sobre la Rambla de Nogalte.
- Viaducto sobre la Rambla de Galián.

Todos los viaductos son de tipología en doble viga artesa con continuidad sobre pilas, y cantos entre 1,90 m y 2,60 m y de luces cortas a moderadas:

Tabla 1. Distribución de luces.

Viaducto	Luces (m)	Luz total (m)
Sobre el Arroyo de los Pelegrines	21 – 30 – 21	72,00
Sobre la Vereda de los Charcones	24 – 32 – 24	80,00
Sobre la Rambla de los Charcones	30,50 – 42 – 30,50	103,00
Sobre la Cañada Real de Granada a Cartagena	25 – 4x31,80 – 29,21 – 27,64	209,50
Sobre la rambla de Nogalte	26,50 – 7x31 – 26,50	270,00
Sobre la Rambla de Galián	28 – 8x40 – 28	376,00

Debido al emplazamiento, la acción sísmica resulta dimensionante, con aceleraciones básicas de 0,13 g (Pulpí) y 0,14 g (Lorca) de acuerdo con la NCSP-07 [1]. Se ha elegido la clásica estrategia sísmica basada en punto fijo en uno de los estribos, al que se ancla el tablero mediante barras pretensadas.

La mayoría de los estribos y pilas están cimentados sobre pilotes de diámetro 1,50 m que

alcanzan hasta 37 m de profundidad y separados 4,50 m. En aquellos casos donde ha sido posible, se han empleado cimentaciones superficiales, llegando a combinarse ambos tipos de cimentación en alguno de los viaductos.

En el diseño se ha estudiado en detalle la interacción suelo–estructura, a efectos de optimizar la respuesta sísmica mediante el uso de muelles elásticos horizontales y verticales que representan la rigidez del terreno circundante, así como la unión tablero-estribo, en aras de optimizar el diseño, que responde a una estrategia sísmica que está en el límite de su viabilidad para los viaductos más largos. En este marco, se han realizado estudios de sensibilidad para todos ellos donde se contempla la posible variación en la rigidez del suelo debido a cargas dinámicas.

2. Descripción general de las estructuras

2.1 Tablero

El tablero está formado por dos vigas artesa pretensadas de canto constante con un intereje de 5,00 m. La altura de las vigas varía entre viaductos. El ancho total del tablero es de 14,00 m, común en la red de ferrocarril de alta velocidad española.

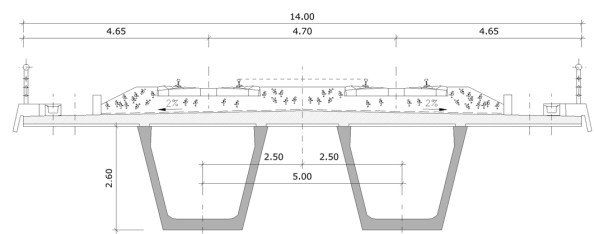


Figura 1. Sección tipo de los tableros

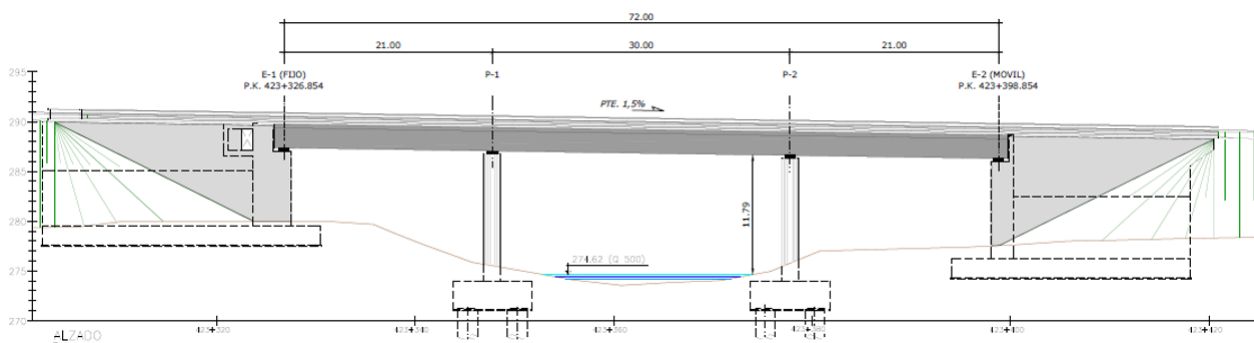


Figura 2. Alzado del Viaducto sobre el Arroyo de los Pelegrines

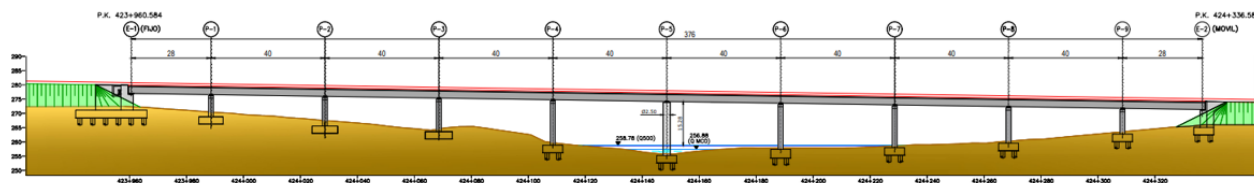


Figura 3. Alzado del Viaducto sobre la Rambla de Galián

La continuidad del tablero sobre las pilas se materializa mediante vigas riostra y pretensado ejecutadas en segunda fase.

2.2 Pilas

Las pilas son macizas de tipo pantalla con sección 7,30 x 1,70 m, con un acabado redondeado de 0,85 m de radio en extremos, a modo de tajamar, para presentar menor oposición al agua en hipótesis de máxima avenida. La sección se mantiene constante en toda la altura. Las alturas varían entre viaductos, desde los 2,40 m en el Viaducto sobre la Cañada

Real de Granada a Cartagena hasta 16,00 m en el Viaducto sobre la Rambla de Galián.

Por limitación hidráulica, en alguno de los viaductos se han diseñado pilas de doble fuste con y sin arriostramiento en coronación, de 2,00 m y 2,50 m de diámetro.

2.3 Estribos

Los estribos son todos de tipo cerrado, muro en vuelta y cimentación profunda, a excepción del Viaducto sobre el Arroyo de los Pelegrines donde la cimentación es superficial. El punto fijo se establece en aquel estribo que presenta las mejores condiciones geotécnicas y se materializa uniendo rigidamente el tablero al

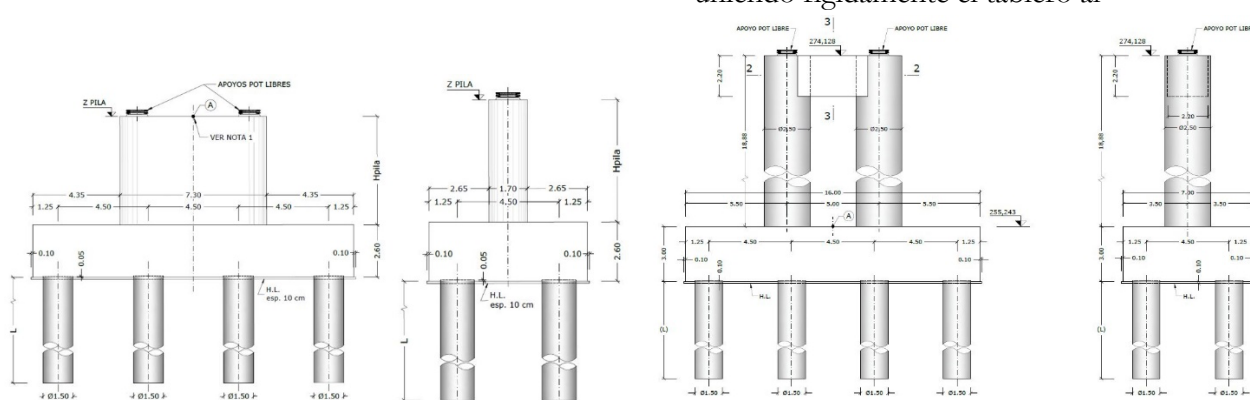


Figura 4. Alzados de pila tipo pantalla y doble fuste con riostra en coronación

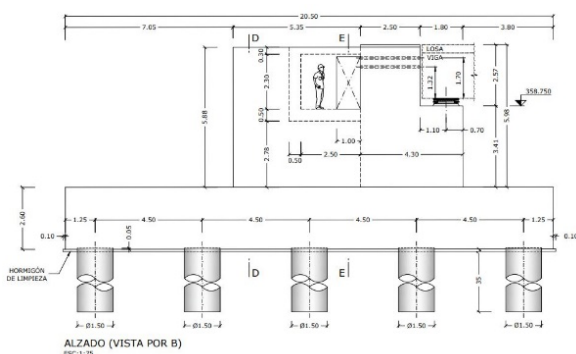


Figura 5. Alzado tipo de estribo fijo

estribo mediante barras pretensadas. Para poder realizar las labores de instalación y mantenimiento es necesario incluir una cámara de tesado, a la que se accede a través de una puerta dejada en uno de los muros en vuelta.

La altura del muro frontal de los estribos varía desde 1,80 m en el Viaducto sobre la Vereda de los Charcones hasta aproximadamente 7,50 m en el Viaducto sobre el Arroyo de los Pelegrines.

Las dimensiones del alzado, así como el número de pilotes a emplear en el estribo fijo depende fundamentalmente de la reacción horizontal longitudinal que se produce en el mismo, la cual aumenta con la longitud del viaducto. El rango de longitudes a partir del cual comienza a ser problemático la ubicación de punto fijo en el estribo es de 400-500 m [2]

El Viaducto sobre la Rambla de Galián, el más largo de todos con 376 m de luz y 48.000 kN de reacción longitudinal máxima, se

aproxima a este límite donde es posible continuar empleando un punto fijo en el estribo o realizar un cambio en la estrategia de diseño, aislando y/o aumentando el amortiguamiento de la estructura [3].

En el proyecto original, donde la sección del tablero es de tipo cajón monocelular, el estribo incluye cuatro amortiguadores viscosos. Con la modificación posterior, y a efecto de evitar el mantenimiento constante que requiere el uso de amortiguadores, se han empleado 8 barras pretensadas de diámetro 75 mm en cada una de las vigas, ocupando el máximo espacio disponible para estas.

En los estribos móviles, tanto el espesor de los elementos como la cantidad y longitud de los pilotes resulta inferior, ya que la magnitud de las solicitaciones es mucho menor en comparación.

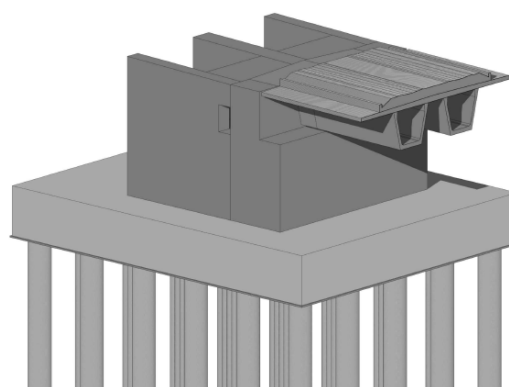


Figura 6. Modelo 3D del estribo fijo con contrafuerte central

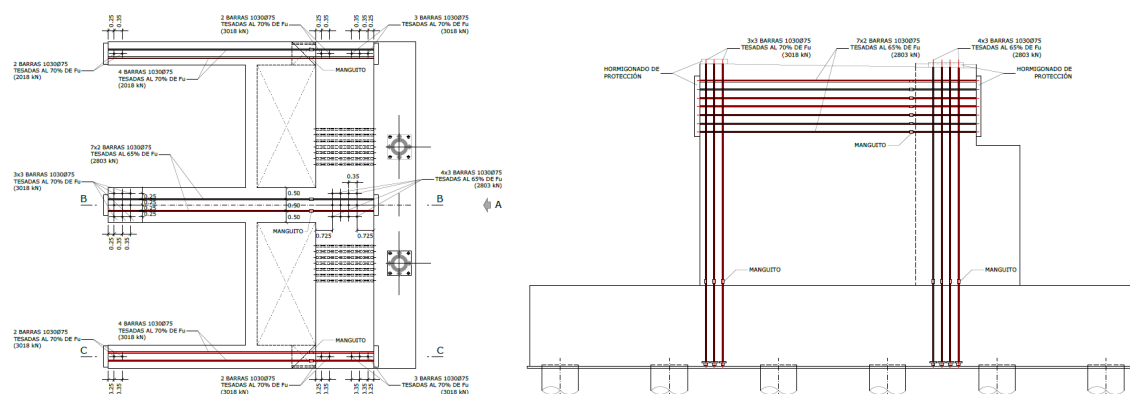


Figura 7. Planta y sección por contrafuerte en estribo fijo del Viaducto sobre la Rambla de Galián

3. Estrategia sismorresistente

3.1 Método de análisis

Como es frecuente en este tipo de estructuras, el método de análisis utilizado es el modal espectral. Se analiza el efecto del sismo último de manera que toda la estructura, tablero, pilas y cimentaciones, se mantenga en rango elástico para el modo de vibración longitudinal, evitando así posibles daños y reparaciones tras el evento sísmico. Para los modos de vibración transversal, se puede emplear ductilidad limitada contando únicamente con la sobrerresistencia de los materiales, adoptando un coeficiente de ductilidad de 1,5 para el momento transversal en pilas. No obstante, no se aplica del lado de la seguridad y para tener en cuenta posibles desviaciones de la acción sísmica, empleándose el espectro elástico. Los pilotes se dimensionan por tanto con un comportamiento esencialmente elástico con objeto de evitar daños en unos elementos de muy difícil inspección y reparación [8].

3.2 Esquema resistente longitudinal y transversal

Debido a que se está en una zona de sismicidad media (0,13g-0,14g de aceleración básica), el sismo resulta dimensionante para la subestructura, y elegir una estrategia sismorresistente adecuada es primordial.

Para viaductos de luces cortas o moderadas, como es el caso, una solución habitual es transferir toda la fuerza sísmica longitudinal a un punto fijo ubicado en uno de los estribos, empleando apoyos POT deslizantes en esta dirección [4]. Este punto fijo se materializa uniendo el tablero al estribo mediante barras o cables pretensados. En este caso se han empleado barras pretensadas. Las cargas que deberá de resistir este punto fijo son: fuerza longitudinal sísmica, arranque y frenado,

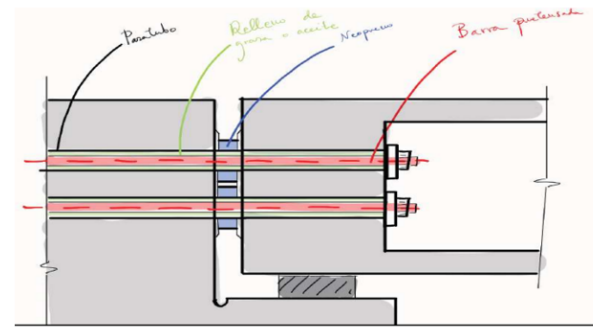


Figura 8. Croquis de punto fijo mediante barras pretensadas y apoyos elastoméricos.

viento longitudinal, cargas térmicas, reológicas y la interacción vía-estructura.

Se incluye en el modelo de cálculo la coacción al giro de eje vertical que existe en el estribo fijo consecuencia de disponer dos grupos de barras en cada viga, obtenida a partir de la rigidez de los apoyos elastoméricos situados en las barras y que influye en la respuesta modal de la estructura.

Para el diseño de las barras se tiene como criterio la ausencia de descompresión cuando el tablero tire de ellas, evitando el riesgo de fatiga y por ende de rotura frágil. Las barras comprimen los clásicos apoyos de neopreno perforados ubicados entre el espaldón y el tablero, que deberán de resistir el empuje del tablero hacia el estribo además de la carga de pretensado. Con estos criterios se determina el área de acero y neopreno necesaria y se dimensionan los elementos. [3]

Para resistir el sismo transversalmente en pilas y estribos, se combinan apoyos POT libres en sentido longitudinal y transversal con apoyos POT guiados en sentido longitudinal, quedando fijo en sentido transversal solo uno de cada par de apoyos. Cuando la carga supera cierto valor se emplean llaves de cortante o “shear keys” en centro de pila/estribo, anclados en la viga riostra. En algunos casos ha sido necesario elevar la posición del shear key para evitar el levantamiento en apoyos.

4. Proceso de cálculo

Para realizar el diseño de la estructura se emplea un modelo global del viaducto mediante elementos finitos compuesto de los siguientes elementos:

- Elementos unidimensionales tipo beam para modelizar las vigas del tablero, pilas y pilotes.
- Elementos bidimensionales tipo Shell para modelizar la losa del tablero.
- Muelles a lo largo del fuste y en punta de pilotes para recoger la interacción suelo – estructura.
- Restricciones cinemáticas para modelizar las coacciones de los apoyos a la superestructura y para modelizar el encepado de los pilotes como elemento rígido.

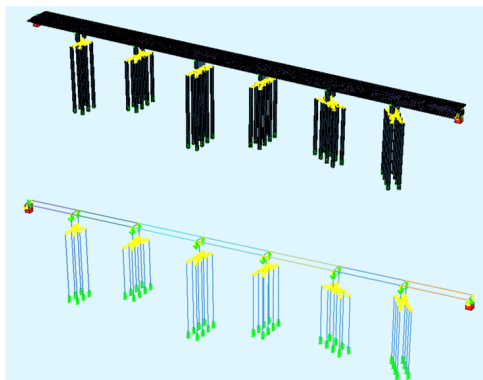


Figura 12. Modelo de cálculo global del Viaducto sobre la Cañada Real de Granada a Cartagena.

Para determinar la distribución y longitud de pilotes se ha seguido un proceso iterativo partiendo de un modelo con base rígida (pilas empotradas en su base). Mediante la hipótesis de encepado rígido y pilotes articulados en cabeza se hace un primer encaje de los pilotes a partir de las reacciones en la base de las pilas empleando una hoja de cálculo. Se actualiza el modelo global con la nueva geometría y se comprueba que no se superan las cargas de hundimiento en ninguno de los pilotes. Si alguna de las pilas no cumple se repite el proceso hasta que converge. Generalmente los resultados que se obtienen

mediante el reparto de cargas con hoja de cálculo son muy similares al obtenido en el modelo global, como cabe esperar. Sin embargo, en situación sísmica resulta más complejo encajar los modelos, ya que la modificación de la cimentación en una pila afecta a la rigidez del conjunto y por consiguiente al reparto de acciones entre pilas, teniendo que realizar varias iteraciones en algunos de los viaductos.

El cuerpo de los estribos se considera infinitamente rígido, bloqueando movimientos verticales y horizontales, así como el giro de eje longitudinal al puente. Se introduce una restricción elástica al giro de eje vertical que tiene en cuenta el giro/momento que se puede producir en el estribo fijo por la disposición de los dos grupos de barras. Además, los viaductos más largos se estudió el efecto que tiene introducir la rigidez longitudinal y transversal de los estribos en el comportamiento de la estructura, resultando en un aumento de la masa movilizadora para el primer modo longitudinal, a su vez compensado con el alargamiento del periodo que disminuye la ordenada espectral, quedando descartado su empleo del lado de la seguridad.

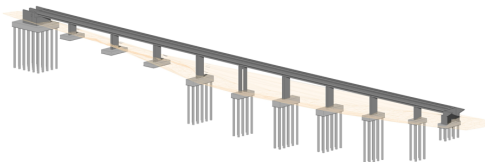


Figura 13. Modelo 3D del Viaducto sobre la Rambla de Galián.

5. Conclusiones

En este artículo se han presentado los criterios de diseño empleados en los viaductos correspondientes al tramo Lorca-Pulpí de la L.A.V. Murcia-Almería, situado en una de las zonas con mayor amenaza sísmica en España.

Se hace una descripción general de las estructuras, haciendo énfasis sus particularidades y se profundiza en aquellas que se consideran importantes, como el empleo del punto fijo en estribos o la consideración de la interacción

suelo-estructura, distinguiendo entre situaciones estáticas y dinámicas.

Si bien el diseño no es en sí novedoso, el de dos de las estructuras más largas se encuentra en el límite de lo razonable para emplear un estribo como punto rígido. Por otro lado, se han realizado estudios de sensibilidad tanto para la interacción terreno estructura como para la distribución de dicha interacción entre fuste y punta de los pilotes. Este hecho, unido a la alta sensibilidad que el reparto transversal de esfuerzos entre pilas presentaba ante la variación de alguno de los parámetros, ha hecho que el número de cálculos hasta llegar a la solución final haya sido bastante elevado en comparación con los que se suelen realizar para este tipo de soluciones.

Agradecimientos

Queremos expresar nuestro agradecimiento a todos aquellos que han participado en este proyecto, tanto de manera directa como indirecta. En particular, agradecemos el trabajo realizado por el departamento de delineación, por la asistencia técnica en validar y mejorar la calidad de los trabajos, así como a la colaboración de otros compañeros, cuyo apoyo ha sido fundamental para el desarrollo de este trabajo.

Referencias

- [1] Subcomisión Permanente de Normas Sismorresistentes, Norma de Construcción Sismorresistente: Puentes (NCSP-07), Ministerio de Fomento, Madrid, 2007.
- [2] G. Ortega, C. Gaite, Á. Martín, J. E. De Vena, Ó. R. Ramos, M. J. Pantaleón. Viaducto del Cortijo de Roperos. Pila Delta como solución para el punto fijo en viaductos en zonas de sismicidad media. VII Congreso de ACHE en A Coruña. 2017.
- [3] F. Millanes, D. Martínez, Jorge Nebreda, Juan Miguel Cereceda. Experiencia Adquirida en el Diseño, Construcción y Control de Ejecución de Viaductos de Alta Velocidad en Zonas Sísmicas. V Congreso de ACHE en Barcelona. 2015.
- [4] J. Casales, R. Rico, S. Couto. Criterios de diseño sísmico en viaductos de alta velocidad en la zona de Levante. Hormigón y Acero. 68, 2017.
- [5] Centro de Publicaciones, Secretaría General Técnica. Guía de Cimentaciones en Obras de Carretera. Ministerio de Fomento, Madrid, 2009.
- [6] C. Oteo. Pilotes de extracción. Jornadas técnicas SEMSIG-AETESS. 1ª Sesión Pilotes para Edificación (Vol. 1). Sociedad española de mecánica del suelo e ingeniería geotécnica y Asociación de empresas de la tecnología del suelo y subsuelo. 2001.
- [7] IREX. Projet national ASIRI. Recommandations pour la conception, le dimensionnement, l'exécution et le contrôle de l'amélioration des sols de fondation par inclusions rigides. Presses des Ponts. France. 2012.
- [8] UNE-EN 1998-2:2012. Eurocódigo 8: Proyecto de estructuras sismorresistentes. Parte 2: Puentes.