

Estudio comparativo de dos sistemas de transmisión de la acción sísmica longitudinal empleados en viaductos ferroviarios: punto fijo y amortiguadores

Comparative Analysis of Two Longitudinal Seismic Load Transmission Systems in Railway Viaducts: Fixed Point and Damping Devices

Alejandro Castillo Linares ^a, Carlos Calleja Vidal ^b

^a Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Departamento de Mecánica de Estructuras e Ingeniería Hidráulica. ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad de Granada (Granada, España). A.C.L. Diseño y Cálculo de Estructuras S.L. (Cádiz, España).

Director Gerente. acastillo@acl-estructuras.com

^b Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. A.C.L. Diseño y Cálculo de Estructuras S.L. (Cádiz, España). Director de proyectos.

ccalleja@acl-estructuras.com

RESUMEN

Se realiza un estudio comparativo de dos de los sistemas de transmisión de la acción sísmica longitudinal empleados habitualmente en viaductos ferroviarios: 1) punto fijo longitudinal mediante pretensado a estribo 2) amortiguadores viscosos. Para dicho estudio se analizan las características de los empleados en varios viaductos de dos tramos del Corredor Mediterráneo: Níjar-Andarax y Pulpi-Vera. En ambos tramos existen viaductos de características similares, habiéndose empleado el sistema de punto fijo en el primer tramo y amortiguadores en el segundo. Se comentan las ventajas e inconvenientes de diversa índole que plantea el empleo de cada uno de los dos sistemas indicados.

ABSTRACT

A comparative study is conducted of the two main systems for transmitting longitudinal seismic action employed in railway viaducts: 1) longitudinal fixed point through abutment prestressing 2) viscous dampers. For this study, the characteristics of those employed in various viaducts of two sections of the Mediterranean Corridor are analyzed: Níjar-Andarax and Pulpi-Vera. In both sections, there are viaducts with similar characteristics, with the fixed point system being used in the first section and dampers in the second. The advantages and disadvantages of various kinds presented by the use of each of the two indicated systems are discussed

PALABRAS CLAVE: amortiguadores, cálculo sísmico, punto fijo, acelerogramas

KEYWORDS: dampers, seismic analysis, fixed points, accelerograms

1. Introducción. Viaductos empleados en el estudio

Los tramos del Corredor Mediterráneo Níjar Andarax y Pulpi Vera, actualmente en construcción, cuentan con un número considerable de viaductos de características similares: viaductos continuos resueltos con viga

artesa prefabricada de hormigón pretensado y losa superior in situ, que albergan plataforma de vía única. En el primero de los tramos, el sistema de fijación del tablero frente a las acciones longitudinales es la unión pretensada a uno de

los estribos (punto fijo). En el segundo tramo, se emplea por el contrario una conexión entre tablero y estribo mediante amortiguadores viscosos.

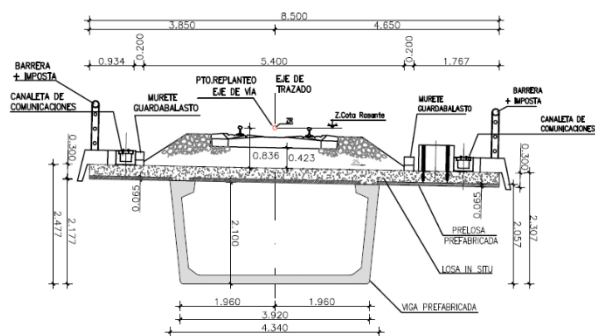


Figura 1. Sección transversal tipo de uno de los viaductos en estudio (K2 Ingeniería)

En ambos tramos existe la misma aceleración sísmica básica, lo que hace posible realizar una comparación entre las principales prestaciones de los dos sistemas de recogida de la acción sísmica indicados. En la tabla siguiente se indican los nombres de los viaductos de cada tramo empleados en el estudio, junto con su longitud total:

Tabla 1. Viaductos en estudio

Nombre	Tramo	Sistema	Longitud (m)
Cesares y Retamar	Níjar	Punto fijo	293
Hoya De La Gitana	Níjar	Punto fijo	286
Arroyo De La Mar	Níjar	Punto fijo	173
Rambla De La Sepultura	Níjar	Punto fijo	560
Higeruelas	Níjar	Punto fijo	297
A7 Y Rambla De Las Ródenas	Níjar	Punto fijo	215
Rambla Del Arca	Níjar	Punto fijo	173
Sobre La A7	Níjar	Punto fijo	420
Viaducto De Burjúlú	Pulpi	Amortiguador	336
Viaducto De Cuevas	Pulpi	Amortiguador	350
Viaducto De Canalejas	Pulpi	Amortiguador	744
Viaducto De Almanzora	Pulpi	Amortiguador	513
Viaducto De Media Legua	Pulpi	Amortiguador	405
Viaducto De Las Gachas	Pulpi	Amortiguador	198

2. Descripción general de los dos sistemas empleados.

2.1 Punto fijo longitudinal

La unión longitudinal entre el tablero y el estribo fijo de los viaductos en estudio del tramo Níjar-Andarax se resuelve mediante la disposición de tendones longitudinales de pretensado, los cuales se anclan el paramento interior de la riostra de apoyo del tablero, así como en la cara posterior del espaldón del estribo. La longitud total de la conexión es en general de unos 12 metros entre placas de anclaje. La capacidad de la conexión varía entre un mínimo de 4 y un máximo de 8 tendones de 27 cables. En todos los casos, la tensión de tesado es de 1395 MPa. En el hueco entre el tablero y el espaldón se disponen neoprenos verticales, cuya composición varía entre 3 apoyos de dimensiones 0.9x0.9 m y 6 apoyos de dimensiones 0.8x0.8m.

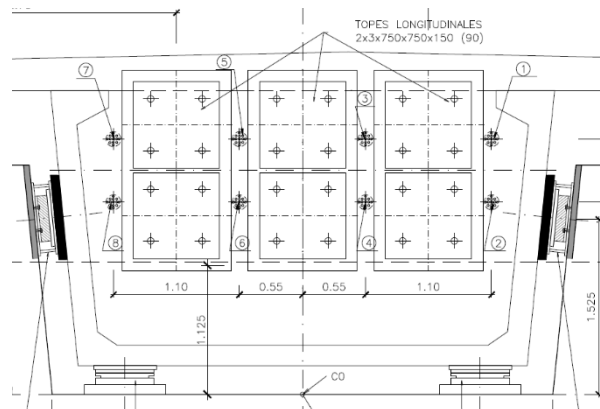


Figura 2. Vista transversal de una de las uniones con punto fijo (Servicios técnicos FCC)

En estos viaductos, existe continuidad de vía en el estribo fijo, mientras que se dispone aparato de dilatación de vía en el estribo móvil.

2.2 Amortiguadores viscosos

La unión longitudinal entre el tablero y el estribo fijo de los viaductos en estudio del tramo Pulpi-Vera se resuelve mediante la disposición de amortiguadores viscosos. Se trata de dispositivos cuya fuerza de reacción depende de su velocidad

de apertura/cierre, según una ley constitutiva del tipo:

$$F = C \cdot v^\alpha$$

con α entre 0.1 y 0.04. Para muy bajas velocidades, como las provenientes de las acciones reológicas o térmicas, la fuerza de reacción es prácticamente nula. Sin embargo, para acciones rápidas por debajo de un umbral, funcionan fundamentalmente como puntos fijos (acciones de frenado o arranque). Por encima del umbral determinado de fuerza (correspondiente a la situación de sismo de T=500 años), se comportan como dispositivos de amortiguamiento viscoso.

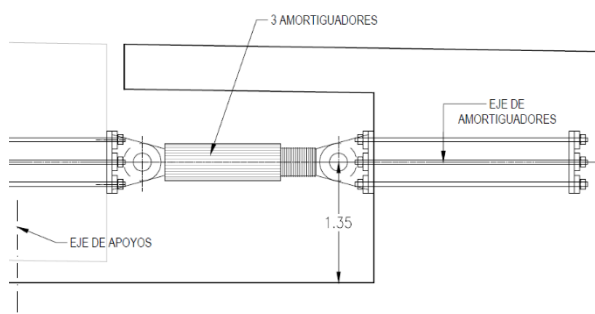


Figura 3. Vista longitudinal de una de las uniones con amortiguadores (Siegrist Ingeniería)

En los viaductos del tramo en estudio, la configuración de la unión varía entre un mínimo de 3 dispositivos de 2800 kN de fuerza máxima, y 5 dispositivos de 5200 kN de fuerza máxima. En todos los casos en estudio, los amortiguadores se disponen en un único estribo. En los viaductos de este tramo se disponen aparatos de dilatación de vía en ambos estribos, así como elementos recentradores en pilas centrales o en el estribo móvil.

3. Estudio comparativo

3.1 Procedimiento de cálculo y dimensionamiento

Existen notables diferencias entre el procedimiento de cálculo y dimensionamiento de la unión longitudinal entre tablero y estribo como puntos fijos, con respecto a la realizada mediante amortiguadores.

3.1.1 Cálculo de uniones con punto fijo

En el caso de la unión con punto fijo se suele admitir un comportamiento elástico lineal del tablero bajo la acción del sismo longitudinal, despreciando el efecto del rozamiento de los apoyos POT. Bajo esa hipótesis, el cálculo de la fuerza sísmica en el punto fijo se determina mediante un análisis modal-espectral. El diseño del pretensado de conexión se realiza para cumplir los requisitos siguientes:

1. La fuerza total de tesado de la unión (descontando pérdidas), debe ser superior a la máxima fuerza de tracción de diseño en situación persistente, incluyendo la acción de frenado/arranque, rozamiento POTs y fuerzas debidas a la interacción vía-estructura.
2. La capacidad total de la unión pretensada (considerando que los tendones trabajan a su límite elástico minorado) debe ser superior a la fuerza máxima de sismo longitudinal, incluyendo si procede la fuerza debidas al rozamiento de los apoyos POT.
3. Los neoprenos que se disponen en el contacto entre el tablero y el estribo se han de dimensionar para resistir la máxima fuerza de compresión transmitida entre estos elementos, más la fuerza de tesado del punto fijo.

3.1.2 Cálculo de uniones con amortiguadores viscosos

En este caso, al ser el comportamiento de los amortiguadores de tipo no lineal, la

determinación de su respuesta frente a la acción sísmica debe realizarse mediante un análisis no lineal paso a paso en el tiempo. La acción sísmica debe representarse mediante acelerogramas equivalentes al espectro de diseño. En el cálculo se debe incluir la rigidez elástica de los elementos de recentrado previsto (pilas con apoyos fijos o de neopreno). También se podría tener en cuenta (aunque no es habitual) el comportamiento no lineal del rozamiento de los apoyos POT. Esta última opción es interesante para comprobar la eficacia del sistema de recentrado al final del evento sísmico.

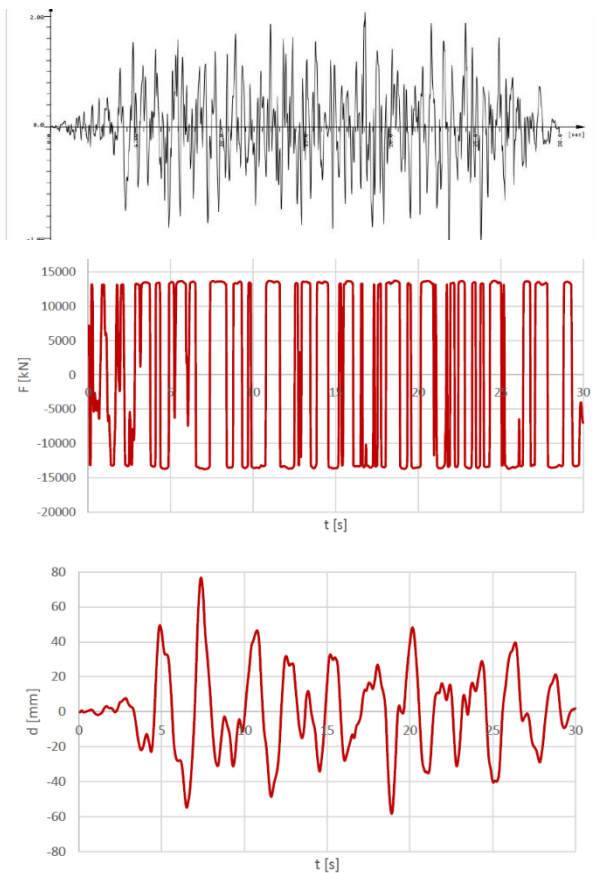


Figura 4. Acelerograma sintético. Fuerza en amortiguador y desplazamientos (Carlos Fernandez Casado)

El dimensionamiento del sistema de amortiguadores debe realizarse de forma iterativa, comprobando en cada caso:

1. El conjunto de amortiguadores es capaz de trabajar en todo momento bajo la acción sísmica sin superar su carga máxima y sin generar unos movimientos de apertura y cierre en los amortiguadores que superen su carrera máxima.
2. El conjunto de amortiguadores debe funcionar eficazmente como punto fijo frente a la acción de frenado y arranque. Para ello deberán cumplirse las limitaciones de los movimientos longitudinales del tablero bajo la acción de frenado y arranque que se establecen en la normativa vigente (30 mm). Para este cálculo, hay que tener en cuenta también el efecto de la flexibilidad elástica de los amortiguadores.
3. La carrera de los amortiguadores debe cubrir los desplazamientos longitudinales en los extremos del tablero generados por las deformaciones por efectos reológicos y térmicos.
4. El sistema de recentrado debe tener capacidad suficiente para minimizar los desplazamientos remanentes del tablero tras el evento sísmico.

3.2 Fuerza longitudinal de sismo transmitida por los punto fijos/amortiguadores

El parámetro principal que define los sistemas de fijación del tablero, es la máxima fuerza longitudinal que se transmite a través de ellos en situación sísmica. Esta fuerza depende de manera fundamental de la longitud de los viaductos. En la gráfica siguiente se representa la máxima fuerza longitudinal en función de la longitud del viaducto, para cada uno de los sistemas en estudio:

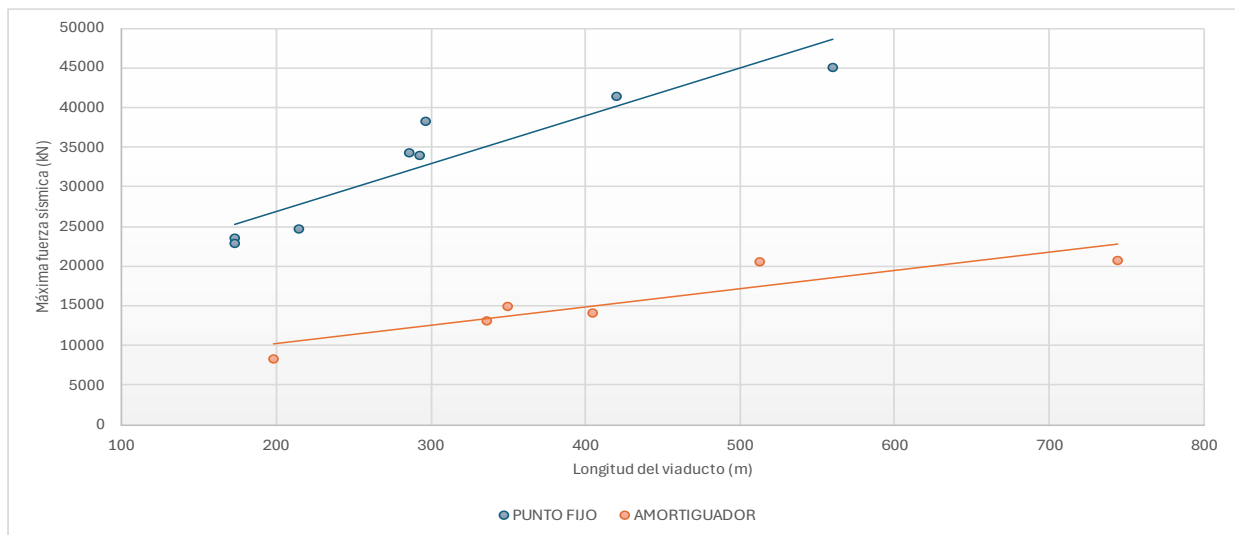


Figura 5. Relación entre la fuerza máxima de sismo y la longitud del viaducto, para cada uno de los dispositivos (elaboración propia)

Se observa que, a igualdad de longitud del viaducto, la fuerza sísmica máxima generada en uniones fijas con pretensado es entre 2.5 y 3 veces superior a la generada en los amortiguadores. Esa relación parece incrementarse con la longitud del viaducto, lo que refleja una eficacia creciente de los dispositivos amortiguadores con la longitud del viaducto.

3.3 Control de desplazamientos longitudinales del tablero en servicio y sismo.

En los viaductos que disponen de punto fijo longitudinal, el control de los desplazamientos en servicio se realiza verificando que la máxima fuerza transmitida en servicio entre el tablero y el estribo (frenado/arranque más rozamiento de los apoyos POT, o sismo frecuente), no supera la fuerza de tesado de la unión. De esa forma, se asegura que no hay despegue entre el tablero y el estribo en servicio.

En los viaductos que disponen de amortiguadores, la ecuación constitutiva que guía su comportamiento (según la ecuación del apartado 2.2) hace que se genere el siguiente comportamiento en relación con las fuerzas y los movimientos longitudinales:

Bajo acciones lentas (reológicas y térmicas) éstos no generan coacción al desplazamiento, por lo que no funcionan como puntos fijos. La posición del centro térmico se sitúa en un punto intermedio del tablero, que depende de la distribución de los apoyos y de los elementos de recentrado dispuestos.

Bajo acciones rápidas (viento longitudinal o frenado), los amortiguadores deben asegurar que la velocidad de reacción sea lo suficientemente baja como para que no se produzcan desplazamientos longitudinales excesivos durante el tiempo estimado que dure dicha acción.

Bajo acciones sísmicas, se supera el rango de fuerzas en las que trabajan como puntos fijos, desarrollándose mayores velocidades de reacción y desplazamientos.

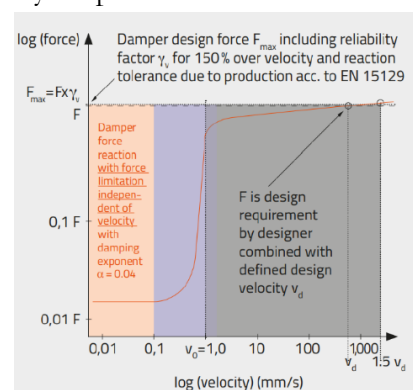


Figura 6. Diagrama fuerza/velocidad tipo de un amortiguador (Maurer)

3.4 Necesidad de aparatos de dilatación de vía

En viaductos con puntos fijos, al no producirse desplazamiento entre el tablero y el estribo fijo, no es necesario disponer aparato de dilatación de vía en ese punto. En el estribo móvil, normalmente será necesario disponer aparato de dilatación de vía, salvo en viaductos de poca longitud (menores de unos 100 m), en los que se puede justificar la disposición de carril continuo mediante la realización de un cálculo de interacción vía-estructura.

En los viaductos con amortiguadores, dado que el centro térmico tiene una posición intermedia, suele ser necesario disponer aparatos de dilatación de vía en ambos estribos. Dichos aparatos deberán ser capaces además de absorber los desplazamientos longitudinales en sismo, generados por los amortiguadores. En el caso de viaductos de muy poca longitud (menos de 100 metros), se ha dispuesto carril continuo en ambos estribos junto con amortiguadores, lo cual implica la realización de la comprobación del carril sobre la estructura en situación de servicio y de sismo frecuente, mediante un análisis de interacción vía-estructura.

3.5 Elementos de recentrado

En viaductos con puntos fijos, al no producirse desplazamiento longitudinal entre el tablero y el estribo fijo en servicio y en sismo, no es necesario disponer elementos que devuelvan al tablero a su posición inicial tras un evento sísmico.

En los viaductos con amortiguadores en estudio, se emplean los siguientes de sistemas de recentrado:

- 1) Neoprenos anclados verticales de conexión entre tablero y estribo: Se emplean en viaductos de poca longitud, y se disponen en el estribo que no cuenta con los amortiguadores. Estos elementos suelen servir también como topes transversales.

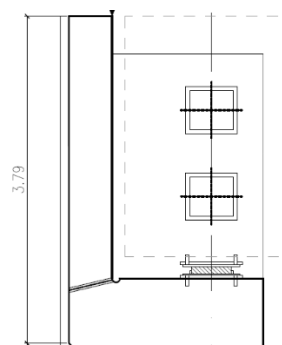


Figura 7. Alzado lateral de estribo como neoprenos de recentrado (Carlos Fernandez Casado)

- 2) Neoprenos anclados verticales en pilas intermedias: Se emplean en viaductos de mayor longitud, y se disponen entre los apoyos POT:

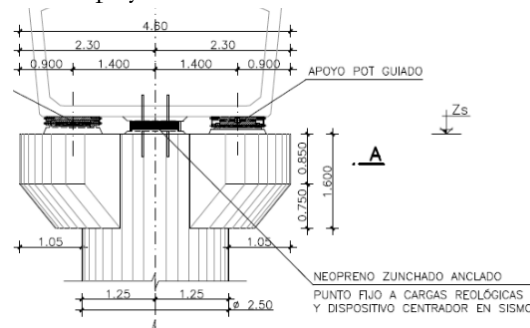


Figura 8. Alzado lateral de estribo como neoprenos de recentrado (Carlos Fernandez Casado)

- 3) Apoyos POT fijos longitudinales en pilas intermedias: Se emplean en viaductos de mayor longitud que disponen de pilas altas con menor rigidez longitudinal.

Los criterios para dimensionar la capacidad del sistema de recentrado recogidos en la normativa en vigor sobre dispositivos de aislamiento sísmico son difíciles de interpretar y aplicar. Para los viaductos en estudio, el criterio más habitual empleado ha consistido en verificar que la rigidez conjunta de los elementos de recentrado sea lo suficiente elevada como para que el desplazamiento longitudinal que iguala la fuerza de reacción elástica del sistema de recentrado con la del rozamiento conjunto de todos los apoyos POT se considere admisible.

3.6 Requisitos particulares de instalación, mantenimiento y sustitución

En viaductos con punto fijo, la conexión pretensada entre el tablero y el estribo necesita una cámara de tesado detrás del espaldón del estribo (ver figura 2). Desde esta cámara se realiza el tesado, y debe ser accesible para mantenimiento y sustitución durante la vida útil de la estructura. Estas operaciones requieren unas dimensiones mínimas de la cámara. Además, para posibilitar la sustitución, es necesario que la inyección de las vainas se realice con grasa, en vez de lechada de cemento. También es necesario que sea visitable el paramento interior de la riostra del estribo, para poder desconectar los elementos de pretensado de sus elementos de anclaje, durante la sustitución.

Un inconveniente de las soluciones con punto fijo es la gran dificultad de sustituir los neoprenos verticales que se han de disponer entre los paramentos verticales de tablero y espaldón de estribo, dado que para acceder a ellos sería necesario desplazar longitudinalmente todo el tablero.

En los viaductos con amortiguador, estos elementos se disponen entre los paramentos de tablero y estribo. Es necesario por tanto que dicho espacio sea grande, entre 2 y 3 metros (ver figura 3), para que entren los amortiguadores. Para puentear dicho espacio, de la parte superior del espaldón parten losas en ménsula que reducen el espacio con el tablero a valores compatibles con las juntas y aparatos de dilatación de vía.

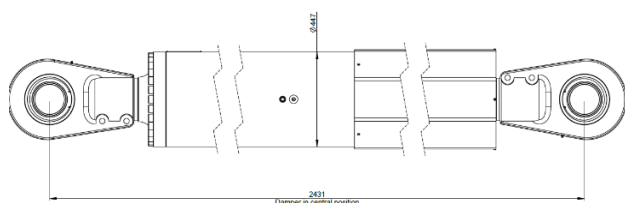


Figura 9. Vista longitudinal de un dispositivo MHD de amortiguación (Maurer)

El hueco entre el tablero y el estribo debe ser visitable, para poder realizar las operaciones de mantenimiento y sustitución.

Los amortiguadores se conectan a tablero y estribo mediante bulones y orejetas metálicas ancladas con pernos al hormigón, los cuales se introducen una longitud importante en el hormigón y disponen en su parte final de una placa de anclaje.



Figura 10. Vista en perspectiva de un elemento de anclaje (Maurer)

Previo a la instalación de los amortiguadores, habitualmente es necesario ajustar su longitud en obra, para que sea acorde con la separación real entre elementos de anclaje. Se suele dejar además un hueco sin hormigonar entre las placas de anclaje y los paramentos de hormigón, para tener cierta holgura que facilite el montaje del conjunto. Posteriormente se rellena dicho hueco con mortero de alta resistencia.

Desde el punto de vista del mantenimiento y sustitución, los amortiguadores presentan ventajas importantes frente a las soluciones de punto fijo, dado que no es necesario acceder al interior del tablero y se prescinde además de emplear los neoprenos verticales que resultan de muy difícil sustitución.

4. Conclusiones

Se ha realizado estudio comparativo de dos de los sistemas de transmisión de la acción sísmica longitudinal empleados habitualmente en viaductos ferroviarios: 1) punto fijo longitudinal mediante pretensado a estribo 2) amortiguadores viscosos. Para dicho estudio se analizan las características de los empleados en varios

viaductos de dos tramos del Corredor Mediterráneo: Níjar-Andarax y Pulpi-Vera. Tras el estudio realizado se concluye que si bien ambos sistemas son adecuados, el empleo de amortiguadores parece presentar importantes ventajas en cuanto a la reducción de la fuerza sísmica longitudinal, así como a las condiciones de mantenimiento y sustitución. La reducción de la fuerza sísmica es un aspecto decisivo cuando se trata de viaductos de longitudes importantes en zonas de moderada o alta sismicidad. El posible inconveniente del empleo de amortiguadores proviene del hecho de que al afectar de manera significativa en el dimensionamiento de la estructura (sobre todo del punto fijo), tienen una repercusión importante en la integridad de la estructura durante un evento sísmico. Ello obliga a un control mas exhaustivo en su diseño, construcción y ensayo, así como en la evolución con el tiempo de sus características, lo cual depende en gran medida de su estado de conservación.

Agradecimientos

Queremos expresar nuestro agradecimiento a todos los proyectistas de las estructuras que se han empleado para este estudio: Servicios técnicos de FCC Construcción, Carlos Fernandez Casado Ingeniería, Siegrist Ingeniería, ATOP Soluciones de Ingeniería, K2 Ingeniería, Servicios técnicos de PACADAR. También a la empresa MAURER, suministradora de los dispositivos amortiguadores.

Referencias

- [1]UNE-EN 15129:2019. Dispositivos antisísmicos. Asociación Española de Normalización
- [2] UNE-EN 1998-1. Eurocódigo 8: Proyecto de estructuras sismorresistentes Parte 1: Reglas generales, acciones sísmicas y reglas para edificación. Asociación Española de Normalización

- [3]UNE-EN 1998-2. Proyecto de estructuras sismorresistentes Parte 2: Puentes. Asociación Española de Normalización
- [4]NCSP-07. Norma de construcción sismorresistente en Puentes. Ministerio de Fomento. 2008
- [5]IAPF-07. Instrucción de Acciones a considerar en Puentes de Ferrocarril. Ministerio de Fomento. 2010