

Acondicionamiento sísmico de puentes convencionales

Seismic conditioning on conventional bridges

José Ramón Arroyo Arroyo^a, Eduardo Díaz-Pavón Cuaresma^b, Francisco Javier Pérez Jiménez^c, Miguel Ángel Liébana Ramos^d

^aIngeniero Industrial. INTEMAC. Departamento de Estructuras Especiales. jrarroyo@intemac.es

^aIndustrial Engineer. INTEMAC. Department of Special Structures

^bDr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. INTEMAC. Director del Área de Evaluación y Patología de Estructuras
ediazpavon@intemac.es

^bPhD in Civil Engineer. INTEMAC. Director of the Area of Evaluation and Pathology of Structures

^cDr. Arquitecto. INTEMAC. Departamento de Estructuras Especiales. fperez@intemac.es

^cPhD Architect. INTEMAC. Department of Special Structures

^dIngeniero Industrial. INTEMAC. Jefe del Departamento de Estructuras Especiales. maliebana@intemac.es

^dIndustrial Engineer. INTEMAC. Head of the Department of Special Structures

RESUMEN

Los puentes de tableros de vigas doble T prefabricadas de hormigón pretensado son una tipología muy común en las carreteras para luces cortas y medias. En las zonas en las que hay que considerar las acciones sísmicas, se presentan problemas técnicos que complican el proyecto para transferir las importantes acciones horizontales que se generan a nivel de la losa superior hasta la cimentación de forma segura. Las soluciones necesarias, ya complejas a nivel de proyecto, plantean aún mayores condicionantes cuando de lo que se trata es de acondicionar una estructura existente a la normativa actual. En el artículo se evalúan los condicionantes y se aportan soluciones que mejoran su comportamiento a sismo.

ABSTRACT

The bridges of precast concrete prestressed beams, of shape double T are a common type in roads in the case of short and medium spans. When it is necessary to consider seismic actions there are technical problems which make the project more complicated due to the necessity to transfer the important horizontal forces which are at the slab level to the foundation in a safe way.

The solutions, complex at the project level, pose even greater constraints when it comes to adapting an existing structure to current regulations. The article evaluates these conditions and provides some solutions to improve the seismic behavior of this type of bridge decks.

PALABRAS CLAVE: sismo, puente, aislamiento, riostra, neopreno

KEYWORDS: earthquake, bridge, isolation, bracing, elastomer

1. Planteamiento general

La disposición de puentes de tableros de vigas doble T prefabricadas (que denominamos

convencionales) en zonas sísmicas, demanda el planteamiento de soluciones que resuelvan la

trayectoria de las cargas hasta la cimentación, compatibles con el carácter prefabricado de las vigas.

Algunos condicionantes del problema son los siguientes:

- Crear una trayectoria clara de las acciones horizontales que se generan principalmente a nivel de la losa superior hasta la cimentación (figura 1). El aspecto más crítico puede ser evitar el colapso de las almas al estar sometidas a las cargas horizontales desde la losa superior que han de llegar hasta la zona de apoyo del ala inferior de la viga en el aparato de apoyo.
- El dimensionamiento de las entregas de las vigas en los apoyos que evite el descalce durante el sismo.
- Lograr un comportamiento dúctil de la subestructura que reduzca la acción sísmica en el tablero.
- Conseguir aislamiento sísmico del tablero con la finalidad también de reducir las acciones sísmicas sobre los apoyos y la subestructura.

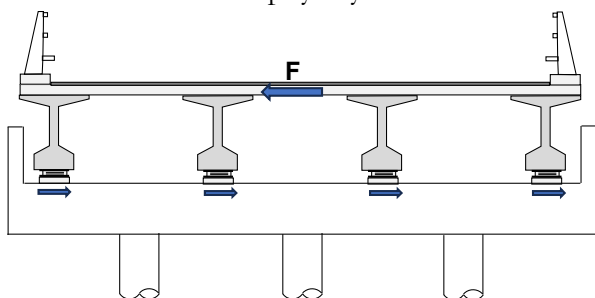


Figura 1. Transferencia de cargas desde la losa superior hasta los apoyos.

A partir de estos condicionantes técnicos, se podrían plantear, en principio, soluciones que permitieran acondicionar el comportamiento sísmico de este tipo de tableros a la normativa actual.

Sin embargo, la cuantificación de dichas problemáticas hace que las soluciones no sean en la práctica viables, y que se opte por soluciones “parciales” que en apariencia podrían mejorar la situación pero que, en los casos en que realmente ocurrió un terremoto de cierta magnitud, se mostraron totalmente ineficaces. Así ocurrió tras los terremotos de Chile de 2010, de los cuales se

muestran a continuación algunos ejemplos para, seguidamente, concretar las dificultades para solucionar los condicionantes antes mencionados en el acondicionamiento de puentes de vigas existentes. Finalmente, a partir de los resultados de un ejemplo concreto, se plantean algunas soluciones que, aunque complejas, podrían solucionar el problema en algunos casos.

2. Lecciones de terremotos pasados

En el terremoto de Chile de febrero de 2010 se observaron numerosos fallos de puentes de vigas prefabricadas doble T (figura 2), destacando los siguientes tipos de fallo:

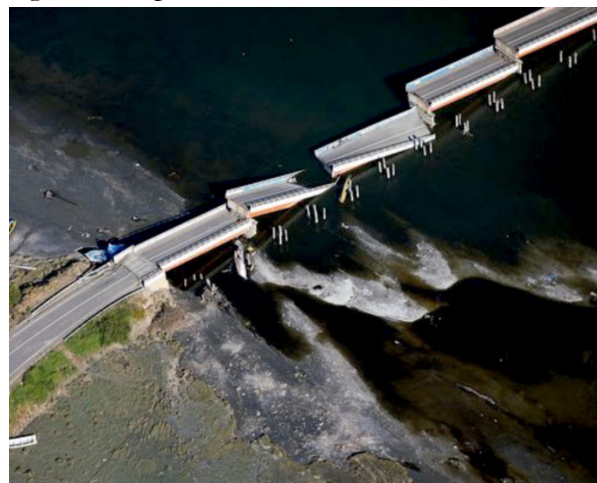


Figura 2. Colapso del puente sobre el río Tubul, Chile, terremoto de Concepción -27 de febrero de 2010- (Nicolás Piwonka, National Geographic).[1]

- Falta de arriostramiento de los extremos de las vigas que impidiera el desplazamiento del tablero (figura 3).



Figura 3. Falta de arriostramiento eficaz de los extremos de las vigas [2].

- Disposición de topes sísmicos en las alas inferiores, sin existir vigas riostras,

produciendo fallos de las almas de las vigas localmente por flexión transversal (figura 4).



Figura 4. Fallo del alma de una viga por ausencia de diafragmas (terremoto de Concepción -27 de febrero de 2010-) [1]

- Longitud de entrega insuficiente de las vigas en estribos y pilas, por lo que se producía el descalce de estas (figura 5).

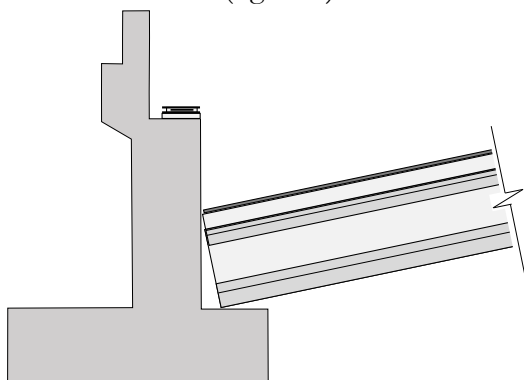


Figura 5. Longitud de entrega insuficiente en el estribo.

Dichos fallos, así como la propia configuración de muchos puentes que encontramos en nuestras carreteras incluso en zonas donde la acción del sismo es significativa (muchos de ellos carecen de vigas de arriostramiento), ponen de manifiesto defectos de configuración de muchos de estos puentes, la mayoría de ellos ya proyectados estando vigentes normas sísmicas análogas a las vigentes en la actualidad, evidenciando que en esos casos dichas acciones, simplemente, no fueron contempladas en el diseño.

3 Acondicionamiento de puentes existentes

Las experiencias mostradas en el apartado anterior evidencian la preocupación de muchas Administraciones de acondicionar, en la medida de lo posible, la configuración de este tipo de puentes a la normativa actual.

En España, sería de aplicación la parte 2 del Eurocódigo 8 UNE-EN 1998-2:2018 [3], acorde a la OC 1/2019 [4]. No obstante, cuando la intervención en un puente convencional es debida a una intervención parcial, por ejemplo, una reparación del tablero, se puede considerar tal reparación no como un proyecto nuevo del puente, ya que no se interviene en la subestructura, sino que se orienta la intervención para mantener el nivel de seguridad del proyecto original, ya que su acondicionamiento completo a la normativa actual supondría adaptar también los apoyos y la subestructura a la nueva normativa sísmica y requiere solucionar los problemas descritos anteriormente.

Este acondicionamiento plantea en todo caso enfrentar los problemas expuestos a estructuras en las que posiblemente la acción sísmica no se haya considerado en su proyecto original con las exigencias que demanda la normativa actual, por lo que los problemas a enfrentarse surgen de los siguientes aspectos:

- La acción sísmica considerada en proyecto fue significativamente inferior a la recogida en UNE-EN 1998-2:2018. Téngase en cuenta que la actualización de mapas de peligrosidad sísmica de España realizada en 2012 [5], ha incrementado la acción sísmica respecto a la que figura en la NCSP-07 [6].
Por lo tanto, la subestructura y los aparatos de apoyo fueron dimensionados para acciones sísmicas en algunos casos muy inferiores a los que exige la normativa actual.
- Lo anterior hace que la aplicación de aislamiento sísmico mediante la disposición de aparatos de apoyo elastoméricos sencillos de bajo amortiguamiento podría en principio

valorarse como una solución al problema. Sin embargo, surgen otros que lo complican. El más inmediato es la necesidad de anclar los aparatos de apoyo, ya que la norma UNE-EN 1337-1 *Apoyos estructurales. Parte 1: reglas generales de diseño* [7], prescribe que bajo solicitaciones dinámicas como en los casos de sismo las cargas horizontales no deben ser absorbidas por rozamiento, por lo que si tenemos en cuenta la necesidad de sustitución de los aparatos de apoyo esto implica que hay que disponer placas metálicas en los dos extremos del aparato de apoyo, en la viga y el estribo o pila lo que supone mayores espacios a los disponibles en dinteles y estribos existentes. Además, la magnitud de las cargas a anclar es, como se verá en el ejemplo, muy significativa, lo que hace que las soluciones “a posteriori” sean en general muy complejas e incluso inviables en la práctica.

- Adicional a la alternativa de aislamiento, cabe la posibilidad de rigidizar el tablero para evitar el colapso de las almas que indicábamos en el primer punto del apartado anterior.

En este sentido, en la figura 6 se muestra una propuesta de solución con angulares y chapas de acero para el arriostramiento de vigas doble T con el fin de evitar solicitar a flexión transversal las almas de dichas vigas. Esta solución induce esfuerzos pequeños en el arriostramiento por los giros diferenciales de las vigas adyacentes. Dependiendo de las características del tablero, puede ser necesario disponer diagonales en más de un intereje y un cordón superior también de doble angular. Otra solución es ejecutar una viga riostra de hormigón armado atando las cabezas de las vigas, como se hizo en el puente que se muestra en la figura 8. Aparte de los condicionantes de armado (el anclaje de los tirantes, unido a la necesidad de darles continuidad a través del alma de las vigas, implica el uso de barras roscadas pretensadas). En la figura 9 se muestra el

modelo resistente de la viga riostra de hormigón armado.

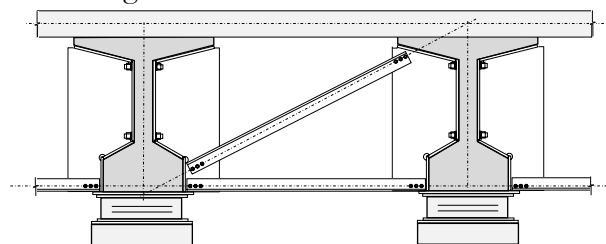


Figura 6. Arriostramiento metálico de almas de vigas.



Figura 7. Viga riostra de hormigón armado.

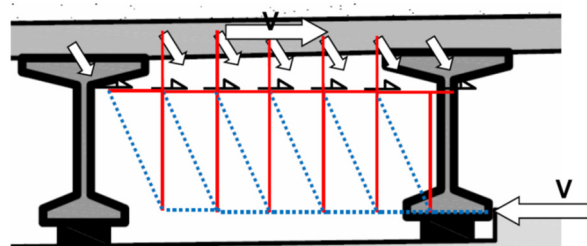


Figura 8. Modelo resistente de riostra de hormigón armado.

No obstante, el arriostramiento de las almas de las vigas en los apoyos hace necesario disponer topes sísmicos en las alas inferiores de las vigas que trasladen la carga del tablero a las pilas y/o estribos.

Este anclaje de los topes a las pilas y/o estribos puede ser condicionante por los motivos expuestos anteriormente (complejidad de la ejecución “a posteriori” de estos elementos, tanto por el espacio que requieren como por la magnitud de las cargas a transmitir), como se verá en el ejemplo que se expone más adelante

- En puentes esviados aparecen esfuerzos en el arriostramiento por las cargas gravitatorias que pueden generar pequeños momentos

flectores negativos en los extremos de las vigas (figura 9).

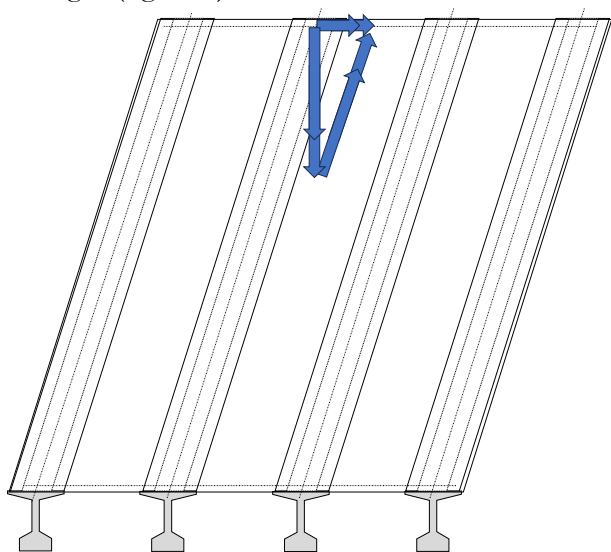


Figura 9. Esfuerzos extremos en puentes esviados.

- En la comprobación de las juntas de dilatación extremas con los muretes de respaldo suele haber problemas cuando el tablero es largo por una serie de vanos consecutivos y si además es esviado se produce una amplificación importante de los desplazamientos en las esquinas del tablero debido a la torsión por la excentricidad longitudinal.
- Igualmente hay que comprobar que las entregas existentes en los apoyos son suficientes, acorde a la UNE-EN 1998-2:2018, en las que puede ser nuevamente necesario recrecerlas (figura 10).

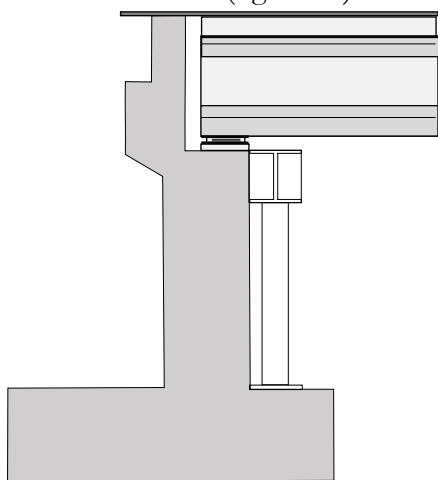


Figura 10. Ampliación de la entrega en el estribo.

4. Acondicionamiento de puentes con aislamiento sísmico

Una solución para reducir la acción sísmica a transmitir a pilas y estribos en puentes de vigas doble T prefabricadas de hormigón pretensado rigidizados mediante vigas riostras es la disposición de apoyos elastoméricos sencillos de bajo amortiguamiento, aunque deben cumplir ciertas condiciones.

Como referencia la UNE-EN 1998-2:2018 (4.2.2.2 (1) (a) y (b)) establece límites para poder aplicar el método del modo fundamental:

- En la dirección longitudinal de los puentes aproximadamente rectos con tablero continuo, cuando las fuerzas sísmicas se resisten mediante pilas, su masa total debe ser menor del 20% de la masa total del tablero.
- En la dirección transversal del caso (a), el sistema estructural debe ser aproximadamente simétrico con respecto al centro del tablero. Para ello, la excentricidad teórica, e_0 , entre el centro de rigidez de los elementos de sustentación y el centro de gravedad del tablero no superará el 5% de la longitud del tablero.

En el punto (1)P del apartado 7.5.3 la UNE-EN 1998-2:2018 indica también las siguientes condiciones específicas para su aplicación en el análisis de puentes con aislamiento sísmico:

- La distancia entre el emplazamiento del puente y la falla conocida más cercana, sísmicamente activa, supera los 10 km.
- Las condiciones del suelo del emplazamiento se corresponden con uno de los tipos de terreno A, B, C o E del apartado 3.1.1 de la norma EN 1998-1:2004.
- El índice del amortiguamiento eficaz no supera 0.30.

La UNE-EN 1998-2:2018 (en adelante EN 1998-2) exige que se utilice el modelo de tablero rígido en el análisis espectral basado en el modo fundamental. Incluso en el punto (5) de su

apartado 7.5.4 aporta las expresiones para determinar los efectos de la acción sísmica sobre el sistema de aislamiento y las subestructuras en la dirección transversal principal.

En algún caso resuelto con este sistema de aislamiento sísmico se pueden obtener reducciones de la acción sísmica horizontal del 40 %.

La EN 1998-2 también exige la realización de dos análisis, uno utilizando las propiedades UBDP (propiedades de cálculo límite superiores) que conduce a las máximas fuerzas en la subestructura y otro utilizando las propiedades LBDP (propiedades de cálculo límite inferiores) que conduce a los máximos desplazamientos del sistema de aislamiento y del tablero.

La solución de tableros con aislamiento sísmico permite mantener sin daños la estructura en estados límite últimos. Para ello, la EN 1998-2 admite que para la subestructura y superestructura se considere ductilidad limitada ($q < 1.5$), con salvedades para evitar los fallos frágiles y comprobando la necesidad de armadura de confinamiento o de arriostramiento de barras longitudinales comprimidas, y manteniendo $q = 1$ para el cálculo de la cimentación.

El esfuerzo cortante que atraviesa el sistema de aislamiento es producido por la masa de la superestructura.

De acuerdo con la terminología de la norma EN 1337-3:2005 [8] los aparatos de apoyo a utilizar en estas soluciones deberán ser tipo C (figura 11): apoyo laminado con placas de acero extremas (encastrado o que permite la fijación).

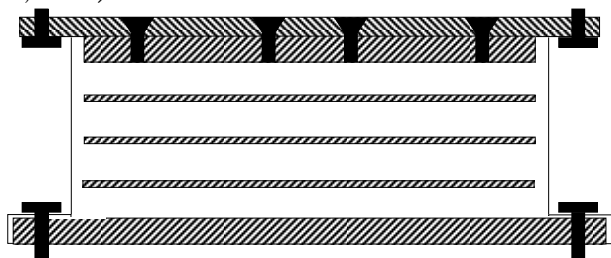


Figura 11. Apoyo elastomérico tipo C

Para los aisladores que sean apoyos elastoméricos sencillos de bajo amortiguamiento que cumplan con la norma EN 1337-3:2005 no se les exige ensayos de cualificación, aunque el fabricante debe garantizar las características de los apoyos.

5. Ejemplo

Supongamos un tablero recto con la sección transversal de la figura 1, de un solo vano, apoyado en estribos y con las siguientes características:

- Longitud total..... 29 m
- Luz de cálculo 28 m
- Ancho total del tablero 14.9 m
- Ancho total de la plataforma .. 13.8 m
- Canto de las vigas 1.50 m
- Canto de la losa..... 0.40 m
- Intereje de vigas 4.50 m
- Peso de pretilas 250 kg/m
- Peso superior del pavimento .. 207 kg/m²

Dimensionado con la Instrucción IAP-11 [9], la acción sísmica del puente es:

- $a_{g,R}$ 0.10 g
- γ_I 1.30
- Terreno tipo C
- Coeficiente de contribución ... 1.10

Obsérvese cómo el intereje entre vigas (y en consecuencia el espesor de la losa), son significativos, ya que se han fijado de cara a asegurar unas cargas mínimas en los apoyos que permitan cumplir con las especificaciones de la normativa actual.

Con estas consideraciones, la masa total del tablero es de 735 t y se han estimado unos aparatos de apoyo de neopreno zunchado de 400 x 500 x 121 (en milímetros).

Para la masa y los aparatos de apoyo indicados se ha obtenido un valor del periodo $T = 1.359$ s.

En la figura 12 se muestra el espectro de aceleraciones horizontales del emplazamiento, en el que se ha indicado la aceleración del tablero para el periodo obtenido.

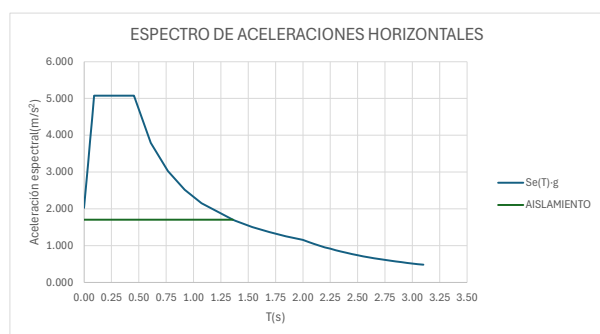


Figura 12. Espectro de aceleraciones horizontales

Frente a la solución de topes sísmicos (que implicaría que el tablero se moviera solidariamente a estos, y por tanto con periodo $T=0$ s), se observa que se produce cierta reducción de aceleración en el tablero por el aislamiento sísmico introducida mediante los aparatos de apoyo (16%).

Este dimensionamiento de los aparatos de apoyo se ha realizado acorde a la EN 1337-3 y a la EN 1998-2. Esta última prescribe que se utilicen, como ya se ha comentado, las propiedades de cálculo límite superiores de los aparatos de apoyo, que tienen en cuenta el aumento de su rigidez debido al envejecimiento y a las bajas temperaturas. En concreto se ha considerado $G_{b,max} = 1.2 \times 1.1 \times 0.9 = 1.188$ MPa. Nótese en todo caso que la fuerza horizontal a resistir por el sistema de arriostramiento en cada estribo obtenida es de 625 kN, muy significativa incluso para el caso del ejemplo, en el que la aceleración sísmica es relativamente pequeña.

La situación en el caso de acondicionamiento de un puente existente sería todavía más complicada, ya que, por ejemplo, la distribución de vigas y configuración de la losa ya condicionan las cargas en los apoyos (haciendo que puedan no cumplirse las especificaciones normativas) y exigiendo transmitir cargas a los estribos que, incluso disponiendo de aislamiento, son muy importantes. Téngase en cuenta que la ejecución de anclajes a posteriori implica la ejecución de perforaciones y disposición de barras ancladas, que para un caso como el del ejemplo, y admitiendo una solución “convencional” mediante vigas de arriostramiento y topes sísmicos, resultaría del

orden de $16\phi 12$ por tope -recuérdese la obligatoriedad de que cada tope sea por sí sólo capaz de resistir toda la fuerza transversal del tablero en su línea de apoyo-. Aun disponiéndose del aislamiento, las cargas a anclar son también muy significativas, y las soluciones de anclaje tanto a la viga como a las pilas o estribos pueden requerir soluciones que implican mucho espacio y que son de ejecución compleja.

6. Conclusiones

En los apartados anteriores se han expuesto los aspectos que influyen de manera importante en el acondicionamiento sísmico de puentes de carretera de tablero de vigas de sección doble T prefabricadas pretensadas, que podemos considerar como convencionales. Los más relevantes son:

- Cuando se trata de acondicionar frente a sismo puentes existentes a la normativa actual, se presentan problemas técnicos que complican la solución, relacionados principalmente con tener que resistir acciones sísmicas más grandes que las que sirvieron para el proyecto original, si bien en muchas ocasiones la problemática puede ser todavía mayor: la propia configuración de muchos puentes pone de manifiesto que no han sido diseñados teniendo en cuenta ningún tipo de acción sísmica.
- Uno de los problemas principales que presentan este tipo de puentes de vigas es la necesidad de dotar a los extremos de las estas de un arriostramiento eficaz que transmita las cargas sísmicas desde la losa superior hasta los apoyos sin hacer trabajar a las zonas extremas de las almas de las vigas a flexión transversal.

Estos arriostramientos pueden ejecutarse mediante estructura metálica o riostras de hormigón armado, con algunos condicionantes que se han expuesto en los apartados anteriores. Uno de ellos es que deben trasladarse las acciones horizontales a

la cabeza de las pilas y/o estribos, lo que exige la ejecución de anclajes que suelen ser inviables en la práctica.

- Como solución para reducir las acciones a transmitir a las pilas y estribos se podría plantear la sustitución de los apoyos y dimensionar los nuevos como aislamiento sísmico. Para ello pueden disponerse aparatos de apoyo de neopreno zunchado, solución que pueden producir reducciones en las acciones sísmicas hasta de un 40%, lo que combinado con la ejecución de las vigas riostras referidas en el punto anterior, podría ser la única solución realmente viable a efectos prácticos, si bien pueden exigir un incremento significativo de las superficies de apoyo de dichos aparatos (aparte de otras actuaciones, como la necesidad de anclar los nuevos apoyos a las vigas y soportes).

Referencias

- [1] Ministerio de Fomento (2019), *Guía para el proyecto sísmico de puentes de carretera*.
- [2] Martínez Grosser, A. B. (2015), *Efecto de las barras sísmicas en el comportamiento sísmico transversal de puentes de hormigón armado*, Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias de Ingeniería, Santiago de Chile.
- [3] Comité Europeo de Normalización (2011), *Eurocódigo 8: Proyecto de estructuras sísmoresistentes. Parte 2: Puentes* (UNE-EN 1998-2), Madrid, Asociación Española de Normalización.
- [4] Ministerio de Fomento (2019) *Orden circular 1/2019 sobre la aplicación de los eurocódigos a los proyectos de carreteras*, Madrid.
- [5] Ministerio de Fomento (2012), *Actualización de mapas de peligrosidad sísmica de España*, Instituto Geográfico Nacional.
- [6] Ministerio de Fomento (2012), *Norma de construcción sísmoresistente: Puentes* (NCSP-07), Madrid.
- [7] Comité Europeo de Normalización (2001), *Apoyos estructurales. Parte 1: Reglas generales de diseño* (UNE-EN 1337-1), Madrid, Asociación Española de Normalización.
- [8] Comité Europeo de Normalización (2005), *Apoyos estructurales. Parte 3: Apoyos elastoméricos* (UNE-EN 1337-3), Madrid, Asociación Española de Normalización.
- [9] Ministerio de Fomento (2012), *Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera* (IAP-11), Madrid.
- [10] Comité Europeo de Normalización (2013), *Eurocódigo 8: Proyecto de estructuras sísmoresistentes. Parte 1: Reglas generales, acciones sísmicas y reglas para edificación* (UNE-EN 1998-1), Madrid, Asociación Española de Normalización.
- [11] E, Alarcón Álvarez, R, Álvarez Cabal, M S, Gómez Lera (1986), *Cálculo matricial de estructuras*.
- [12] R W, Clough, J, Penzien, (1993). *Dynamics of structures*. Second edition.