

Guía para el proyecto sísmico de puentes de carretera con Eurocódigo 8 – Algunos aspectos relevantes

Seismic design guide for road bridges according to Eurocode 8 – Discussion of some relevant aspects

Alejandro Pérez Caldentey^{*, a}, Hugo Corres Peiretti^b, Pilar Crespo Rodríguez^c,

Carlos Paradela Sánchez^d

^a Profesor Titular. Universidad Politécnica de Madrid. Director de FHECOR North America

^b Catedrático. Universidad Politécnica de Madrid.

^c Ingeniero de Caminos del Estado. Jefe del Área de Estructuras. Dirección General de Carreteras. Ministerio de Fomento.

^d Ingeniero de Caminos del Estado. Jefe de Servicio de Puentes y Estructuras. Dirección General de Carreteras. Ministerio de Fomento.

RESUMEN

Este trabajo presenta algunos de los aspectos más significativos de la *Guía para el proyecto de puentes de carretera con Eurocódigo 8*, desarrollada por FHECOR Ingenieros Consultores para la Dirección General de Carreteras, en el marco de la *Serie Guías Eurocódigos* cuyo objetivo principal es la difusión de los Eurocódigos en la práctica profesional española, con objeto de fomentar la competitividad de las empresas en el ámbito internacional. La guía tiene un planteamiento general que abarca el comportamiento sísmico a nivel conceptual, los criterios que define el Eurocódigo, la concepción estructural de puentes en zona sísmica así como una serie de ejemplos desarrollados con un alto grado de detalle.

ABSTRACT

This paper presents some of the more relevant content of the Seismic Design Guide for Road Bridges according to Eurocode 8, developed by FHECOR Consulting Engineers for the Roads Department of the Spanish Ministry of Public Works, within a series of Guides for the Application of the Eurocodes to Road Bridges meant to improve the competitiveness of the Spanish consultants in the international market by improving understanding of the Eurocode Series by Spanish Designers. The guide presents a broad outlook of the problem dealing with seismic behaviour at a conceptual level, with specific Eurocode 8 rules as well as conceptual design of bridges in seismic areas and presents a series of fully developed application examples.

PALABRAS CLAVE: Eurocódigo 8, concepción, comportamiento sísmico, ejemplos

KEYWORDS: Eurocode 8, conceptual design, seismic behaviour, design examples

1. Introducción

El Ministerio de Fomento ha publicado una serie de Guías de aplicación de los Eurocódigos estructurales para el proyecto de puentes. En la redacción de la “Guía para el proyecto sísmico de puentes de carretera con Eurocódigo 8” [1] ha colaborado FHECOR Ingenieros Consultores.

La serie de guías viene motivada por la necesidad de difundir los Eurocódigos en España, algo imprescindible para la competitividad de nuestras empresas dado el nivel de internacionalización cada vez más avanzado de nuestra economía y en particular del sector de la construcción. En lo referente al sismo, la guía pretende, también, contribuir a paliar una de las deficiencias en la formación de los Ingenieros de Caminos, donde en las Escuelas principales, tradicionalmente, se ha puesto poco énfasis en el proyecto sismorresistente, dificultando nuestra competitividad en países de alto riesgo sísmico.

Por ello, la guía empieza con una introducción a la ingeniería sísmica de puentes donde se repasan los principales conceptos incluyendo la naturaleza y métodos de representación de la acción sísmica, el comportamiento sísmico de los puentes y los métodos de análisis con los que se enfrenta el proyecto. En una segunda parte, se pasa a describir y explicar los criterios establecidos en el Eurocódigo 8 (fundamentalmente en la parte 2 [2]) partiendo de una síntesis que sirve como guía de navegación que se resume en una tabla. En una tercera parte, se proporcionan criterios acerca de la concepción de estructuras en zona sísmica. Finalmente, se presentan una serie de seis ejemplos de aplicación con un detalle de desarrollo muy grande que permiten tener concreción en la aplicación de los criterios

expuestos en la segunda parte. También se incluye en uno de los ejemplos cuatro variantes para el proyecto de una misma estructura que permiten ilustrar algunos de los conceptos relativos a la concepción sísmica.

Por razones de espacio, este texto se centra en unos contenidos concretos de la Guía y pretende ser sólo una introducción a la misma. En concreto, se explora el concepto de factor de comportamiento, se exponen cómo se relacionan en el Eurocódigo 8 comportamiento, análisis, verificación seccional, detalle de armado, ductilidad del acero y verificación de la capacidad de rotación y finalmente se analiza, a través de un ejemplo, cómo influye en el comportamiento la solución adoptada para la infraestructura de un puente.

2. Coeficiente de comportamiento

Uno de los conceptos peor comprendidos por los ingenieros proyectistas es el concepto de factor de comportamiento (q) cuyo valor tiene grandes variaciones en función de la normativa consultada. Por ejemplo EN 1998-2 [2] limita el valor de q a 3.5, mientras que la norma americana para el proyecto de puentes AASHTO LRFD (2017) [3] permite valores de hasta 5 en pilas multifuste. También, la parte 1 del Eurocódigo 8 [4] proporciona distintos valores de q dependiendo de la tipología estructural y de los materiales que se utilizan para la estructura. Pero ¿qué significado tiene este factor y cómo se justifica?

La Fig. 1 representa el comportamiento de una estructura en términos de la relación carga-desplazamiento. Se representan tres tipos de comportamiento: el comportamiento lineal, el comportamiento real y el comportamiento bilineal idealizado que se utiliza para definir un

punto de plastificación claro y que es equivalente al comportamiento real en términos de energía.

El tipo de análisis más extendido, por su facilidad, es el análisis lineal. El problema es que este análisis sobreestima de forma muy considerable las fuerzas que se transmiten a la estructura por efecto de la acción sísmica. El factor de comportamiento viene a corregir este cálculo para obtener una estimación más realista de las fuerzas. Dentro de este coeficiente se incluyen dos efectos distintos (ver Fig. 1):

- ✓ En primer lugar, el comportamiento no-lineal de los materiales, que hace que la estructura pueda alcanzar el desplazamiento requerido por la acción sísmica con una fuerza menor que la estimada suponiendo un comportamiento elástico (F_y en lugar de F_{el}).

- ✓ En segundo lugar el factor q tiene en cuenta la sobrerresistencia de la estructura.

En la Fig. 1, la fuerza F_s corresponde a la plastificación del primer elemento resistente. Aunque la estructura no se agota hasta alcanzar la fuerza F_y , en el análisis modal se determina la resistencia en función de la sollicitación en el elemento crítico sin considerar la redistribución de fuerzas que puede producirse desde este elemento más sollicitado hacia otros con capacidad remanente. En estructuras muy hiperestáticas, este efecto resulta muy importante y ello permite aumentar el valor del factor de comportamiento.

Ambos efectos tendrán importancia en la medida que la estructura presente un comportamiento dúctil, de ahí la importancia de garantizar una adecuada capacidad de rotación.

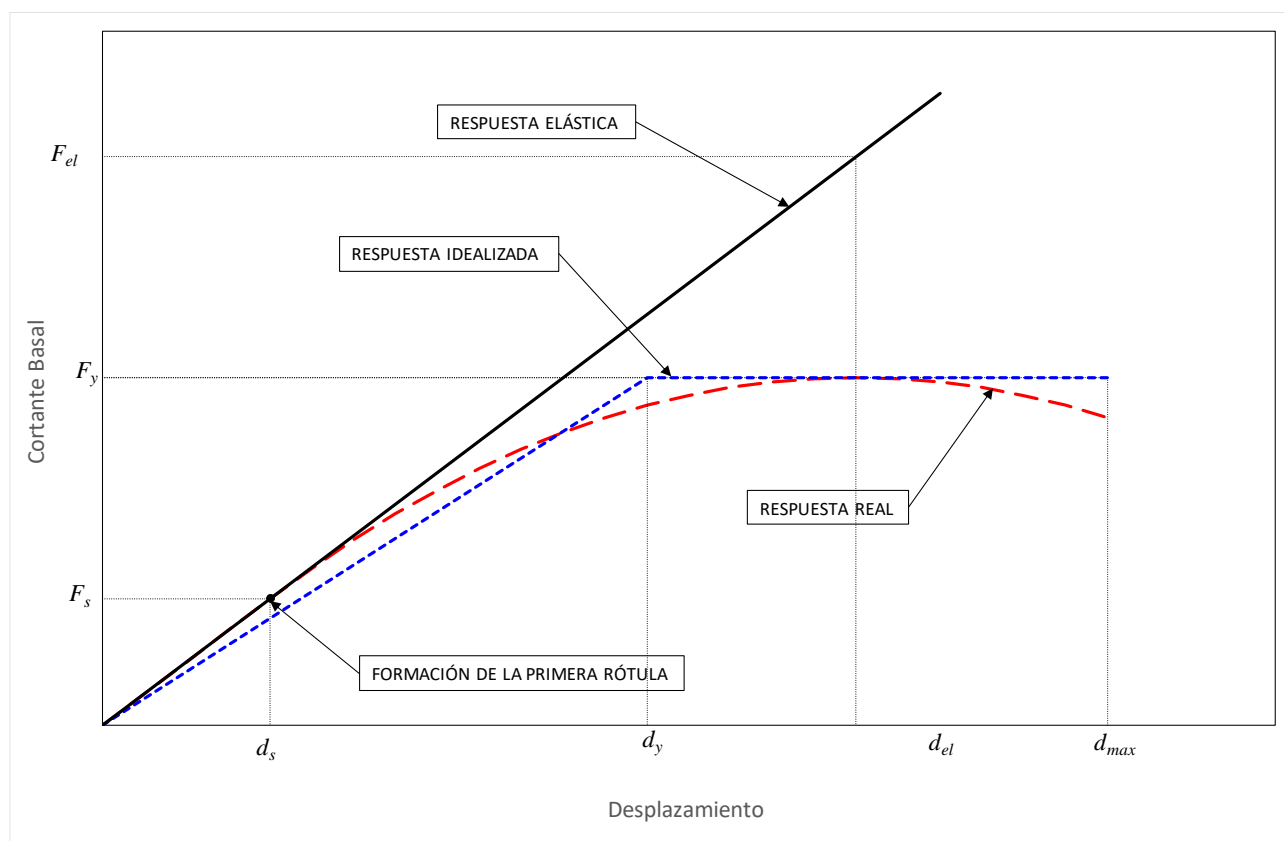


Figura 1. Respuesta estructural: elástica, real e idealizada.

En la Fig. 1 F_{el} es la fuerza elástica que corresponde al desplazamiento que da lugar a

máxima fuerza horizontal en la estructura. En este punto se produciría el agotamiento de la

estructura. Teniendo en cuenta ambos efectos (comportamiento no lineal y sobrerresistencia) el coeficiente de comportamiento es la relación entre esta fuerza elástica máxima F_{el} y la fuerza F_s que corresponde a la plastificación (considerando el diagrama bilineal equivalente al comportamiento no lineal del elemento) del elemento más solicitado:

$$q = \frac{F_{el}}{F_s} \quad (1)$$

3. Conceptos Clave del EC8-2

La Fig. 2 presenta una síntesis de los requisitos que se deben cumplir para proyectar una estructura en zona sísmica de acuerdo con el Eurocódigo 8 en función del comportamiento de la estructura durante un sismo. En términos generales el comportamiento lo decide el proyectista en la etapa de concepción estructural.

El comportamiento puede ser dúctil o de ductilidad limitada. De acuerdo con la

nomenclatura del Eurocódigo 8, el comportamiento dúctil se puede conseguir ya sea con formación de rótulas plásticas o mediante aislamiento. Esto es debido a que en ambos casos se obtiene un comportamiento no-lineal (exceptuando el aislamiento sobre neoprenos convencionales sin amortiguador). Para el análisis, para todos los tipos de comportamiento, se puede utilizar análisis modal espectral (o su simplificación, el método del modo fundamental), con un factor de comportamiento de hasta 3.5 si se considera formación de rótulas plásticas y de hasta 1.5 en el resto de los casos, o análisis paso a paso en el tiempo en el tiempo que será lineal en el caso de ductilidad limitada. Para el caso de comportamiento dúctil con formación de rótulas plásticas, se puede además utilizar el método del empuje incremental (o *pushover* según la terminología inglesa).

| Comportamiento | | Análisis | | Verificación de las secciones | Acero para armar | Armado rótulas plásticas | Verificación capacidad de rotación |
|---------------------|---|---------------------------------------|---------------------------------------|--|-----------------------|--------------------------|------------------------------------|
| Dúctil | Con formación de rótulas plásticas | Lineal equivalente $q > 1.5$ | Análisis modal espectral 4.2.1 | Proyecto por capacidad 5.3 Cortante: Coeficiente parcial adicional γ_{Bd} En rótulas $\theta = 45^\circ$ y solo núcleo confinado | Clase de ductilidad C | según 6 | No |
| | | Rigidez secante según 2.3.6.1 | Método del modo fundamental 4.2.2 | | | | |
| | Análisis no lineal en el tiempo 4.2.4 | | Cortante: | Coeficiente parcial adicional γ_{Bd1} En rótulas $\theta = 45^\circ$ y solo núcleo confinado | Clase de ductilidad B | según 6.5 | No |
| | Método del empuje incremental 4.2.5 | | | | | | |
| Ductilidad limitada | Aislamiento sísmico según 7 | Lineal equivalente ($q \leq 1.5$)** | Análisis modal espectral 4.2.1+7 | Cortante: Esfuerzo de cálculo: qV_{Ed} (cortante lineal) Coeficiente parcial adicional γ_{Bd1} | Clase de ductilidad B | según 6.5 | No |
| | | Rigidez secante o bruta según 2.3.6.1 | Método del modo fundamental 4.2.2 + 7 | | | | |
| | Análisis no lineal en el tiempo 4.2.4 + 7 | | | | | | |
| Ductilidad limitada | Lineal equivalente $q \leq 1.5$ | Rigidez secante o bruta según 2.3.6.1 | Análisis modal espectral 4.2.1 | Esfuerzo de cálculo: qV_{Ed} (cortante lineal) Coeficiente parcial adicional γ_{Bd1} | Clase de ductilidad B | según 6.5 | No |
| | | | Método del modo fundamental 4.2.2 | | | | |
| | Lineal en el tiempo 4.2.3 | | | | | | |

* Los números corresponden a los epígrafes de UNE-EN 1998-2.

** Esta limitación de q sólo afecta al proyecto de la estructura y de la subestructura que hay por encima y por debajo, respectivamente, del sistema de aislamiento sísmico (ver UNE-EN 1998-2 7.3(2)P). El sistema de aislamiento en sí debe proyectarse con el espectro elástico.

Figura 2. Conceptos Clave del EC2-2.

Respecto de la verificación a cortante, si se utiliza comportamiento dúctil con formación de rótulas plásticas, se limita el ángulo de la biela en la zona de la rótula a 45° y se introduce un factor parcial adicional que minorra la resistencia a cortante. Si no hay formación de rótula plástica, no es necesario imponer la condición anterior para el ángulo de la biela, pero se mantiene un coeficiente parcial que divide la capacidad a cortante y cuyo valor recomendado es de 1.25.

Respecto de la calidad del acero para armar ésta debe ser de calidad C si se preve la formación de rotulas plásticas. En caso contrario se admite que el acero para armar sea de calidad B.

Para el armado de las zonas de máximo momento en las pilas también se diferencia el caso en que se prevea la formación de rótulas plásticas del caso en que no. Si se prevé la formación de rótulas plásticas, se debe respetar una cuantía de armadura de confinamiento mínima. Además se deberá llevar a cabo un proyecto por capacidad, cuyo objetivo es garantizar que se produce la rotura por flexión antes que por cortante (ver Fig. 3). El cálculo por capacidad consiste en verificar que la pila es capaz de soportar el cortante concomitante con el momento último de la pila incrementado por el factor de sobrerresistencia γ_0 , cuyo valor recomendado para una pila de hormigón es de 1.35.

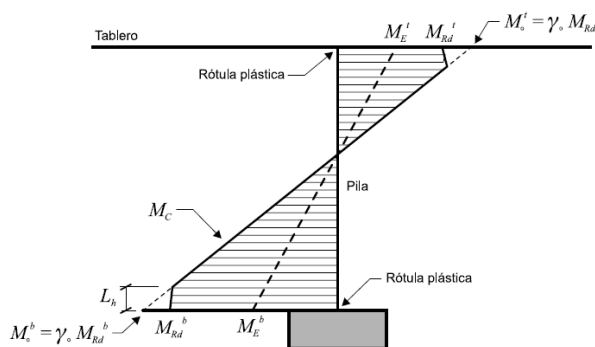


Figura 3. Cálculo por capacidad

De acuerdo con este criterio, el soporte debe resistir con las condiciones mencionadas anteriormente que limitan el ángulo de la biela y minoran la capacidad a cortante, un cortante V_c , que vienen dado por la expresión de la Ecuación (2).

$$V_c = \gamma_0 \frac{M_{Rd}^b - M_{Rd}^t}{l_{cl}} \quad (2)$$

donde:

M_{Rd}^b es el momento resistente de la sección inferior del soporte,

M_{Rd}^t es el momento resistente de la sección superior del soporte, y

l_{cl} es la altura del soporte

En las pilas en que se prevea un comportamiento con ductilidad limitada y la relación entre el momento resistente y el momento solicitante sea menor de 1.30, resulta también necesario disponer una armadura de confinamiento mínima aunque menor que en el caso de comportamiento dúctil con formación de rótulas plásticas.

Finalmente, la verificación explícita de la capacidad de rotación solo es necesaria en aquellos casos en que se prevea la formación de rótulas plásticas y se hayan utilizado como métodos de análisis el cálculo no lineal paso a paso en el tiempo o el método del empuje incremental. La verificación de la capacidad de rotación se efectúa según el anejo E.

4. Ejemplos

La guía incluye 5 ejemplos de aplicación desarrollados con un gran nivel de detalle y que se centran en distintos aspectos. Estos son:

- ✓ Ejemplo 1 – Losa pretensada con 4 alternativas para la infraestructura
- ✓ Ejemplo 2 – Puente isostático esviado sobre neoprenos

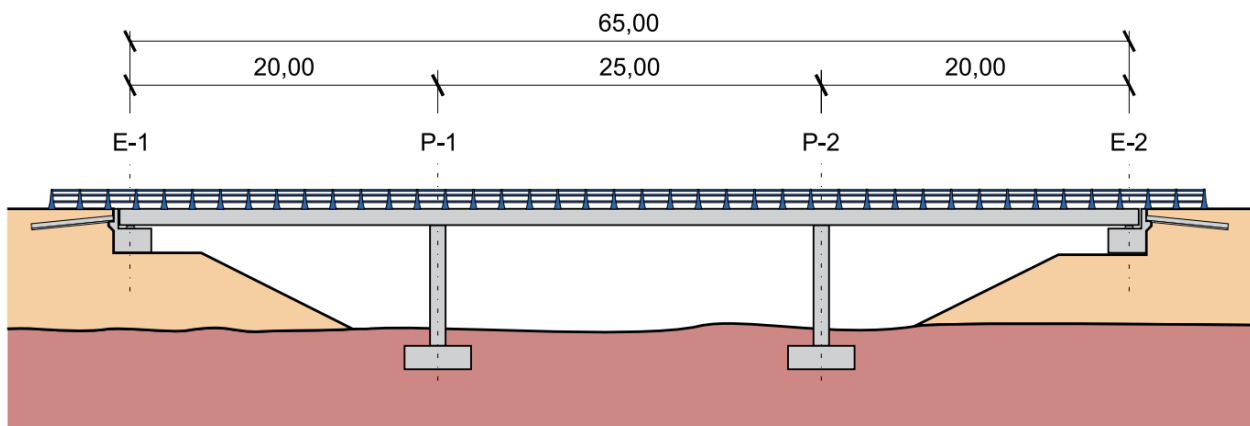
- ✓ Ejemplo 3 – Estructura enterrada – método cinemático
- ✓ Ejemplo 4 – Viaducto continuo con sistema de amortiguamiento longitudinal
- ✓ Ejemplo 5 – Muro en ménsula – método del empuje pseudo-estático

En este apartado se presentan algunas conclusiones que se pueden sacar sobre la tipología más conveniente para el proyecto de la infraestructura a partir de los resultados del ejemplo 1. Este ejemplo aborda el proyecto de una losa de hormigón pretensado de tres vanos de luces 20-25-20 m. Para resolver la infraestructura de este tablero, se proponen 4 soluciones posibles (ver Fig. 4):

- ✓ Un único fuste circular biempotrado de 1.20 m de diámetro

- ✓ Dos fustes biempotrados de 1.00 metro de diámetro
- ✓ Un fuste apantallado biempotrado de 4.00 metros de ancho y 0.70 m de canto
- ✓ Un único fuste circular de 1.20 m metros de diámetro que soporta el tablero mediante un aparato de apoyo (neopreno convencional) – solución aislada.

Se considera una aceleración del terreno de 0.5g y un terreno tipo D.



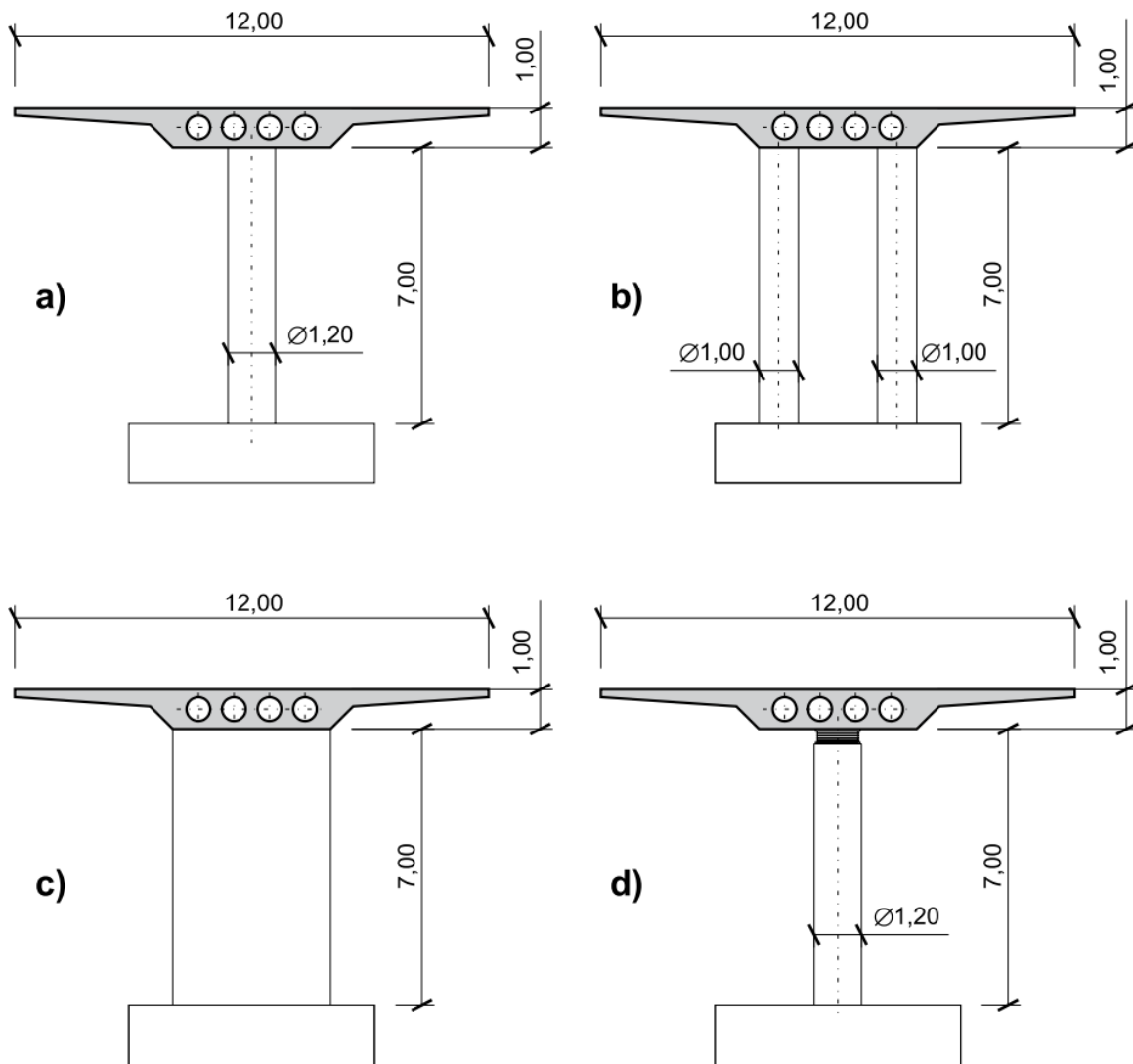


Figura 4. Estudio de 4 soluciones para la infraestructura de un tablero en zona sísmica

En la Fig. 5, se muestra de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo, tanto en dirección longitudinal como transversal, para cada una de las cuatro soluciones planteadas, la rigidez de la estructura, el periodo propio, el máximo desplazamiento y la máxima fuerza. Se puede ver que la solución 3 tiene mucha más rigidez transversal que el resto de las soluciones y por tanto un menor periodo propio. También se ve que la solución aislada tiene un periodo mucho más bajo. En términos de desplazamientos, la solución aislada da lugar a desplazamientos de 18 cm, y requeriría juntas de dilatación acordes a este desplazamiento y

entregas adecuadas para eliminar el riesgo de pérdida de apoyo. Sin embargo, la menor rigidez de la solución aislada no se traduce en una menor fuerza debido a la diferencia en el valor del factor de comportamiento (1.5 para la solución aislada, frente a un valor máximo de 3.5 para las soluciones biempotradas). Únicamente la pila rectangular tiene una fuerza significativamente mayor en dirección transversal, aunque también dispone de una gran capacidad resistente en esa dirección. El valor de la fuerza en dirección transversal se ve en este caso penalizado por una reducción en el valor del factor de

comportamiento debido a baja esbeltez de la pila en esa dirección.

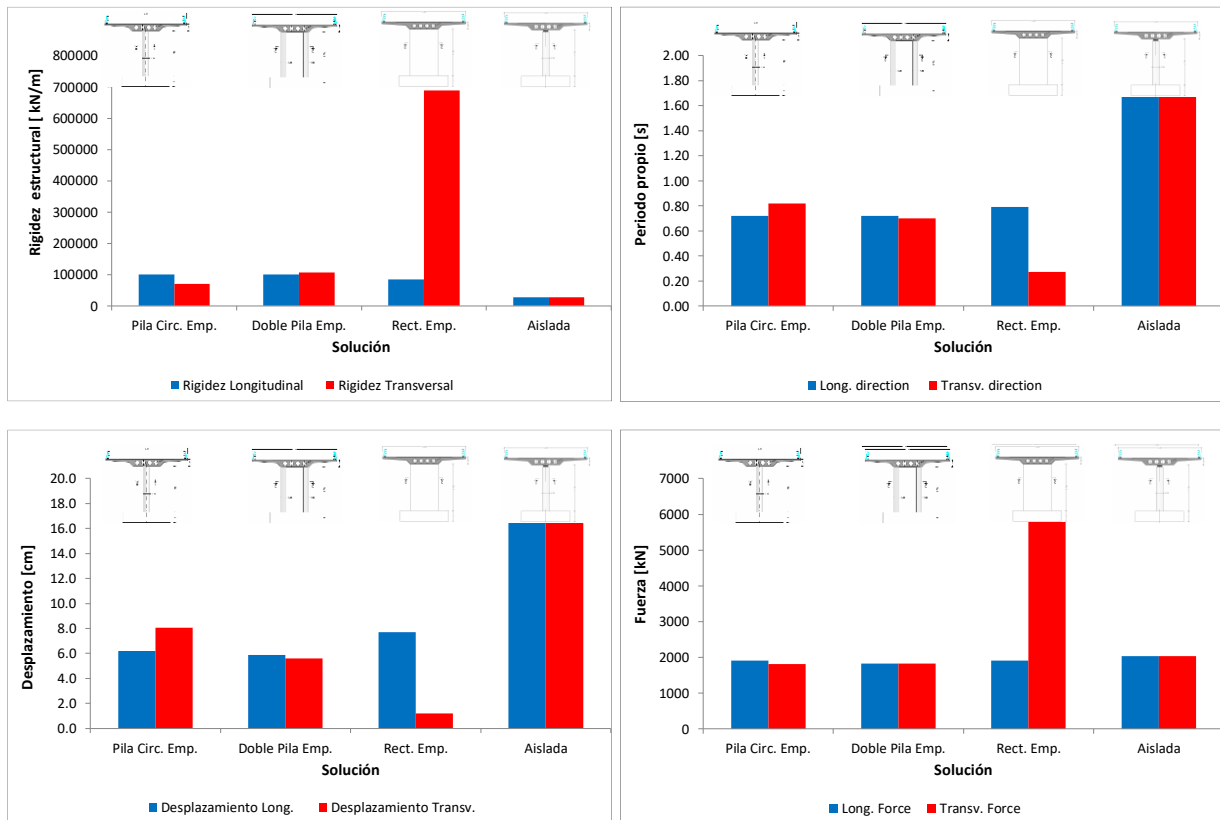


Figura 5. Rigidez, periodo, desplazamiento y fuerza

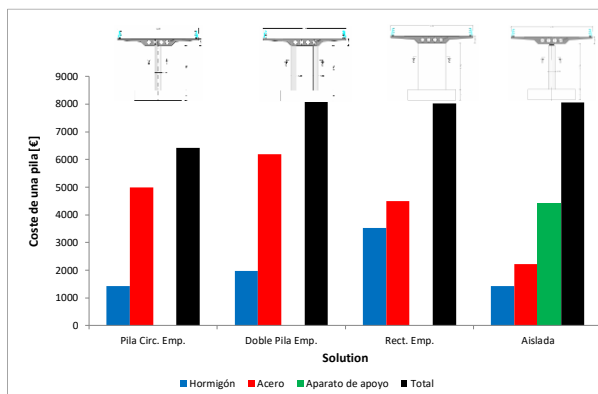


Figura 6. Comparación en términos de costes

En la Fig. 6 se muestra una comparación de las 4 soluciones en términos de coste. Se puede ver que, aunque la pila aislada tiene menor cuantía de acero, debido a que no requiere una armadura de confinamiento, este menor coste se ve compensado por el coste del aparato de apoyo ($\phi 800 \times 351 (216)$). Este incremento de coste será en realidad superior al que se muestra en la figura

debido a que también será necesario incrementar significativamente las dimensiones de los aparatos de apoyo de los estribos respecto de otras soluciones.

Por tanto, desde un punto de vista de coste inicial, la solución más ventajosa resulta ser la de fuste circular único biempotrado. Esta solución también será mejor que la solución aislada desde el punto de vista de la durabilidad de la estructura y del riesgo de pérdida de apoyo. Sin embargo en caso de sismo, la estructura se verá dañada y requerirá reparación. No existe por tanto una solución intrínsecamente mejor que las demás, pero un estudio de este tipo permite adoptar soluciones razonadas.

5. Consideraciones finales

En los párrafos anteriores se han abordado algunos aspectos tratados en la nueva Guía para el proyecto sísmico de Puentes de Carretera, concretamente el concepto del factor de comportamiento, el esquema de requisitos del Eurocódigo 8 parte 2 y su interrelación y algunas conclusiones que se derivan de los ejemplos de aplicación desarrollados. Sin embargo el contenido de la publicación es mucho más amplio y su objetivo es ofrecer a los proyectistas españoles herramientas para potenciar el uso de la normativa europea a través de un conocimiento más profundo de los conceptos que hay detrás de las cláusulas.

Agradecimientos

Este trabajo se llevó a cabo en el marco del contrato *Apoyo Técnico a la S.G. de Construcción y a la Dirección Técnica, especializado en estructuras* firmado entre el Ministerio de Fomento y la UTE formada por FHECOR Ingenieros Consultores, S.A. e IDEAM, S.A. El manuscrito fue revisado por Michael Fardis (Universidad de Patras) y Amadeo Benavent (UPM), a quienes los autores agradecen sus comentarios que han contribuido significativamente a la mejora del documento.

Referencias

- [1] Ministerio de Fomento, Guía para el Proyecto Sísmico de Puentes de Carretera. Dirección General de Carreteras (2019) 161-18-253-9.
- [2] CEN: EN-1998-2:2005. Eurocode 8. Design of structures for earthquake resistance – Part 2. Bridges, (2005).
- [3] AASHTO. LRFD Bridge Design Specifications. American Association of State Highway and Transportation Officials. 2017.
- [4] CEN: EN-1998-1-1:2004. Eurocode 8. Design of structures for earthquake resistance –

Part 1. General rules, seismic actions and rules for buildings, (2004).