

Distintos sistemas de aislamiento empleados en puentes

Different isolation systems in bridges

Leonardo Fernández Troyano ^a, Guillermo Ayuso Calle ^{b,*} y Lucía Fernández Muñoz ^b

^a Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Carlos Fernández Casado, S.L., Madrid, España

^b Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Carlos Fernández Casado, S.L., Madrid, España

Recibido el 20 de julio de 2016; aceptado el 29 de septiembre de 2016

Disponible en Internet el 4 de enero de 2017

Resumen

En Carlos Fernández Casado, S.L. Oficina de Proyectos se han diseñado y construido en los últimos 40 años muchos puentes en zonas sísmicas como México, Colombia y Chile. En estos puentes se han dispuesto diferentes sistemas de aislamiento frente a la acción sísmica, eligiendo el sistema que parecía más adecuado para cada uno de ellos. Cabe indicar que no existe una solución única para resistir la acción sísmica, pudiendo disponer en cada puente un sistema diferente y que sea igualmente válido.

© 2016 Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural (ACHE). Publicado por Elsevier España, S.L.U. Todos los derechos reservados.

Palabras clave: Sísmico; Puente; Amortiguador; Transmisor de choque; Hormigón

Abstract

In the company Carlos Fernández Casado, S.L. Oficina de Proyectos have been designed and built many bridges in seismic areas such as Mexico, Colombia and Chile in the last 40 years. In these bridges have been arranged different isolation systems against seismic action, choosing the system that seemed best suited for each of them. It is noted that there is no single solution to resist the seismic action, each bridge may have a different system and that is equally valid.

© 2016 Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural (ACHE). Published by Elsevier España, S.L.U. All rights reserved.

Keywords: Seismic; Bridge; Damper; Shock transmission unit; Concrete

1. Introducción

En los 50 años de existencia de la oficina de proyectos Carlos Fernández Casado, S.L. se han diseñado y construido muchos puentes en zonas con una sismicidad importante, tales como México, Colombia y Chile, entre otras. En estos puentes se han dispuesto diferentes sistemas de aislamiento frente a la acción sísmica, eligiendo el sistema que parecía más adecuado para cada uno de ellos. Cabe indicar que no existe una solución única para resistir la acción sísmica, pudiendo disponer en cada puente un sistema diferente y que sea igualmente válido. Cada

sistema tiene sus ventajas e inconvenientes, por lo que no se puede desechar una solución solo porque no sea la finalmente elegida.

Al elegir un sistema de aislamiento es importante que se tenga claro el mecanismo resistente de la estructura y cómo se va a transmitir la acción sísmica por la estructura.

En este artículo se quiere mostrar, a partir de una selección de puentes construidos, los diferentes sistemas que se han empleado, indicando las ventajas e inconvenientes de cada uno de ellos.

2. Sistemas de aislamiento

Los sistemas de aislamiento que más se han empleado en los distintos proyectos son los siguientes: transmisores de choque,

* Autor para correspondencia.

Correo electrónico: gayuso@cfosl.com (G. Ayuso Calle).

Tabla 1
Aceleraciones del terreno y máximas

Puente	a_0 (m/s ²)	c (m/s ²)
Puente de Albatros	0,32 g	1,29 g
Puente Paso de Piedra	0,12 g	0,45 g
Puente Carrera Novena	0,63 g	0,63 g
Puente Platanito	0,12 g	0,45 g
Puente Vidalta	0,04 g	0,16 g
Puente Barra Vieja	0,13 g	0,50 g

amortiguadores, apoyos de neopreno y la propia configuración estructural del puente. Esta última no es un sistema de aislamiento propiamente dicho, pero es importante ver que a partir de la configuración estructural del puente se puede recoger la acción sísmica sin necesidad de dispositivos.

Los puentes sobre los que vamos a centrar este artículo están situados en México y Colombia, países ambos con una alta sismicidad. A continuación se indican los puentes:

1. Puente de Albatros [1].
2. Puente Paso de Piedra.
3. Puente Carrera Novena [2,3].
4. Puente Platanito.
5. Puente Vidalta [4,5].
6. Puente Barra Vieja.

Cabe indicar que todos los puentes que son objeto de este artículo han sido calculados según la norma americana American Association of State Highway Transportation Officials (AASHTO) [6] que es la vigente en México, salvo el puente Carrera Novena, que se hizo con la norma colombiana [7,8] que está basada a su vez en la americana. Como referencia de los sismos de cálculo con los que se han diseñado estos puentes, en la tabla 1 se indica la aceleración del terreno y la aceleración máxima en cada uno de ellos.

2.1. Transmisores de choque

Vamos a comenzar con los transmisores de choque como dispositivos para recoger la acción sísmica. En los proyectos que se han realizado a lo largo de los años este es uno de los dispositivos que más se han empleado en el caso de estructuras no muy grandes. Estos dispositivos se sitúan habitualmente en el tablero en la zona de estribos. Tienen como ventaja que para cargas lentas no introducen esfuerzos en la estructura, mientras que ante una acción rápida como el sismo el dispositivo se bloquea transmitiendo la carga normalmente al punto donde se sitúe el transmisor, que habitualmente es un estribo. Estos dispositivos se deben emplear en puentes pequeños y no en grandes estructuras, dado que las cargas a transmitir en estas serían muy elevadas y conllevarían la ejecución de estribos muy grandes para recoger toda la acción sísmica.

Se disponen en uno de los dos estribos de la estructura, ya que si se disponen en los dos se bloquea longitudinalmente la estructura ante un sismo, generando unos axiles en el tablero difíciles de resistir.

Uno de los puntos a tener en cuenta cuando se utiliza un transmisor de choque u otro dispositivo aislador es cómo se realiza la disposición de los mismos. Lo más normal es colocar varios dispositivos de menor capacidad y no un único dispositivo que recoja toda la acción sísmica, ya que saldría de un tamaño muy grande. Al disponer varios hay que tener en cuenta cómo los situamos, ya que podríamos empotrar la estructura durante el sismo a momentos de eje vertical o transversal longitudinales. Si es así, se debe considerar en el cálculo.

Como ejemplos en los que se han empleado estos dispositivos están el puente de Albatros y el puente Paso de Piedra, ambos situados en México. También los hemos empleado en el arco de San Sebastián, situado en México.

2.1.1. Puente de Albatros (México)

El puente de Albatros pasa sobre el canal Noroeste del río Balsas en el puerto de Lázaro Cárdenas, en la costa del Pacífico. Esta zona es una de las de sismicidad más altas en México. El viaducto tiene las siguientes características:

- Dos viaductos de acceso de hormigón pretensado, con longitudes de 140 m el de margen derecha y de 105 m el de margen izquierda y con un ancho de 16 m. En el viaducto de margen derecha parten del tronco principal dos ramales, uno a cada lado, que lo conectan con la carretera que pasa bajo él (figs. 1 y 2). Estos ramales tienen un ancho de 10,50 m.
- Un puente sobre el canal Noroeste del río Balsas, dividido en tres tramos. Los dos tramos laterales son de hormigón pretensado con dos pilas en V cada uno; la estructura de estos tramos es continua con los viaductos de acceso, y el tablero tiene la misma sección transversal. El tramo central, basculante metálico, presenta una longitud de 93 m y un ancho igualmente de 16 m (figs. 3 y 4).

Aunque los viaductos de acceso y los tramos de hormigón del puente sobre el canal del río Balsas son continuos, formando estructuralmente un solo tramo, los hemos separado porque son estructuras diferentes en su planteamiento.

2.1.1.1. Configuración estructural. El conjunto del viaducto se ha dividido en tres tramos independientes, conectados por los pasadores que unen el tramo móvil con los viaductos de hormigón. Estas conexiones entre los tramos fijos y móviles permiten desplazamientos pequeños entre las estructuras adyacentes, y por ello se ha buscado una solución en la que estos desplazamientos sean mínimos en situaciones normales de explotación y en situaciones provocadas por la acción sísmica.

Esto ha llevado a fijar los viaductos de hormigón en las pilas en V del puente, haciendo todos los demás apoyos deslizantes. Las dos losas del puente basculante están fijadas en las rótulas de apoyo y giro, y permiten desplazamientos en la clave, y en los apoyos de los contrapesos en el puente de hormigón. Las pilas en V, si bien funcionan bien para las cargas y deformaciones de explotación, son incapaces de resistir los esfuerzos debidos al sismo. Por esta razón, se han dispuesto en los estribos bloqueadores de choque, que en caso de sismo transmiten las cargas del tablero a los estribos (fig. 5). Esto ha



Figura 1. Puente Albatros. Lado Cayacal.



Figura 2. Puente Albatros. Lado Isla de Enmedio.

obligado a hacer unos estribos grandes que resistan estas cargas del sismo mediante pilotes, lo contrario de lo que se hace actualmente, que es colocar amortiguadores en los estribos para reducir esta carga. Pero en este caso, debido a la existencia del puente móvil central, hemos adoptado la solución de fijar la estructura para sismo para evitar desplazamientos inadmisibles en él.

Los efectos del sismo de los dos tramos del puente móvil se resisten en las pilas que soportan las rótulas y sirven de alojamiento de la maquinaria y los gatos telescopicos.

Otro efecto del sismo se ve reflejado en la sección transversal de los viaductos de hormigón, que ha requerido un pretensado en los bordes de los voladizos laterales, debido a la flexión transversal en el plano del tablero. Por ello, se ha aumentado su espesor en los extremos para alojar el pretensado y para cabeza de compresión, porque la flexión puede tener los dos signos.

2.1.2. Puente Paso de Piedra (Méjico)

El puente Paso de Piedra (fig. 6) está situado en la carretera Durango-Mazatlán y está formado por tres vanos de luces $56 + 112 + 56$ m. Es un puente de hormigón pretensado de sección cajón cuya construcción se realizó mediante avance en voladizo, estando las pilas empotradas al tablero. El puente está en una curva en planta de 360 m de radio. Este puente tiene una composición similar al Puente Las Lomas (Méjico). En ambos puentes, para dar flexibilidad y reducir los esfuerzos en el empotramiento pila-tablero frente a cargas no sísmicas, se optó por una pila con doble tabique, que sirven a su vez como empotramiento en la construcción en voladizo.

El puente tiene un ancho de 13,60 m, con un canto en pilas de 5,60 m y 2,80 m en centro de vano. El cajón tiene un ancho de 5 m y los vuelos son de 4,30 m. Dada la longitud de los vuelos se decidió disponer costillas transversales cada 2,80 m, realizando



Figura 3. Puente Albatros. Tramo basculante.



Figura 4. Puente Albatros. Visión general del conjunto.

la losa de espesor constante de 0,30 m. Las pilas son de doble tabique para dar flexibilidad al conjunto.

En este puente los efectos de la acción sísmica no se resisten mediante un transmisor de choque propiamente dicho, sino que ello se realiza mediante un pretensado que une el tablero con el estribo. Estructuralmente funciona de forma similar para la acción sísmica, pero no para el resto de cargas. En este puente se dispuso un pretensado y un apoyo en el medio de la sección entre el tablero y el estribo, de forma que no se empotre la estructura. El apoyo tiene que tener una capacidad para resistir la carga que le introduce el pretensado y la acción sísmica, y el pretensado se tesa a la carga que introduce la acción sísmica, de forma que no haya movimientos durante el sismo. En este caso, para transmitir

la acción sísmica del estribo al terreno se ha fijado el estribo 1 al mismo mediante seis anclajes de 15Ø0,6”.

La elección de este tipo de fijación para recoger la acción sísmica ha sido debida a que la misma no era muy elevada, y se ha podido resolver mediante cuatro barras de diámetro 50 de acero tipo 85/105 tesadas cada una de ellas a 141 t. Este sistema es más económico que la disposición de transmisores de choque, siendo su funcionamiento muy similar.

Para reducir el hiperestatismo longitudinal, al tener el puente fijo longitudinalmente y empotrado en pilas bajo cargas como la temperatura o deformaciones reológicas, se disponen pilas de doble tabique que nos dan la flexibilidad necesaria para reducir los axiles en el tablero.



Figura 5. Transmisores de choque.

2.2. Por la propia configuración de la estructura

La siguiente forma de recoger la acción sísmica no emplea ningún tipo de dispositivo, se emplea la configuración estructural del puente como medio para resistir la acción. Esta opción se ha utilizado en varias estructuras en los últimos años, siendo las más representativas: viaducto Carrera Novena, puente Platanito y puente Vidalta.

Inicialmente se puede pensar que este procedimiento únicamente es competitivo para puentes de luces cortas, pero se ha empleado en puentes de casi 300 m de vano principal obteniendo resultados muy satisfactorios.

De los tres puentes que se presentan, dos de ellos —viaducto Carrera Novena y Platanito— son estructuras aporticadas en

las que la acción sísmica se recoge por la deformación de las mismas. En el otro caso, Vidalta, la configuración es diferente, formando un sistema estructural cerrado que se explica más adelante.

Cabe indicar que en este tipo de estructuras se puede introducir algún dispositivo sísmico, reduciendo los esfuerzos y desplazamientos en la estructura. Cuando se realizaron los proyectos de las estructuras indicadas se analizó esta posibilidad y no obtuvimos ventajas por el empleo de amortiguadores respecto a no ponerlos. Obviamente los desplazamientos en las juntas son mayores, pero se tiene el ahorro de los dispositivos.

2.2.1. Viaducto Carrera Novena (Colombia)

El viaducto de la Carrera Novena está situado en la ciudad de Bucaramanga en la zona norte de Colombia (fig. 7). La solución realizada es un viaducto de 550 m de longitud resuelto mediante un puente atirantado de tres vanos con luces de 292,4 m el central y 129,2 m los laterales. Estas luces dan lugar a dos pilas con unas alturas de 52 y 72 m desde cimientos hasta la rasante del tablero. El ancho del viaducto es de 30 m y el atirantamiento es central.

El puente está situado en una zona de alta sismicidad y el problema fundamental que se plantea en la estructura de este viaducto es su resistencia frente a los efectos debidos al sismo. En este puente, definido el tablero y las torres, se hicieron estudios de diferentes tipos de estructuras, variando las condiciones de enlace entre los elementos que la forman, y considerando el uso de amortiguadores o no. La solución que ha resultado más adecuada y por ello más económica es hacer nudos rígidos en los enlaces pila-tablero-torre, lo que da lugar a un pórtico, prolongado por los vanos laterales que se apoyan en los estribos (fig. 8). Definida esta estructura, cabía la posibilidad de disponer amortiguadores longitudinales para reducir el efecto del sismo, pero la diferencia entre poner amortiguadores o poner apoyos



Figura 6. Puente Paso de Piedra. Vista general del puente.



Figura 7. Viaducto Carrera Novena. Vista general del puente.



Figura 8. Vista de la junta durante su instalación.

deslizantes en los estribos era pequeña. La única ventaja de los amortiguadores era que con ellos se reducían ligeramente los desplazamientos longitudinales, pero la pequeña diferencia de desplazamientos, sumada al ahorro de los amortiguadores, nos llevó a adoptar la solución de dejar libertad de deslizamiento longitudinal en los estribos y coaccionar el movimiento transversal en ellos y en las pilas. Los movimientos máximos bajo la acción sísmica son del orden de ± 800 mm.

Un problema fundamental en el cálculo de las pilas de un viaducto alto es el coeficiente de ductilidad a aplicar. En las normativas se fijan estos coeficientes, y se indica que para poder considerarlos hay que comprobar la ductilidad de la estructura en estudio. En el estudio de este viaducto se ha realizado un cálculo por capacidad para evaluar cuál es este coeficiente en función de la geometría, las características geométricas de las secciones y el armado de las mismas [9].

El concepto de capacidad de una estructura permite evaluar con seguridad los esfuerzos sísmicos cuando el comportamiento de la estructura deja de ser lineal. Esta forma de proyectar estructuras sismorresistentes también permite localizar el daño en determinadas secciones elegidas por el propio proyectista, de manera que la inspección y la reparación pueda ser más sencilla y en las que se generan unas rótulas plásticas que mejoran la ductilidad del conjunto. Las estructuras sometidas a una acción sísmica de gran intensidad responden de forma no lineal frente a esta, teniendo esta respuesta una gran influencia en el propio valor de los esfuerzos generados por el sismo.

El procedimiento consiste en obtener la curva de capacidad de la estructura, teniendo en cuenta la fisuración y el confinamiento de las secciones, de forma que la intersección de dicha curva con la curva de demanda nos da el punto de funcionamiento de la estructura. A partir de dicho valor se obtiene el coeficiente de ductilidad de la estructura.

Con este método de cálculo se pretende evitar que se produzcan en la estructura roturas frágiles, manteniendo los elementos alejados de su momento último. Esto se consigue disponiendo en la estructura una serie de secciones fusible que protejan al resto de los elementos, concentrando el posible daño en estas secciones elegidas a priori. Indudablemente estas secciones deben ser capaces de mantener su capacidad resistente a lo largo del sismo, y para ello es necesario que se comporten de manera dúctil.

2.2.2. Puente Platanito (Méjico)

El puente de Platanito está situado, al igual que Paso de Piedra, en la carretera Durango-Mazatlán (fig. 9). Este puente tiene una longitud de 189 m y está formado por tres vanos de luces 48 + 93 + 48 m, con dos pilas de alturas 59,5 y 50 m desde cimientos hasta la rasante del tablero. El ancho del viaducto es de 13,66 m para albergar dos carriles de circulación. La construcción se llevó a cabo mediante avance en voladizo.



Figura 9. Puente Platanito. Vista general del puente.

En este caso, dado que el puente es pequeño en longitud, planteamos la misma solución que en el viaducto Carrera Novena, empotrando las pilas al tablero y empleando la flexibilidad de las mismas dada su altura. Al tener alturas de las pilas similares el funcionamiento es mejor que en el caso anterior, donde tenemos una diferencia muy significativa en las alturas de las pilas.

En puentes de este tamaño podríamos haber utilizado transmisores de choque, pero como ya hemos comentado esto genera estribos grandes para transmitir la acción sísmica al terreno. Con la solución adoptada conseguimos ahorrar en los estribos a cambio de disponer una junta que admite los desplazamientos generados por la acción sísmica.

2.2.3. Puente Vidalta (Méjico)

El puente Vidalta (fig. 10) salva una barranca de grandes dimensiones de la ciudad de Méjico para dar acceso a un complejo de viviendas situado en uno de sus bordes. La barranca es un espacio natural dentro de la ciudad con una potente vegetación de árboles y arbustos, que se debe proteger al máximo. Por ello, la primera condición que debía cumplir el proyecto era alterarla lo menos posible. Solo se podía colocar un apoyo en ella, y debía estar situado lo más cerca posible de los edificios. La posición de este apoyo ha dado lugar a un puente con dos vanos de 60 y 180 m de luz.

La acusada diferencia entre los dos vanos del puente —el principal es tres veces mayor que el lateral— es el principal problema que se ha planteado en este proyecto, por la dificultad que supone equilibrar las fuerzas que los tirantes generan en la estructura. Por ello, para disminuir en lo posible la diferencia entre los dos vanos la torre situada entre ellos se ha inclinado hacia el vano principal, de forma que el apoyo del tablero sobre ella lo divide en dos vanos algo más equilibrados, de 78 y 162 m de luz.

El tablero tiene 10,70 m de ancho útil para dos carriles de circulación, y se atiranta en los bordes desde las dos pilas que forman la torre, que se inclinan ligeramente en su plano para encajar la geometría de los tirantes, tablero y torre, y también para abrir hacia arriba la visión del conductor y reducir la sensación de angostura que producen los dos planos de tirantes. En cada uno de estos planos hay dos haces de tirantes, el delantero y el trasero, y los tirantes de cada haz son paralelos entre sí.

En puentes atirantados la resultante de los tirantes delanteros y traseros se compensan, dando lugar a una resultante que debe coincidir con el eje de la torre. En este caso, al tener la torre inclinada aparece una componente horizontal, que será igual y contraria a la que aparece en el tablero, porque las fuerzas que



Figura 10. Puente Vidalta. Vista general del puente.

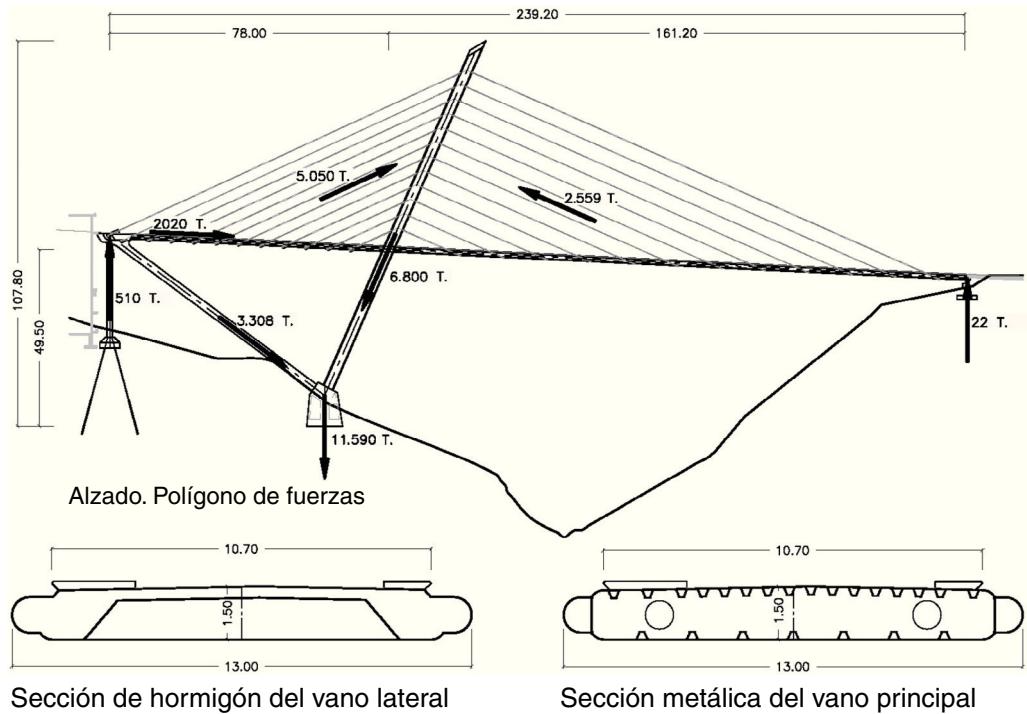


Figura 11. Esquema estructural de fuerzas.

los tirantes producen en él son iguales y contrarias a las que producen en la torre. Por ello nos encontramos con una fuerza longitudinal en el tablero que se deberá transmitir a tierra. La solución más adecuada es transmitirla a la base de la torre porque, sumada a la resultante de esta, la fuerza que se transmite a cimientos es vertical. Esta transmisión se ha resuelto mediante un jabalcón que une la base de la torre con el extremo del vano de compensación, donde se sitúan también dos pilas cilíndricas verticales adosadas al edificio. De esta forma se genera un polígono de fuerzas que equilibra el sistema, formado por la torre, los tirantes, el tablero, el jabalcón y las pilas verticales, completado con los otros dos apoyos del tablero: el apoyo sobre la torre y el del extremo del vano principal sobre el estribo (fig. 11). Los apoyos sobre la torre y sobre el estribo son deslizantes, y las pilas de apoyo del extremo del vano de compensación forman un nudo rígido con el tablero y el jabalcón.

Otra condición de los puentes atirantados es que las componentes verticales de las fuerzas de los tirantes se equilibren en lo posible con las cargas del tablero, para reducir al mínimo las flexiones en él. Esta es la razón de ser del puente atirantado. Pero este equilibrio no se consigue si los vanos del puente son desiguales porque uno pesa más que el otro. Para conseguir el equilibrio la única posibilidad es que el peso de los vanos sea diferente, haciendo más ligero el grande y más pesado el pequeño. Por ello en este puente el vano principal se ha hecho metálico y el de compensación, de hormigón. La estructura del vano metálico está formada por un cajón de las dimensiones requeridas por los esfuerzos que actúan en él. Una vez dimensionado este vano, la sección del tablero del vano de hormigón se ha dimensionado para que su peso compense el del vano principal, consiguiéndose así el equilibrio de la estructura. También son de hormigón la torre, el jabalcón, las pilas cilíndricas verticales y el estribo.

El tablero, el jabalcón y las pilas cilíndricas tienen armadura principal activa. La torre y el estribo tienen solo armadura pasiva.

La ciudad de México D.F. es conocida por tener una sismicidad elevada, por lo que desde un principio se tuvo en cuenta en el diseño del puente cómo resistir esta acción. La estructura tiene una configuración singular y durante el diseño se vio que la propia configuración de la estructura debía ser tal que recogiese la acción sísmica. Por ello se decidió no disponer ningún dispositivo, ya que se vio que con el esquema estructural planteado se podían resistir las cargas sísmicas de diseño. Los efectos sísmicos transversales se resisten mediante el nudo rígido del extremo del tablero y mediante los apoyos en la torre y en el estribo, mientras que los efectos longitudinales se resisten mediante el mismo polígono de fuerzas que equilibran las cargas horizontales en el tablero.

2.3. Amortiguadores

Actualmente en estructuras grandes, ante una acción sísmica, se actúa de diferentes formas:

- Aumentando la flexibilidad de la estructura incrementando el período propio de la misma y, por tanto, desplazándonos por el espectro en la rama descendente.
- Disipando la energía en forma de calor aumentando el amortiguamiento de la estructura y, por tanto, reduciendo los esfuerzos frente a la acción sísmica.

Estos sistemas son los apoyos con núcleo de plomo, los apoyos con alto amortiguamiento, los apoyos pendulares y los amortiguadores hidráulicos o electroinductivos. En los primeros el plomo actúa como dispador de la energía y el neopreno como



Figura 12. Puente Barra Vieja. Empuje del tablero donde se ven los topes transversales.

elemento centrador. En los amortiguadores se puede variar la viscosidad mediante campos magnéticos, teniendo una ley no lineal de comportamiento proporcional a la velocidad elevada a la constante del amortiguador.

Con este sistema se presenta el puente de Barra Vieja, en el que, como se verá seguidamente, se han combinado apoyos pendulares con amortiguadores longitudinales en estribo y amortiguadores transversales en las pilas [10,11].

2.3.1. Puente Barra Vieja (Méjico)

El puente Barra Vieja está situado en Lomas de Chapultepec, al lado de Acapulco, en la costa del Pacífico, sobre el río Papagayo. Como ya se ha indicado, esta es la zona de mayor sismicidad de México. Este puente está enmarcado dentro de los puentes de emergencia que han tenido que ser realizados para sustituir a los puentes derribados por la tormenta tropical «Manuel».

El puente tiene una longitud de 470 m y está formado por cinco vanos de luces 30 + 40 + 90 + 220 + 90 m. La sección tiene un ancho de 15,10 m y está formada por dos vigas longitudinales de 3,10 m de canto unidas mediante costillas transversales cada 5 m con una losa de 0,28 m de espesor.

El vano principal se resuelve mediante un atrantamiento que luego es recubierto con hormigón creando unas velas. Los tirantes están dispuestos a los lados de la sección formando un total de ocho haces. La altura de las torres es baja respecto a la luz principal, 18,5 m. Con esta altura se está por debajo de una tipología de puente extradosado para las luces que se tienen. Se ha dispuesto tecnología de pretensado en los tirantes, siendo los cables continuos y pasando por una silla en la torre. El número de total de tirantes es de 20 en cada uno de los haces.

En un primer momento se diseñó un puente empujado de luces de 60 m, pero debido a las condiciones de cimentación en la zona central del río Papagayo, donde la cota de cimentación estaba muy profunda y a su vez existe la posibilidad de socavación, se decidió realizar un puente con un vano principal de 220 m. El puente se subió de cota respecto al derribado para evitar futuras riadas, y se diseñaron las pilas y cimentaciones de forma que ofrecieran la menor resistencia al paso del agua.

Una de las singularidades de este puente es su procedimiento de construcción. Desde un principio se quiso evitar trabajar en el cauce del río por miedo a crecidas del río que pudieran llevarse la cimbra. Por este motivo se decidió hacerlo mediante empuje (fig. 12). El primer inconveniente que surgió es el vano principal y sus vanos laterales, que no son posibles de empujar dada la longitud que tienen. Por ello se han dispuesto cinco pilas provisionales metálicas, tres en el vano central y una en cada uno de los vanos de 90 m, dejando vanos máximos de 55 m, con los que ya se puede realizar el empuje. Al tener la sección dos vigas se diseñó una nariz de lanzamiento por cada viga y se arriostraron entre ellas. La nariz tiene una longitud de 33 m. El parque de fabricación se colocó en el estribo 1 y tiene una longitud de 62 m, dividido en dos zonas: la primera para el hormigonado de la suela de la sección de cada una de las vigas y la segunda donde se completa la sección con la losa superior. Esta longitud viene definida por la longitud de la dovela más larga.

A continuación se expone el sistema empleado para recoger la acción sísmica. En este caso la altura de las pilas es baja, por lo que el empotramiento de las pilas en el tablero no es adecuado, dado que no se tiene la flexibilidad necesaria; a su vez, el procedimiento de construcción complica la realización del empotramiento. Los transmisores de choque no son la mejor



Figura 13. Vista de uno de los amortiguadores longitudinales del estribo 1.

opción, dado que un puente de esta longitud y sección tiene una masa muy elevada y habría que llevar la carga debida a la acción sísmica a un estribo, siendo necesaria una cimentación muy grande. Finalmente se ha optado por la disposición de amortiguadores longitudinales (fig. 13) en el estribo 1 y amortiguadores transversales en cada una de las pilas. Esta solución la podemos situar entre el empleo de transmisores de choque y



Figura 14. Vista de la torre 5, donde se aprecia el amortiguador transversal y los apoyos pendulares.

la solución tipo pórtico. Con el empleo de amortiguadores se reduce la fuerza a transmitir a las cimentaciones respecto a un transmisor de choque, y los desplazamientos que hay que admitir son inferiores a los de la solución pórtico. En este caso se obtuvieron desplazamientos longitudinales del orden de 29 cm y transversales de 37 cm para la acción sísmica.

Un problema que hay que tener en cuenta cuando se disponen amortiguadores es el recentrado de la estructura. Una vez ocurre el sismo, el amortiguador se alarga o acorta y no siempre tiene capacidad de recentrado: depende de los diferentes fabricantes. En este caso se optó por la disposición de apoyos pendulares en cada una de las pilas para conseguir el recentrado de la estructura (fig. 14).



Figura 15. Puente Barra Vieja. Vista general.

En el caso de que se produzca la acción sísmica durante la construcción se han dispuesto topes transversales en cada una de las pilas para recoger la carga transversal, y para la longitudinal se ha diseñado un sistema por el cual se fija la estructura durante el empuje al parque de fabricación mediante una pieza metálica que une ambos elementos mediante un pretensado.

El puente Barra Vieja se finalizó en octubre de 2016 (fig. 15).

Todos los puentes mostrados en este artículo han sido proyectados junto con MEXPRESA, empresa de construcción mexicana con la que hemos diseñado y construido la mayor parte de nuestros puentes en México y en Colombia.

Bibliografía

- [1] L. Fernández Troyano, G. Ayuso Calle, L. Fernández Muñoz, Puente Albatros, en: V Congreso de la Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural, Barcelona, 2011.
- [2] L. Fernández Troyano, L. Fernández Muñoz, G. Ayuso Calle, R. González Aguilar, C. Iglesias Pérez, A. Cano Fernández-Carrión, Viaducto atirantado de Bucaramanga. Colombia, en: VI Congreso de la Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural, Madrid, 2014.
- [3] L. Fernández Troyano, L. Fernández Muñoz, G. Ayuso Calle, R. González Aguilar, C. Iglesias Pérez, A. Cano Fernández-Carrión, Stayed viaduct in Bucaramanga, Colombia, en: 37th IABSE Symposium, Madrid, 2014.
- [4] L. Fernández Troyano, L. Fernández Muñoz, A. Cano Fernández-Carrión, J. Cuervo Fernández, Viaducto atirantado de Bucaramanga. Colombia, en: VI Congreso de la Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural, Madrid, 2014.
- [5] L. Fernández Troyano, L. Fernández Muñoz, A. Cano Fernández-Carrión, J. Cuervo Fernández, Vidalta Cable-stayed Bridge, en: 37th IABSE Symposium, Madrid, 2014.
- [6] AASHTO. LRFD Bridge Design Specifications. 2007.
- [7] INVIAS. Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes. CCP 200-94. 1995.
- [8] Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. República de Colombia. Reglamento Colombiano de Construcción sísmo resistente. NSR-10. Enero 2010.
- [9] C. Iglesias Pérez, G. Ayuso Calle, A. Cano Fernández-Carrión, R. González Aguilar, Pandeo simultáneo de pilas de puente: aplicación a un cálculo sísmico tipo push-over de las pilas del puente atirantado de Bucaramanga en Colombia, Hormigón y Acero. 63 (263) (2012) 865–882.
- [10] J. Forment Costa, J. Miquel Canet, A.C. Aparicio Bengoechea, Utilización de amortiguadores y conectores sísmicos en puentes, Hormigón y Acero. (217) (2000) 81–100.
- [11] R. Medeot, Aislamiento y amortiguación en el diseño sísmico, Hormigón y Acero (238) (2005) 545–559.