

# ESTUDIO SÍSMICO PARA EL PROYECTO DEL NUEVO VIADUCTO DE JUN (GRANADA)



**Autor(es): J.F. Jiménez<sup>1</sup>, D. Gomez-Calcerrada<sup>2</sup>, C. Prieto<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>IDES S.L., [jjimenez@idesingenieros.com](mailto:jjimenez@idesingenieros.com)

<sup>2</sup>IDES S.L., [dgomez@idesingenieros.com](mailto:dgomez@idesingenieros.com)

<sup>3</sup>PROINTEC S.A., [cprieto@prointec.es](mailto:cprieto@prointec.es)

## RESUMEN

Dentro del proyecto del nuevo acceso a granada desde la A-92, se ha proyectado un viaducto con tablero en cajón de hormigón postesado, de 22,00 m de ancho, 3,25 m de canto y 350,00 m de longitud. Las pilas son de fuste único en forma de cajón aproximadamente rectangular y sin diafragmas intermedios (altura máxima de pila de 35,00 m). La cimentación de la estructura se ha resuelto mediante encepados de pilotes empotrados en el substrato cohesivo. La principal acción que condiciona el comportamiento de la estructura es la acción sísmica, (aceleración básica  $0,22 \text{ g m/s}^2$ ). Al objeto de controlar las fuerzas sísmicas se aplicaron sobre el tablero dos sistemas de control, aislar el tablero de la subestructura y la dotación de un amortiguamiento adicional al sistema. Dichas actuaciones se lograron mediante la inclusión de aparatos elastoméricos con núcleo de plomo en pilas y amortiguadores hidráulicos en dirección longitudinal en estribos. La inclusión de dichos elementos en la estructura obligó a la realización de un estudio sísmico no lineal a partir de acelerogramas analíticos generados a partir del espectro de diseño. Al objeto de poder aplicar los resultados a las habituales comprobaciones normativas se ha realizado la adaptación de un calculo modal-espectral a partir del ajuste del ratio de amortiguamiento del conjunto.

*Palabras clave: viaducto, cajón de hormigón pretensado, amortiguamiento sísmico*

## SUMMARY

In the New Access to Granada from the A-92 highway project, a pre-stressed concrete box girder viaduct has been designed, featuring a 22,00 m width and a 3,25 m height, with a total length of 350,00 m. Piers are of rectangular section with no intermediate diaphragms (maximum pier height of 35,00 m). Structure foundation has been solved by embedding pile caps into the cohesive substrate. Seismic loading determines the behavior of the structure, with a basic acceleration design value of  $0.22 \text{ g m/s}^2$ . Two systems will be applied on the deck to control the seismic forces; isolation between the deck and the substructure and the use of additional damping devices. By means of inclusion of elastomeric bearings with lead core on piers as well as hydraulic dampers in the longitudinal direction on viaduct abutments. Use of these devices led to the need of nonlinear seismic analysis with the application of analytical accelerograms obtained from the site design spectrum. In order to apply the results to the application standard Codes, correlation of a modal-spectral calculation by adjusting the damping ratio of the whole structure has been carried out.

*Keywords: viaduct, concrete box girder, seismic damping*

## Introducción.

El viaducto de Jun, se sitúa dentro de la traza del proyecto de la nueva carretera de acceso desde la autovía A-92 a la ciudad de Granada, a través del municipio de Jun. La configuración geométrica del trazado permitirá la instalación de un vial de doble calzada, al objeto de favorecer la conexión de la capital granadina con el eje transversal de transporte de la región andaluza. La promotora del proyecto ha sido la Consejería de Obras Públicas y Vivienda, a través de la Dirección General de Carreteras y de la Agencia de Obra Pública de Andalucía, siendo el Director del mismo D. Silvestre Hernández.



Figura 1. Localización de la estructura.

Del estudio de tipologías realizado, con el objeto de determinar que forma estructural resultaba más adecuada al problema en estudio, se estableció que aquella que presentaba un mejor comportamiento en función de las variables consideradas, era el proyecto de un puente con tablero en forma de cajón postesado de canto constante.

Se optó igualmente, en dicho estudio previo, por la solución de tablero único, frente a la realización de dos tableros en paralelo, con la intención, por un lado, de reducir el número de pilas, y su correspondiente cimentación, y por otro, desde un punto de vista sísmico, de aumentar el periodo de vibración de la estructura, alejándola de la zona de influencia de la cresta del espectro de diseño normativo.

El proyecto fue terminado durante el año 2009.

## Descripción de la estructura.

El viaducto tiene una longitud total de 350,00 m, distribuidos en 6 vanos (54,00+4x60,50+54,00) y una altura de pila máxima de 35,00 m. Esta constituido por una única estructura cuya trazado en planta discurre sobre una línea con doble curvatura en planta, de gran radio, y una pendiente longitudinal del 7,00 %. El tablero esta formado por un cajón monocelular continuo de hormigón postesado, que se ha previsto construir mediante autocimbra. El canto es constante e igual a 3,25 m medido en el eje del punto medio de la sección transversal. La anchura total de la sección, de 22,00 m, presenta grandes voladizos de 6,00 m que se resuelven mediante costillas de hormigón armado.

Las pilas tienen una sección rectangular hueca de 5,50x3,00 m de dimensiones exteriores, con unas paredes de 0,50 m que se ha previsto se construyan con encofrado trepante.

Cada pila se apoya en un encepado de 9,00 pilotes de 1,50 m de diámetro y unos 40,00 m de longitud.

Los estribos son cerrados con una altura aproximada de 12,00 m y se encuentran cimentados igualmente por medio de encepados de pilotes.

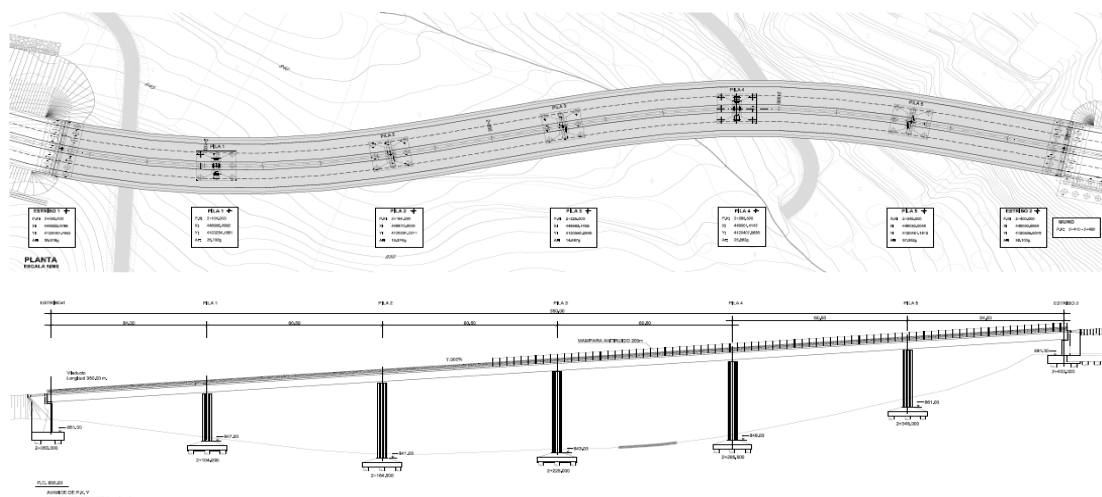


Figura 2. Esquema general de la estructura.

### Normativa considerada. Aspectos relacionados con el cálculo sísmico.

Dada la ubicación de la estructura, en zona de alta sismicidad dentro de la geografía española, se ha realizado sobre la misma un estudio detallado de su comportamiento sísmico. Para la realización de dicho estudio se ha considerado la siguiente normativa.

- Norma de Construcción Sismorresistente: Parte de Puentes. Ministerio de Fomento (2007).
- Ponts Courants en Zone Sismique. Guide de Conception. SETRA (2000).
- Eurocódigo 8. Proyecto de estructuras frente al sismo (1998).

Según la normativa considerada los aspectos más relevantes referentes al cálculo sísmico son:

- Coeficiente del terreno,  $C_s=1,60$ .
- Coeficiente de contribución,  $K=1,00$ .
- Aceleración básica de calculo,  $a_b=0,22g$ .
- Factor de importancia,  $\gamma=1,30$ .
- Aceleración de cálculo,  $a_c=0,32g$  ( $3,10 \text{ m/s}^2$ ).

En relación con la masa movilizada durante la acción del sismo, se han determinado los siguientes valores aproximados.

- Masa del tablero y las pilas, 13295 ton.
- Masa de pavimento y barreras, 3100 ton.
- Masa de la sobrecarga de uso, 615 ton.

Dentro de las características geométricas determinantes del comportamiento sísmico dentro del esquema estructural adoptado en el proyecto, esta la consideración de la distinta altura de las pilas, comprendida entre 15,00 y 35,00 m, y cuya consecuencia es, la existencia de una gran diferencia relativa entre la rigidez de los elementos de apoyo del tablero.

Se establece en la siguiente imagen el espectro normativo de cálculo determinado.

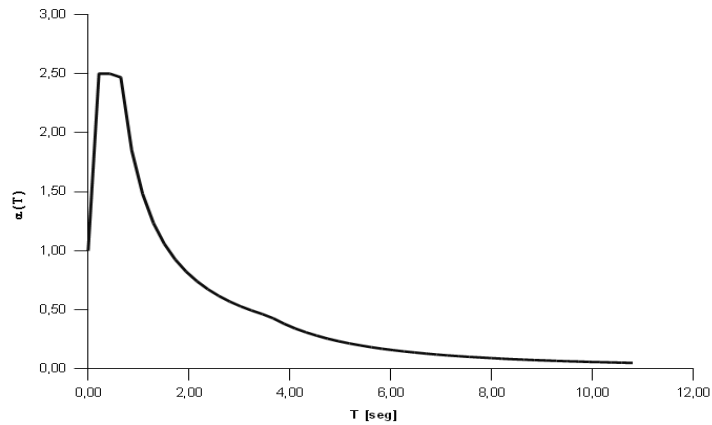


Figura 3. Espectro de cálculo normativo

### Problemática de diseño: Sismicidad.

Tras un estudio del efecto de las diferentes acciones de cálculo sobre la estructura, se verificó que la acción determinante era la acción sísmica. Por dicho motivo se decidió realizar un estudio más exhaustivo del efecto de dicha acción sobre la estructura.

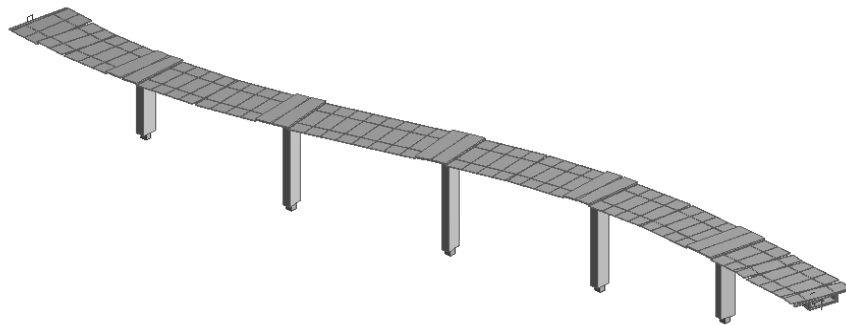


Figura 4. Modelo general de cálculo de la estructura

A partir de un modelo de cálculo de la estructura, basado en el método de los elementos finitos, se ha realizado un análisis modal previo de la estructura al objeto de tener una primera aproximación de los principales modos de vibración de la estructura. Tras la observación de los resultados de dicho análisis, se puede establecer, tras la observación de la masa movilizada por los diferentes modos, que el comportamiento del tablero se puede aproximar al modelo de tablero rígido en dirección longitudinal y al de tablero flexible en el reparto transversal y vertical. En dicho sentido, se presenta en las siguientes imágenes, los tres modos principales de vibración de la estructura.

- Modo de Vibración Longitudinal: 3,24 seg (Modo 1 >90,00% Masa)
- Modo de Vibración Transversal: 2,49 seg (Modo 2 > 80,00% Masa)
- Modo de Vibración Vertical: 0.30 seg (Modo 11 > 75,00% Masa)

Tras la realización de un primer cálculo de la estructura con la metodología modal-espectral, se comprobó que las fuerzas equivalentes resultantes sobre pilas presentaban unos valores muy elevados, lo que obligar a aumentar el canto de las mismas al objeto de garantizar el comportamiento resistente de las mismas. Dicho aumento de canto, originaba

un incremento de la rigidez del sistema, y en este caso, de la fuerza sísmica actuante.

Se decidió, por lo tanto, como criterio de diseño, favorecer la disipación de energía del sistema mediante la inclusión de dos tipos de elementos. Por un lado aparatos de apoyo en forma de neoprenos zunchados con núcleo de plomo, que tiene la doble función de disipar energía y aislar sísmicamente la estructura. Por otro lado, amortiguadores hidráulicos en sentido longitudinal en estribos, al objeto de controlar el efecto del sismo longitudinal en la dirección en la que el canto de las pilas es menor.

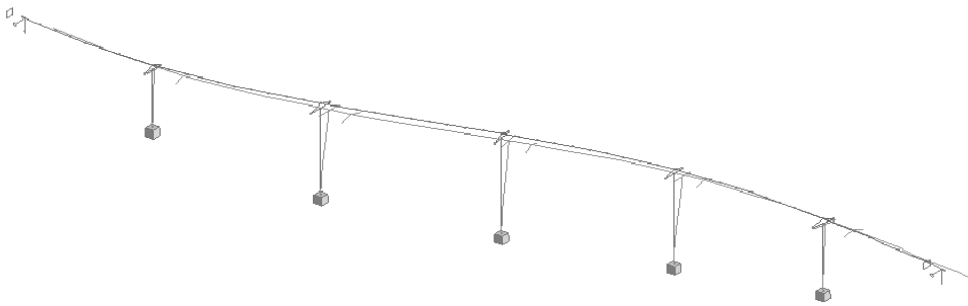


Figura 5. Modo de vibración longitudinal de la estructura [0,31 Hz]

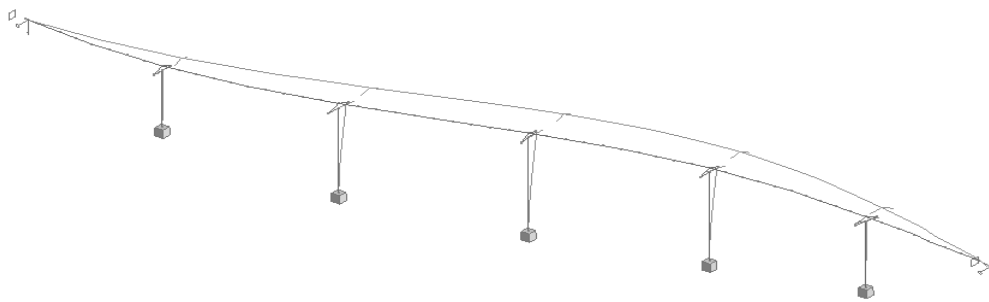


Figura 6. Modo de vibración transversal de la estructura [0,40 Hz]

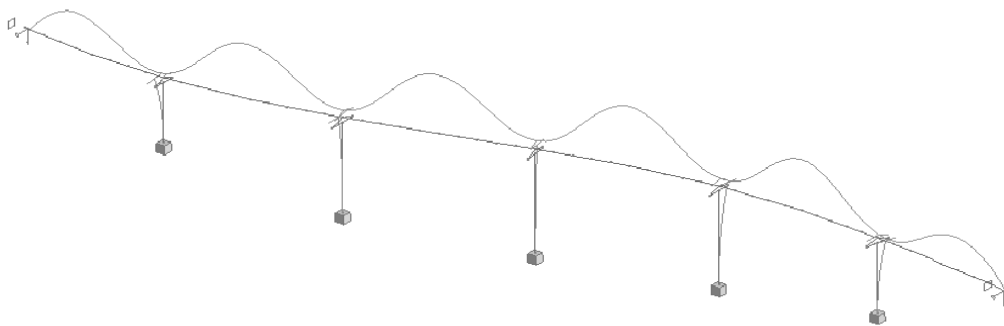


Figura 7. Modo de vibración vertical de la estructura [3,49 Hz]

Debido al carácter no lineal que en el modelo introducen los elementos disipadores de energía, se decidió abordar el cálculo dinámico a partir de un modelo con integración de la respuesta en el tiempo a partir de la aplicación de en el sistema de un conjunto de acelerogramas en su base. Para la determinación de dichos acelerogramas de diseño, se estudiaron dos posibilidades, la adaptación de registros de terremotos reales de la zona y la creación de acelerogramas artificiales analíticos coherentes con el espectro de cálculo. En

los siguientes apartados se recoge el estudio realizado sobre cada uno de estos elementos.

### Estudio de acelerogramas reales.

Al objeto de tener una primera estimación del comportamiento de los terremotos de la zona, se ha realizado una recopilación de los registros más importantes en el área de Granada. Se han tomado como referencia, para el presente estudio, dos terremotos, uno fechado en el año 1984, el de mayor importancia en la zona, y otro más reciente, del año 2007. Se han establecido tres puntos de recogida de datos, el municipio de Santa Fe, Albolote y la Facultad de Ciencias de la Universidad de Granada.

Tabla 1. Registros de terremotos estudiados y puntos característicos

Lugar	Año	$T_A$ [seg]	$T_B$ [seg]	$a_{max}$ [cm/s <sup>2</sup> ]
Santa Fe N-S	1984	0,25	0,50	35,00
Santa Fe E-O	1984	0,14	0,50	29,70
Albolote	2007	0,20	1,00	12,85
Ciencias N-S	2007	0,25	0,50	6,31
Ciencias E-O	2007	0,15	0,50	4,93
Ciencias Z	2007	0,12	0,33	3,65
Analíticos	2008	0,25	1,00	310,00
Espectro	2007	0,16	0,64	310,00

Se ha realizado una transformación al dominio de la frecuencia de los registros existentes, obteniéndose una buena correlación tanto con el espectro de respuesta como con los acelerogramas analíticos calculados.

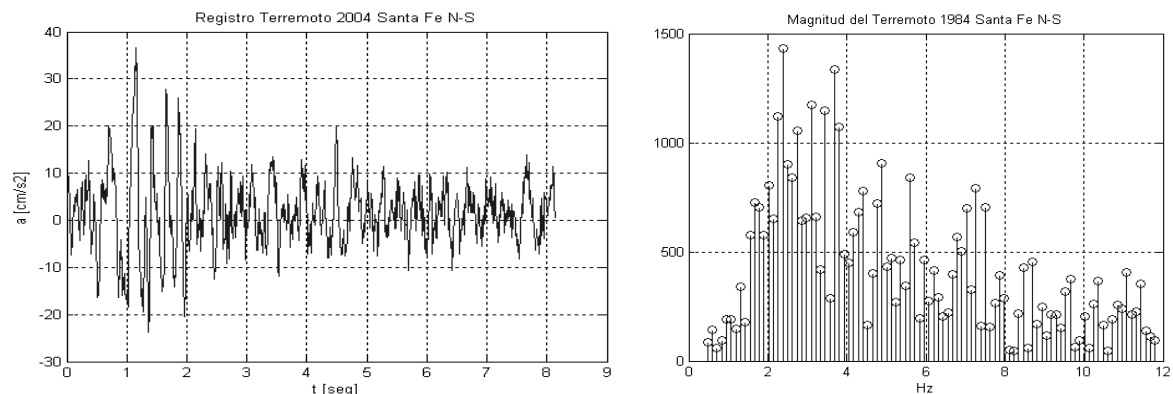


Figura 8. Registro del terremoto de 1984 en Santa Fe N-S y contenido en frecuencias.

Se han escalado los registros anteriores, en función de la aceleración de cálculo normativa, al objeto de ser utilizados como parte de, una de las dos series de tríos de acelerogramas analíticos coherentes considerados.

En dicho sentido, se ha realizado un cálculo dinámico de la estructura, considerando dos series de 10 tríos de acelerogramas, una serie con los registrados escalados más los restantes analíticos y la otra serie solo constituida por acelerogramas analíticos.

Los cálculos dinámicos efectuados no presentan diferencias significativas entre series. No obstante, para el cálculo final de la estructura se ha considerado la serie analítica ya que presentaba periodos de excitación algo superiores.

### Estudio de acelerogramas analíticos.

Para el cálculo de la estructura se han considerado dos series de diez tríos coherentes de acelerogramas estadísticamente independientes.

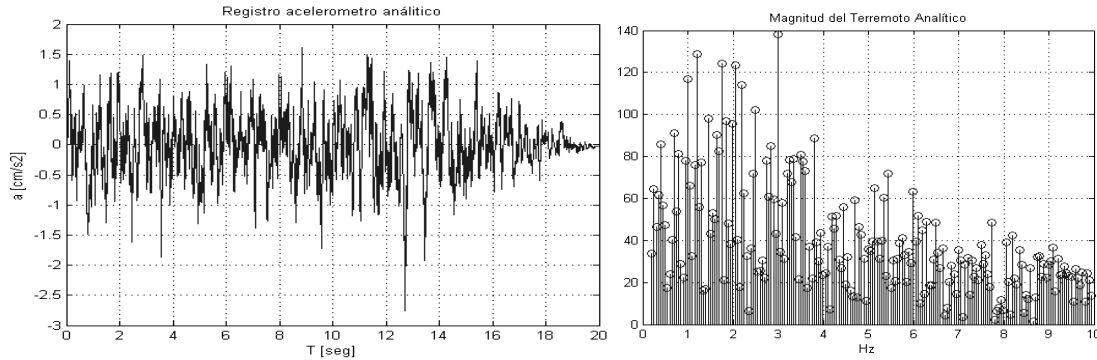


Figura 9. Registro acelerómetro analítico y contenido en frecuencias.

Los acelerogramas analíticos se han obtenido a partir de una función de intensidad considerando una distancia al epicentro de 350 km, una magnitud del evento de 6,75, la cresta de inicio del evento a 2,00 segundos y el descenso a 14,00 seg, con una duración del evento de 20,00 seg. La generación de los acelerogramas analíticos se ha realizado a partir de esta función de intensidad y de una función de caracterización de frecuencias aleatorias. Como se presenta en la tabla comparativa anterior dicha función de intensidad aumenta la banda del pico de los acelerogramas generados hacia periodos mayores, lo que dada la flexibilidad de la estructura en estudio, deja el cálculo efectuado del lado de la seguridad.

### Calculo sísmico de la estructura.

A partir de los acelerogramas analíticos anteriormente determinados, se procede a realizar un cálculo de la estructura mediante la integración en el tiempo de la respuesta de la misma, ante la aplicación de los registros de aceleraciones calculados en las zonas de apoyo de la estructura.

Al objeto de facilitar la inclusión de los resultados del análisis efectuado, en las combinaciones normativas exigidas para la comprobación estructural del sistema, se ha realizado una comparación de los resultados de los cálculos anteriores, con un estudio de sensibilidad a partir de un cálculo modal espectral, considerando como parámetro variacional, el ratio de amortiguamiento total del sistema.

En dicho sentido se ha estimado que un amortiguamiento equivalente del 10% ajusta de forma adecuada ambos métodos.

Se presenta por último en las tablas siguientes un estudio comparativo de las fuerzas equivalentes sobre pila en el sistema sin y con amortiguamiento.

Tabla 2. Comparativa reacción longitudinal del tablero sobre pilas sin y con armortiguamiento

	Pila 1	Pila 2	Pila 3	Pila 4	Pila 5
$H_{SA}$ [kN]	4475,3	4400,55	3218,73	4035,48	4053,58
$H_{CA}$ [kN]	3069,48	3018,23	2207,65	2767,84	2780,25

Tabla 3. Comparativa reacción transversal del tablero sobre pilas sin y con armortiguamiento

	Pila 1	Pila 2	Pila 3	Pila 4	Pila 5
$H_{SA}$ [kN]	1858,19	5067,79	4729,94	5067,79	1858,19
$H_{CA}$ [kN]	1408,25	3840,67	3584,63	3840,67	1408,25

Se comprueba que con la inclusión de los elementos de disipación de energía se consigue una disminución de la acción sobre pila del 31 % en sentido longitudinal y del 24 % en sentido transversal. La mayor efectividad del sistema en sentido longitudinal viene condicionado por el hecho de que los amortiguadores hidráulicos solo son efectivos en dicha dirección.

## Conclusiones .

El aislamiento sísmico y la amortiguación representan hoy las herramientas más eficaces en manos de los ingenieros proyectistas para limitar en áreas sísmicas, tanto las fuerzas como los desplazamientos relativos entre los elementos estructurales adyacentes.

La inclusión de apoyos de neopreno zunchado con núcleo de plomo permite la inclusión en el sistema de elementos que garantizan ratios de amortiguamiento de hasta el 35% respecto el crítico del material.

La acción de dichos elementos junto con la de los amortiguadores hidráulicos localizados en estribos permite reducir la acción horizontal sobre pilas en un 31,00 % en sentido longitudinal y 24,00 % en transversal, con el consiguiente ahorro en el diseño de la subestructura.

La utilización de dichos dispositivos de aislamiento y amortiguación lleva consigo la imposibilidad de utilizar los métodos habituales de cálculo basados en la descomposición modal de la respuesta siendo necesario recurrir a estudios en el dominio del tiempo.

En dicho sentido, resulta de gran utilidad la obtención de acelerogramas artificiales congruentes con los espectros de diseño que marque la normativa donde se ubique la estructura.

A partir de los resultados de los estudios en el dominio del tiempo, se puede mediante procesos iterativos ajustar los procedimientos clásicos normativos, calculo modal-espectral, considerando como variable de sensibilidad el ratio de amortiguamiento medio del sistema. Se establece en dicho sentido que el ratio de amortiguamiento medio del sistema en estudio es aproximadamente del 10,00 %.

## Agradecimientos

Se agradece la colaboración de los profesores D. Andrés Saéz y D<sup>a</sup> Paloma Pineda del Departamento de Mecánica de Medios Continuos de la Universidad de Sevilla por sus valiosas sugerencias para a realización de este trabajo.

Igualmente se agradece la colaboración de D. Gerardo Alguacil y D<sup>a</sup> Mercedes Feriche del Instituto Geodésico de Andalucía por la aportación de los registros de los acelerogramas de la zona en estudio.

## Referencias:

- Medeot R. (2004), "Aislamiento y amortiguación en el diseño sísmico". Jornada Técnica ACHE "Comportamiento de Estructuras de Hormigón en Zonas Sísmicas".
- Millanes, F., Matute, L., Antúnez, G., (2004), "Realizaciones: Proyecto de cuatro viaductos mixtos en México". Jornada Técnica ACHE "Comportamiento de Estructuras de Hormigón en Zonas Sísmicas".
- Llombart, J.A., Revoltós, J., Cascales, J. (2004), "Realizaciones: Obras en Chipre. Viaducto Petra Tou Romiou en la Autovía Limassol Pafos. Viaducto sobre rondas del puerto de Limassol y de Polemidhia". Jornada Técnica ACHE "Comportamiento de Estructuras de Hormigón en Zonas Sísmicas".
- Orosco, L., Orosco, M.H., Barbat, A., (2006), "Generación de acelerogramas artificiales compatibles con la sismicidad local". Cuadernos de la Facultad de Ingeniería e Informática UCS nº1.
- Lopez Casado, C., Benito, B., Bommer, J.J., Ciudad Real, M., Peláez, J.A., (2002) "Análisis de los acelerogramas registrados en los terremotos de El Salvador de 2001". Asociación Española de Ingeniería Sísmica.
- Bonett, R., Pujades, L, Huarto, J., (2002) "Generación de acelerogramas artificiales compatibles con un espectro de respuesta. Aplicación a eventos recientes en Colombia y España. Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería. Vol. 18, 2, 297-308.