

Dispositivos antisísmicos en puentes de las líneas de alta velocidad

RAFAEL ASTUDILLO PASTOR (*) y JORGE MORA DE SAMBRICIO (**)

RESUMEN La cada vez más frecuente utilización en puentes de dispositivos de apoyo con capacidad para absorber energía en caso de un movimiento sísmico, de forma tal que se reduzca en gran parte la necesidad de proyectar estructuras con más capacidad resistente, y por tanto de mayor coste, conduce a la conveniencia de un mayor estudio de su comportamiento real en condiciones de servicio. En el presente artículo se describen los principales sistemas de este tipo de apoyos utilizados en las recientes líneas de Alta Velocidad en España, algunas de ellas todavía no puestas en servicio, y, especialmente, se describe el seguimiento del Viaducto de Salinetas, en Novelda (Alicante), actividad que es fruto de la colaboración Adif-CEDEX.

ANTI-SEISMIC BEARINGS IN THE HIGH-SPEED RAILWAY LINES BRIDGES

ABSTRACT *The every time more frequent use in bridges of bearing devices with capacity for absorbing energy in the event of an earthquake, in such a way that the need to project structures with stronger structural capacity and cost is reduced to a large extent, implies the convenience of a detailed study of the real behavior in service of these devices. In this paper are described the main systems of this type of supports used in the recent high-speed lines in Spain, some of them still not open to traffic. Specifically, the analysis of the behavior of the Viaduct of Salinetas in Novelda (Alicante), is described, activity that is a result of the collaboration Adif-CEDEX.*

Palabras clave: Puente de ferrocarril, Apoyo antisísmico e Instrumentación de puentes.

Keywords: Railway bridge, Seismic bearings, Bridge instrumentation.

1. INTRODUCCIÓN

La ampliación de la red de ferrocarril de Alta velocidad en España ha supuesto la construcción de un número importante de estructuras, entre ellas viaductos de gran longitud y número de vanos, situadas en algunos casos en zonas de España con índices de actividad sísmica relativamente altos. (Figura 1)

Esta situación requiere que se tenga en cuenta en el proyecto de dichos puentes las consideraciones técnicas necesarias para mitigar el daño a las estructuras en caso de que se produjeran sismos de importancia. Esto puede conseguirse de varias formas, en primer lugar, aumentando la capacidad resistente y la ductilidad de los elementos estructurales, o bien, entre otros métodos, instalando una serie de dispositivos capaces de absorber la energía movilizada por el sismo, de tal forma que no sea la propia estructura la que tenga que soportarla sino que sean los citados sistemas los que, de forma total o parcial, la desvíen o absorban.

Esta segunda modalidad permite una evidente economía en el coste de construcción del puente que compensa el coste suplementario que requiere la instalación de estos elementos con capacidad antisísmica.

Los dispositivos que se describen más adelante son fabricados por un número reducido de empresas, fundamentalmente europeas y americanas y vienen avalados, sobre todo en los primeros tiempos de su utilización, por la solvencia técnica de los fabricantes – habitualmente fabricantes de apoyos o juntas de puente convencionales - así como por los resultados de los ensayos de estos mecanismos realizados en fábrica por los propios productores. Más recientemente han aparecido una serie de normas y de requisitos, tanto técnicos como administrativos, en relación con estos sistemas, algunos de los cuales se citan en el artículo.

No existe demasiada literatura sobre la comprobación en estructuras reales de su adecuado funcionamiento, aparte de los casos en los que, tras un sismo de gran magnitud, se ha podido constatar que las estructuras con alguno de estos dispositivos instalado han funcionado mejor que las que no disponían de ellos.

Pues bien, dentro de los diversos trabajos contemplados en el convenio de colaboración entre Adif y el CEDEX, uno de ellos, complementario de otro que se refiere a la instrumentación general de puentes de alta velocidad para el seguimiento de su funcionamiento estructural, en el que no se

(*) Director del Laboratorio Central de Estructuras y Materiales del CEDEX y colaborador en los trabajos relacionados con el seguimiento de viaductos con dispositivos antisísmicos. Ingeniero de Caminos. E-mail: Rafael.Astudillo@cedex.es

(**) Director de Programa y colaborador en los trabajos relacionados con el seguimiento de viaductos con dispositivos antisísmicos. Ingeniero de Caminos. E-mail: Jorge.Mora@cedex.es



FIGURA 1. Peligrosidad sísmica del sureste de España.

contempla el comportamiento de los apoyos, se definió un proyecto consistente en dos tipos de actuación:

- Instrumentación de un viaducto, el de Salinetas (Novelda, Alicante), para estudiar en tiempo real, en periodo de pruebas y explotación, el comportamiento de sus apoyos antisísmicos de tipo hysterético.
- La revisión del proyecto de instrumentación desarrollado e implantado o a implantar por diversas empresas de auscultación para el seguimiento durante la construcción de otros viaductos, también equipados con dispositivos antisísmicos.

En el presente artículo se describen los dispositivos antisísmicos más utilizados en España en algunos de los viaductos (Almocaizar y Salinetas) de las recientes líneas de alta velocidad, la normativa existente en relación con los mismos y la descripción más detallada del seguimiento de los dispositivos instalados en el viaducto de Salinetas.

2. NORMATIVA

La reglamentación española prescribe que en las zonas con un determinado riesgo sísmico se dispongan los dispositivos adecuados para minimizar el riesgo de la aparición de daños de importancia o, incluso, el colapso de la estructura.

2.1. NORMA DE CONSTRUCCION SISMORRESISTENTE: PUENTES (NCSP-07)

La Norma de construcción sismorresistente: puentes (NCSP-07) viene a completar la existente hasta entonces, la *Norma de Construcción Sismorresistente: Parte General y Edificación*, cuyo ámbito de aplicación en principio se limitaba a edificación, aunque se aplicaba a todo tipo de construcción dada la falta de normativa específica.

La NCSP-07 tiene en consideración la especial condición de los puentes de carretera y ferrocarril como infraestructuras esenciales, cuyo comportamiento en caso de terremotos de intensidad elevada debe ser tal que evite consecuencias graves para la seguridad de las personas, pérdidas económicas, propiciando la conservación de un servicio básico, como es el de transporte.

2.2. EUROCODIGO 8: PROYECTO DE ESTRUCTURAS SISMORRESISTENTES (EC-8)

El Eurocódigo 8, sobre el proyecto de estructuras sismorresistentes, se compone de 5 partes. La Parte 2: Puentes (EN 1998-2:2005), ratificada por Aenor en 2007, anula a anterior UNE-ENV 1998-2 de 1998.

El análisis sísmico y el diseño del sistema de aislamiento de una estructura completa están reglamentados por la Norma EN 1998-1, con requisitos específicos para edificios en la Norma EN 1998-1, y para puentes en la Norma EN 1998-2.

La norma exige diseñar los dispositivos antisísmicos y sus uniones a la estructura con dos requisitos diferenciados:

- a) **Requisito de no rotura:** No deben producirse roturas locales o globales, conservando además una resistencia mecánica residual después del suceso sísmico. No concierne a los topos fusibles, que pueden sufrir daños.
- b) **Requisito de limitación de daños:** los dispositivos antisísmicos deben ser capaces de resistir una acción sísmica cuya probabilidad de ocurrencia sea superior a la acción sísmica de diseño, sin que se produzcan daños que limiten su utilización. En este caso, los dispositivos no deben sufrir daños que obliguen a su reparación o sustitución.

2.3. DISPOSITIVOS ANTISISMICOS (EN 15129)

Esta norma europea regula el diseño, fabricación y uso de los dispositivos que se instalan en las estructuras con la finalidad de modificar la respuesta de éstas a las acciones sísmicas. Es de obligado cumplimiento en Europa desde agosto de 2011.

La norma EN 15129 se debe emplear junto con el Eurocódigo 8, que define las aceleraciones y velocidades de cálculo para la estructura. La norma abarca un amplio rango de dispositivos de aislamiento sísmico, desde los tradicionales apoyos elastoméricos con y sin núcleo de plomo hasta amortiguadores viscosos, estableciendo una clasificación recogida en la tabla. (Figura 2)

En esta norma se establecen como condiciones básicas para el diseño de los dispositivos antisísmicos la ausencia de fallo durante el sismo de cálculo (ELU) y el daño limitado durante un sismo de ocurrencia frecuente (ELS).

2.4. APOYOS ESTRUCTURALES (EN 1337)

Esta norma europea consta de 11 partes, y clasifica en las partes 3 a 8 los distintos tipos de apoyos (elastoméricos, de rodillo, tipo POT, oscilantes, cilíndricos y esféricos, y de guía y bloqueo). La adaptación en español de las distintas partes se está llevando a cabo desde 1998 a la actualidad.

3. DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DE AISLAMIENTO SÍSMICO

Los dispositivos antisísmicos permiten aislar la estructura del movimiento del terreno, aumentando los períodos naturales de vibración y disipando energía. La reducción de las fuerzas sísmicas sobre la estructura conlleva un aumento importante de los movimientos. Existen diferentes sistemas para disipar la energía sísmica aprovechando los movimientos de los sistemas de aislamiento sísmico, como amortiguadores, superficies de rozamiento o elementos metálicos cuya plastificación provoca ciclos histeréticos que disipan la energía.

En la tabla de la norma EN 15129, figuran cuatro tipos de aisladores sísmicos. Los dos primeros corresponden a apoyos de neopreno, que no suelen emplearse en viaductos ferroviarios de alta velocidad por las elevadas cargas a las que están sometidos los apoyos y la inadmisibilidad de grandes deformaciones.

Los apoyos elastoméricos ordinarios presentan una capacidad de amortiguación del orden del 5%, mientras que los apoyos de elastómeros de alto amortiguamiento (HDRB) alcanzan cifras del orden del 10-15%.

Descripción del dispositivo			Representación gráfica			Notas
			Vista en planta	Vista en alzado		
				Dir. x	Dir. y	
Dispositivos de unión rígida (RGD)	Dispositivos de unión permanente (PCD)	Fijo				Este tipo de dispositivo corresponde al tipo 8.1 (Apoyo con tope) de la tabla 1 de la Norma EN 1337-1:2000
		Móvil				Este tipo de dispositivo corresponde al tipo 8.2 (Apoyo guiado) de la tabla 1 de la Norma EN 1337-1:2000
	Topes fusibles	Topes fusibles mecánicos (MFR)			-	
		Topes fusibles hidráulicos (HFR)			-	
	Dispositivos de unión temporal (TCD)			-	Este tipo de dispositivo se conoce normalmente como unidad de transmisión de choque (STU)	
Dispositivos dependientes del desplazamiento (DDD)	Dispositivos lineales (LD)			-		
	Dispositivos no lineales (NLD)			-		
Dispositivos dependientes de la velocidad	Amortiguadores de fluido viscoso (FVD)			-	Esta representación gráfica también se aplica a los amortiguadores de dos ejes	
	Amortiguadores de resorte fluido (FSD)			-		
Aisladores sísmicos	Elastomérico				Los aisladores se muestran en posición deformada para resaltar su flexibilidad lateral	
	Apoyo de caucho y plomo					
	Deslizadores en superficie curva				Los símbolos se aplican a los deslizadores de una y de doble superficie curva	
	Deslizadores en superficie plana				Los símbolos se aplican a los tipos 2.3 (apoyo en pot con deslizamiento libre) y 3.5 (apoyo esférico con deslizamiento libre) de la tabla 1 de la Norma EN 1337-1:2000	

FIGURA 2. Tabla de dispositivos antisísmicos (EN 15129)

Los apoyos elastoméricos con núcleo de plomo (segundo tipo) cuentan con una mayor capacidad de absorción de la energía en caso de sismo debido a los ciclos de histéresis durante la deformación del plomo (Figura 3). Su capacidad de amortiguación es del orden del 20-30%

El aislamiento sísmico en los dos primeros casos se conseguiría empleando apoyos de grandes espesores, lo que no es compatible con los reducidos movimientos que admiten los viaductos destinados al uso ferroviario.

Los apoyos deslizantes que se presentan como tercer y cuarto tipos en la tabla de la norma EN 15129 se emplean más en viaductos ferroviarios. El material deslizante puede ser PTFE (Politetrafluoroetileno) o Polietilenos de muy alto

peso molecular (UHMWPE); estos últimos, con gran diversidad de marcas comerciales, tienen una mayor resistencia al desgaste, menor coeficiente de rozamiento (2% frente al 3% del PTFE) y permiten menores dimensiones de los aparatos de apoyo al tener mayor capacidad de carga.

Esquemáticamente, el comportamiento de los apoyos deslizantes podría dividirse en tres subtipos:

- Aisladores sísmicos que admiten pequeños giros y no tienen recentrado: apoyos tipo POT deslizantes, con guiado o libres. (Figura 4)
- Aisladores sísmicos que admiten grandes giros pero no tienen recentrado tras el evento sísmico: apoyos esféricos deslizantes, con guiado o libres. (Figura 5)

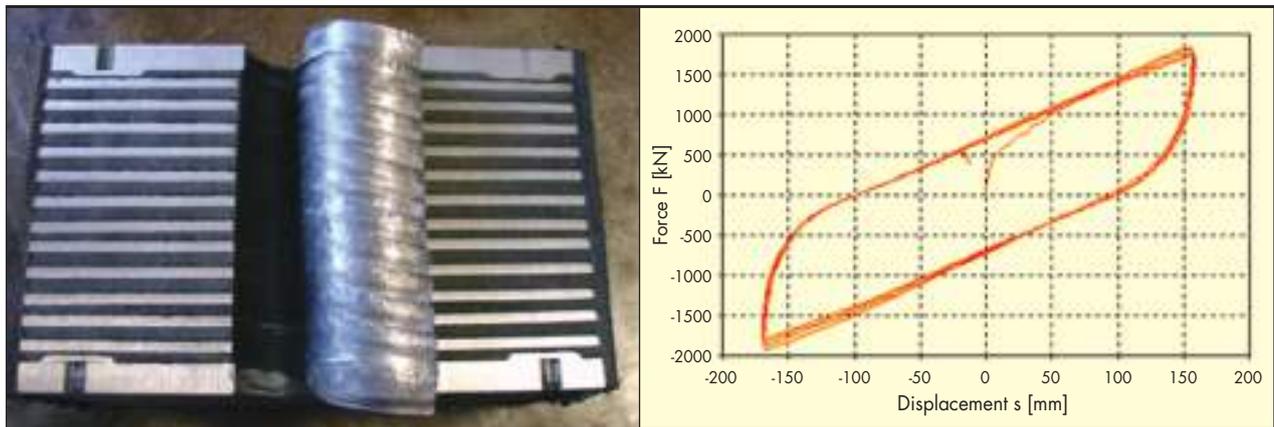


FIGURA 3. Sección de apoyo de neopreno zunchado con núcleo de plomo. Ciclo de histéresis (Maurer-Söhne).

- Aisladores sísmicos que admiten grandes giros y además tienen recentrado tras el evento sísmico: apoyos tipo péndulo. Con una superficie curva de deslizamiento (esférica o cilíndrica), basan su funcionamiento en el péndulo, por lo que su período es función del radio de las superficies esféricas e independiente de la masa. (Figura 6)

Otra ventaja de los apoyos tipo péndulo es la capacidad de recentrado. En el esquema de la Figura 7 se puede observar que la superficie curvada principal (1) provoca una fuerza de recuperación para un desplazamiento d ; las rotaciones de la estructura se adaptan mediante una segunda superficie deslizante (2)

Como evolución de este tipo de aparatos de apoyo, existen modelos de doble superficie esférica o de triple péndulo que logran grandes desplazamientos con aparatos de reducidas dimensiones. (Figura 8)

3.1. SISTEMAS PARA LA DISIPACION DE LA ENERGIA

Los aisladores sísmicos descritos necesitan dispositivos que permitan disipar la energía en caso de sismo. En los apoyos de neopreno zunchado con núcleo de plomo descritos anteriormente, la disipación de la energía se produce en los ciclos de deformación del núcleo de plomo, y no precisa elementos externos.

Sin embargo, los otros equipos de aislamiento sísmico precisan dispositivos mecánicos auxiliares y no estructurales que disipen energía por flexión, rozamiento o deformación de los elementos que los componen. Los utilizados en estructuras de ingeniería civil suelen ser de dos tipos:

- **Viscoelásticos:** dependen esencialmente de la velocidad. Pueden ser sólidos, constituidos por una capa de material viscoelástico entre dos placas de acero ó dispositivos viscoelásticos líquidos, que disipan la energía por medio de las deformaciones inducidas por un pistón en una sustancia altamente viscosa. Los disipadores fluidoviscosos son dispositivos que disipan energía forzando el flujo de un fluido a través de un orificio. Los elementos más comunes son los amortiguadores (Figura 9), situados en el extremo del elemento estructural, como es el caso del viaducto de Almoázar que se describe más adelante.

- **Elasto-plásticos o histeréticos:** disipan la energía mediante deformación a través de sucesivos ciclos de histéresis de unos elementos metálicos de geometrías diversas o por rozamiento de unas láminas metálicas. Solo entran en funcionamiento a partir de una intensidad de la sollicitación, por lo que el apoyo puede considerarse fijo en servicio. En el caso del viaducto de Salinetas, se han dispuesto unos elementos elasto-plásticos en uno de los extremos de cada viga isostática que, mientras no se alcance una determinada fuerza sísmica, convierten el apoyo POT guiado en un apoyo fijo. (Figura 10)

A continuación se exponen como ejemplo dos viaductos para ferrocarril de alta velocidad que disponen de novedosos sistemas de aislamiento sísmico y amortiguación de energía. Para conocer el comportamiento de los distintos sistemas de apoyo y amortiguación, se ha instalado en ambos viaductos una instrumentación que permitirá estudiar el comportamiento durante la explotación.



FIGURA 4. Apoyos tipo POT en sus versiones fijo, guiado y libre (IDEAM).

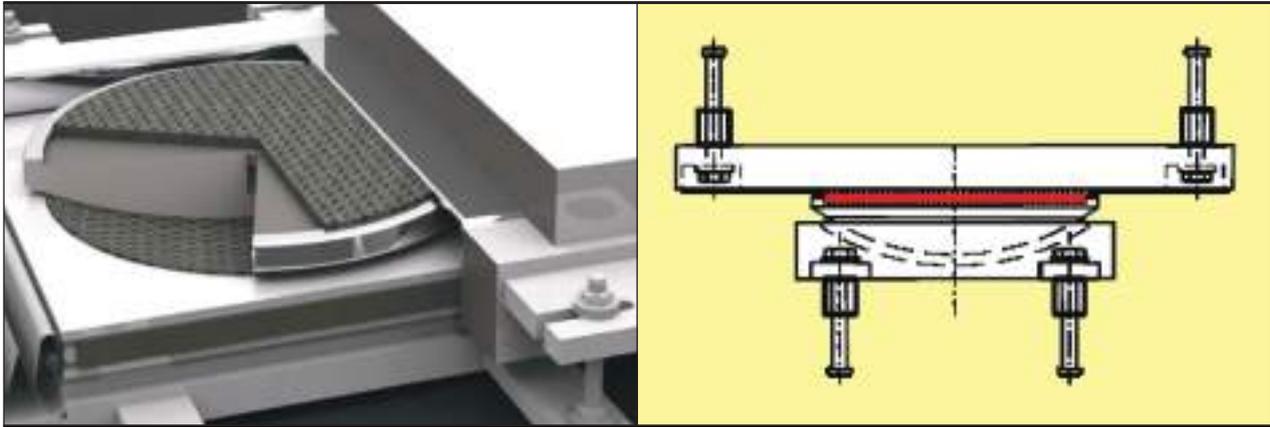


FIGURA 5. Sección de un apoyo esférico con superficie deslizante libre, y esquema (Maurer-Söhne).

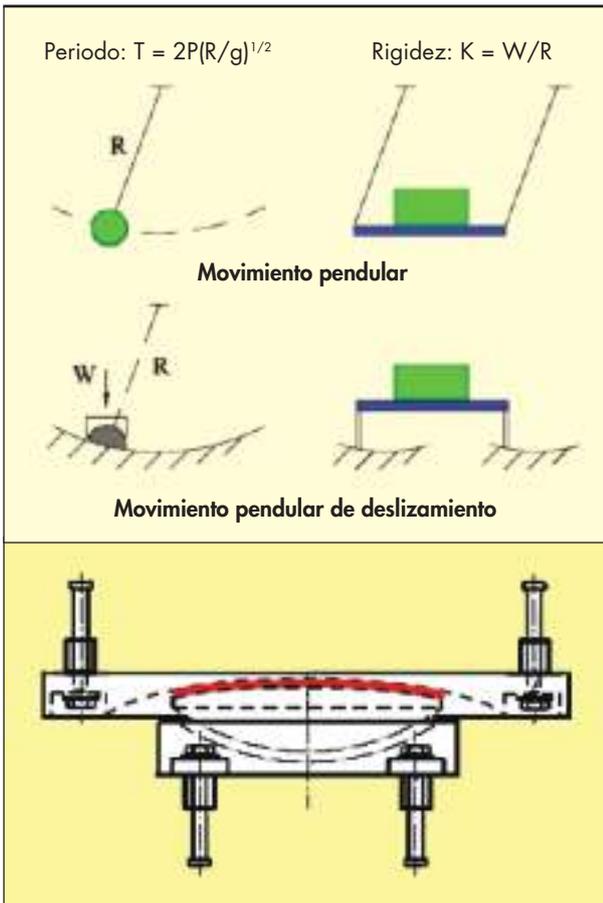


FIGURA 6. Principio del funcionamiento de los apoyos tipo péndulo, y esquema de apoyo (Maurer-Söhne).

4. VIADUCTO DE ALMOCAIZAR

El viaducto de Almocáizar forma parte de un conjunto de cuatro viaductos de la misma tipología del tramo Los Gallardos-Sorbas, perteneciente al Corredor Mediterráneo de Alta Velocidad.

El viaducto tiene una longitud total de 534 m y está constituido por 11 vanos. El tablero hiperestático es un cajón de hormigón pretensado con canto constante de 3,40 m. Los vo-

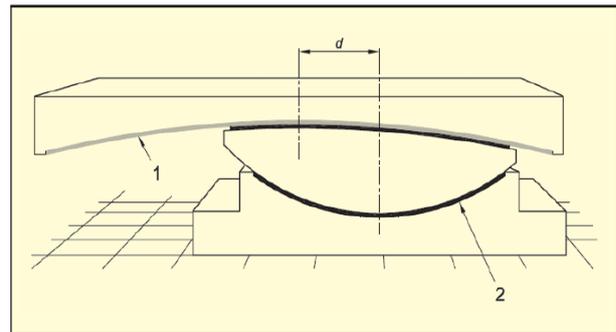


FIGURA 7. Esquema de funcionamiento del recentrado en apoyos tipo péndulo (SACYR).

ladizos laterales son de 3.60 m y la anchura total de la plataforma es de 14 m.

Debido a la significativa intensidad sísmica de la zona ($a_b = 0,14g$), la solución empleada para los apoyos en este viaducto se basa en el aislamiento sísmico del tablero. En este caso la solución adoptada resulta bastante novedosa en España, y consiste en un sistema combinado de apoyos tipo péndulo en las pilas, con amortiguadores y apoyos tipo POT deslizantes en los estribos.

La carga vertical del tablero la soportan apoyos dispuestos en parejas sobre las diez pilas y los dos estribos del viaducto.

- En los estribos se instalan apoyos POT libres en un lado y guiados en el otro.
- En las pilas se instalan apoyos pendulares sísmicos que transmiten la carga vertical del tablero a las pilas, tienen rigidez lateral positiva frente al desplazamiento horizontal y capacidad de recentrado longitudinal del tablero en caso de sismo.
- También se instalan en las pilas topes transversales deslizantes, llamados topes sísmicos, constituidos por apoyos de neopreno/teflón y bandejas de acero inoxidable que transmiten las cargas transversales de servicio y de sismo al tablero.
- Los movimientos de frenado y sismo se reducen conectando longitudinalmente el tablero con sus dos estribos mediante amortiguadores visco-hidráulicos, que apoyaran en una sección intermedia de 2 m de espesor en la parte intermedia del estribo.

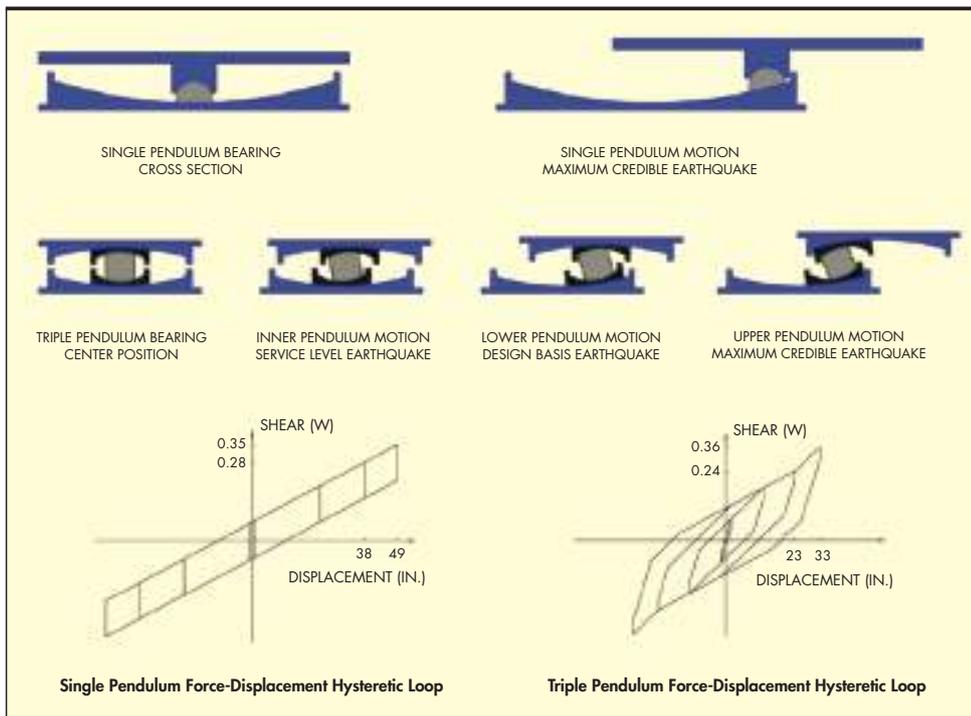


FIGURA 8. Comparación entre apoyo de péndulo sencillo y triple. Esquema de funcionamiento y diagramas de histéresis (Earthquake Protection Systems, Inc. - EPS).

4.1. INSTRUMENTACION PROPUESTA PARA EL VIADUCTO DE ALMOCAIZAR

Debido a lo novedoso de la solución de apoyos antisísmicos, existe un gran interés por comprobar el funcionamiento de dichos dispositivos, tanto en relación con los amortiguadores que se colocarán en los estribos como en los apoyos de tipo péndulo a instalar en las pilas. Por este motivo, la instrumentación prevista deberá permitir tanto la evolución de las deformaciones por retracción, fluencia y temperatura durante su construcción, como el comportamiento de los dispositivos antisísmicos a lo largo de la vida de la obra.

Los tipos de magnitudes a medir son cuatro: giros, desplazamientos, temperaturas y fuerzas. El seguimiento del comportamiento de los apoyos pendulares se realizará fundamentalmente a través de los movimientos relativos tablero/pila. Asimismo, la medida de las fuerzas en los amortiguadores instalados en los estribos proporcionaría información del comportamiento del tablero frente al sismo.

5. VIADUCTO DE SALINETAS

Es la primera estructura de puente en línea de alta velocidad en la que se pretende estudiar específicamente y de forma experimental el comportamiento de los apoyos antisísmicos que tiene instalados. El estudio se centra en instalar primeramente una adecuada instrumentación y en analizar posteriormente los registros de seguimiento tomados en tiempo real de la respuesta dinámica que se produce en tres zonas diferenciada de la estructura:

- El terreno circundante en la proximidad de una de las pilas.
- La zona de la cabeza de la pila, tanto donde está instalado un apoyo antisísmico como donde esta colocado un apoyo convencional.
- La zona del tablero inmediatamente situada sobre los apoyos citados.

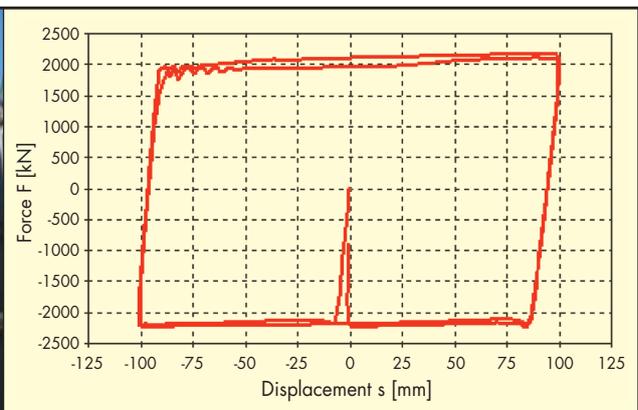


FIGURA 9. Amortiguador viscoso y gráfico del ciclo de histéresis (Maurer-Söhne).



FIGURA 10. Disipadores elasto-plásticos en apoyo tipo POT guiado y en estribo (ATC-ALGA).

5.1. SITUACIÓN DEL VIADUCTO

El viaducto se encuentra localizado en el término municipal de Novelda (Alicante), zona que tiene una sismicidad máxima de 0,12g, por lo que, según la normativa sismorresistente (NCSP-07), las estructuras deben diseñarse para ser protegidas frente a sismo. (Figura 13).

5.2. TIPOLOGIA ESTRUCTURAL

Es una estructura prefabricada isostática de 35 vanos, de 36 metros de distancia entre ejes de pilas, con una longitud total de 1259 metros. La sección del tablero está formada por dos vigas artesas prefabricadas de hormigón pretensado, con un canto constante en el eje de 2,99 metros y una losa superior de hormigón armado.

Las pilas son rectangulares con esquinas achaflanadas, macizadas en su parte superior. Sobre dicha parte superior de las pilas se sitúan los apoyos de las vigas artesas que son en el extremo frontal de la viga de tipo POT con un fusible o tope sísmico para fuerzas inferiores a las 250 toneladas en servicio, junto con unas chapas metálicas que funcionan como amortiguadores al plastificar cuando actúa el sismo de cálculo (dispositivos histeréticos E-shape). El modo de funcionamiento es el siguiente: Una de las partes de la "E" se fija a la pila y otra se fija al tablero (viga artesas en este

caso), de forma tal que si un sismo provoca movimiento relativo entre viga y tablero, ese movimiento se transmite al material de la "E" provocando los correspondientes ciclos disipativos de histéresis. En servicio estos apoyos se comportan como fijos.

El apoyo dorsal de la viga es un aparato POT multidireccional de tipo convencional. Para resistir el sismo transversal la cabeza de la pila dispone de un machón o tope de hormigón, solidario con la propia pila, en cuyos paramentos inclinados se disponen sendos aparatos de neopreno con lámina deslizante de teflón en contacto perfecto con las almas de las vigas. (Figura 14).

5.3. INSTRUMENTACION

El objeto de la investigación es el análisis de los registros de las señales captadas por los transductores instalados y producidas por movimientos vibratorios en el terreno (especialmente los debidos a sismos), así como su transmisión y efecto en la cabeza de la pila y en el tablero.

Las magnitudes a medir podrían ser en principio desplazamientos, velocidades o aceleraciones, aunque por la facilidad de colocación, sensibilidad y disponibilidad, se decidió finalmente la utilización de acelerómetros como sensor principal y transductores de desplazamiento para el estudio de movimientos relativos tablero/pila.



FIGURA 11. Vista general del viaducto de Salinetas.



FIGURA 12. Viaducto de Salinetas. Pila, vigas artesas y machón frente a sismo transversal.

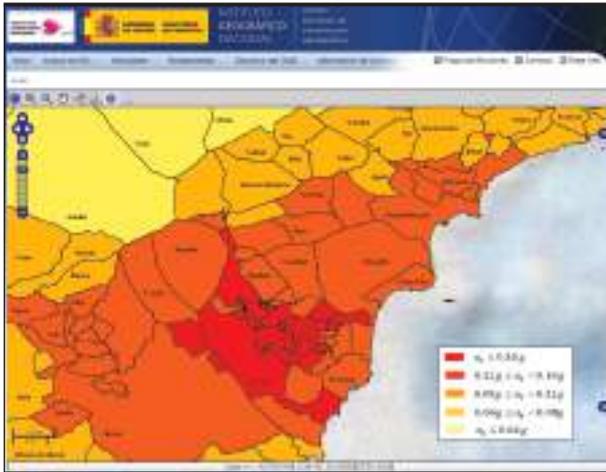


FIGURA 13. Sismicidad de la zona del viaducto de Salinetas: Novelda-Monovar (IGN).

El objetivo final era comprobar tanto la amortiguación (o amplificación) de las señales amplitud/tiempo en los tres elementos: terreno, cabeza de pila y tablero, así como el “filtrado” de la composición en frecuencias de las señales en cada uno los citados elementos. Tratando a la vez de discriminar comportamientos diferentes en el tablero de las dos vigas pertenecientes a tramos contiguos que apoyaban en la misma cabeza de la pila objeto de estudio: una lo hacía sobre un apoyo convencional y otra sobre un apoyo con amortiguamiento histerético.

En relación con este último tipo de apoyo, la situación más favorable para los objetivos del estudio era que se produjera un sismo de una amplitud lo suficientemente importante como para movilizar ciclos de histéresis en el mismo, es decir, por encima del margen de acciones horizontales longitudinales, pasado el cual el apoyo deja de comportarse como un apoyo convencional. Eso sí, dicha situación, dada la robustez de los elementos “pórtico de 3 patas”, implicaría la necesidad de un movimiento sísmico de magnitud tal que provocaría daños importantes en la zona. Evidentemente, y dado que esta circunstancia no es controlable, se acepta la merma en el logro científico en beneficio de la seguridad de personas y bienes.

El objetivo realista es tratar de obtener la mayor información posible de este tipo de apoyos exclusivamente a partir de vibraciones inducidas por pequeños sismos locales o lejanos de mayor intensidad, así como por el paso de ferrocarriles, bien por la línea convencional situada cerca de la zona de ensayo o por la circulación de vehículos ferroviarios de obra o en pruebas sobre el propio viaducto estudiado.

Dado que era necesario disponer de corriente eléctrica, se eligió la pila más próxima a una caseta de control de un semáforo existente para paso de un camino sobre la vía convencional que circula paralela al viaducto. De esa forma se dispondría de corriente eléctrica y de un lugar para la instalación del sistema de control.

El sistema de adquisición de datos está compuesto de tres elementos:

- Transductores de aceleración y desplazamiento
- Sistema de toma de datos
- Sistema de control, almacenamiento y transmisión al Laboratorio Central en Madrid



FIGURA 14. Machón de hormigón frente a sismo transversal en el viaducto de Salinetas (Foto Acciona).

5.4. TRANSDUCTORES DE ACELERACION

Se ha utilizado un acelerómetro piezoeléctrico triaxial para medida de aceleración en el terreno en los tres ejes del espacio. En la cabeza de la pila se ha instalado un acelerómetro triaxial análogo al del terreno y un servoacelerómetro para medida en el sentido longitudinal del tablero. En la viga artesa que apoya sobre el aparato antisísmico se ha dispuesto un triaxial y un servo, análogos a los de la cabeza de la pila. En la viga artesa del otro tramo que apoya en la pila sobre el dispositivo POT convencional se ha dispuesto un triaxial análogo a los anteriores. Ver esquema de la Figura 15 y fotografía de la Figura 16.

5.5. TRANSDUCTORES DE DESPLAZAMIENTO

Se dispusieron dos transductores de desplazamiento en la cabeza de la pila instrumentada para medir los movimientos relativos entre el tablero (extremos de las vigas artesa de los dos vanos adyacentes que apoyan en la pila) y la propia pila. (Figura 17)

5.6. SISTEMA DE TOMA DE DATOS

Para la toma de datos se utilizó el mismo sistema utilizado por el CEDEX en otros puentes de las líneas de alta velocidad. El sistema de adquisición de datos se compone de un módulo principal (IMC-BusDaq-2) y de dos módulos básicos de adquisición dinámica CANSAS-UNI8, de la casa alemana IMC (Integrated Measurement & Control). El primero de ellos, el BusDAQ-2 es un módulo inteligente programable que permite el procesamiento básico de los datos: reducción, filtrado y estadística, etc. y hace de colector de los datos tomados por los otros módulos, el CANSAS-UNI8 que permite el acondicionamiento de los canales con una frecuencia de muestreo de hasta 1000 Hz. para adquisición dinámica.

5.7. SISTEMA DE CONTROL

Está ubicado en la caseta de control antes comentada (Figura 18) y consta, entre otros elementos de:

- Un PC con el software necesario para la configuración de los distintos experimentos así como la visualización y la toma de datos y el software necesario para el acceso remoto y descarga de ficheros.
- Router GPRS para acceso remoto desde el Laboratorio en Madrid.
- Módulo para la conexión de los diferentes dispositivos en red al router.

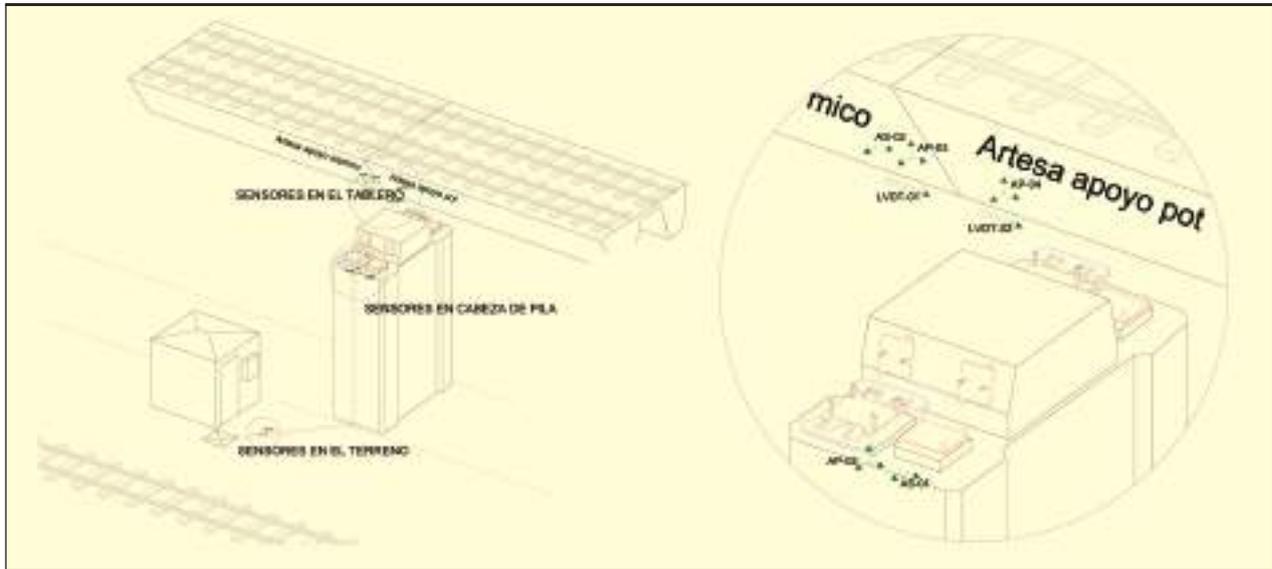


FIGURA 15. Instrumentación de terreno, pila y tablero. Viaducto de Salinetas.

5.8. ANALISIS DE LAS SEÑALES

El desarrollo del trabajo se ha realizado en dos fases. En la primera se instaló el sistema de control y, exclusivamente, el acelerómetro triaxial instalado en el terreno, a fin de observar si realmente se medían señales con suficiente amplitud para poder ser analizadas. Los registros se almacenaban por periodos de 24 horas y con frecuencia de muestreo de 200 datos/s.

Posteriormente, en una segunda fase, se instaló la instrumentación completa que se cita en el epígrafe anterior.

Las señales registradas proceden de tres orígenes que producen movimientos en el terreno:

- Sismos de baja intensidad o de alta intensidad en zonas relativamente próximas (terremoto de Lorca).
- Vibración producida por el paso de trenes en la vía convencional
- Vibraciones producidas por paso de vehículos ferroviarios en el propio viaducto



FIGURA 16. Acelerómetros en cabeza de pila del viaducto de Salinetas.

5.9. MOVIMIENTOS DEBIDOS A SISMOS

Para obtener información sobre los rangos de amplitud en aceleración provocados por los sismos registrados en la zona se ha recurrido a la información publicada por la Unidad de Registro Sísmico de la Universidad de Alicante y del Instituto Geográfico Nacional (IGN) sobre los sismos ocurridos en la zona de estudio.

En los meses de registro de datos durante la citada primera fase no se había detectado ningún sismo de importancia en la zona cercana al viaducto, sin embargo, la coincidencia del terremoto acaecido en Lorca (Murcia) el día 11 de Mayo, de 2011 ha permitido comprobar que el sistema instalado tiene la suficiente sensibilidad para la detección de sismos de esa magnitud y a unos 115 km de distancia al epicentro.

En las siguientes imágenes se muestra la localización del epicentro del sismo en relación a la ubicación de la instrumentación (Figura 19) y los datos registrados durante ese día en el acelerómetro de Salinetas instalado en el terreno (Figura 20).



FIGURA 17. Transductor de desplazamiento entre cabeza pila y tablero. Viaducto de Salinetas.



FIGURA 18. Sistema de control y transmisión de datos.



FIGURA 19. Terremoto de Lorca

5.10. MOVIMIENTOS DEBIDOS A PASO DE TRENES EN LA VIA CONVENCIONAL ADYACENTE AL VIADUCTO.

El paso de trenes por la vía convencional que discurre paralela al viaducto de Salinetas produce vibraciones en el terreno que se transmiten a través de la pila al tablero del propio viaducto.

La Figura 21, en la que se observan los registros de los acelerómetros al paso de un tren por la vía convencional:

- TERRENO: 3 líneas superiores correspondientes a las 3 direcciones del espacio
- CABEZA DE PILA: 3 líneas siguientes),

- TABLERO 1: viga del tablero que apoya en el dispositivo antisísmico
- TABLERO 2: viga del tablero que apoya en el dispositivo de apoyo convencional

Se observa que la vibración del terreno se transmite a la pila y al tablero.

5.11. MOVIMIENTOS DEBIDOS A PASO DE TRENES DE OBRA POR EL PROPIO VIADUCTO.

Se han registrado también los movimientos producidos al paso de trenes de obra (la línea no está abierta todavía al tráfico comercial) sobre el viaducto.

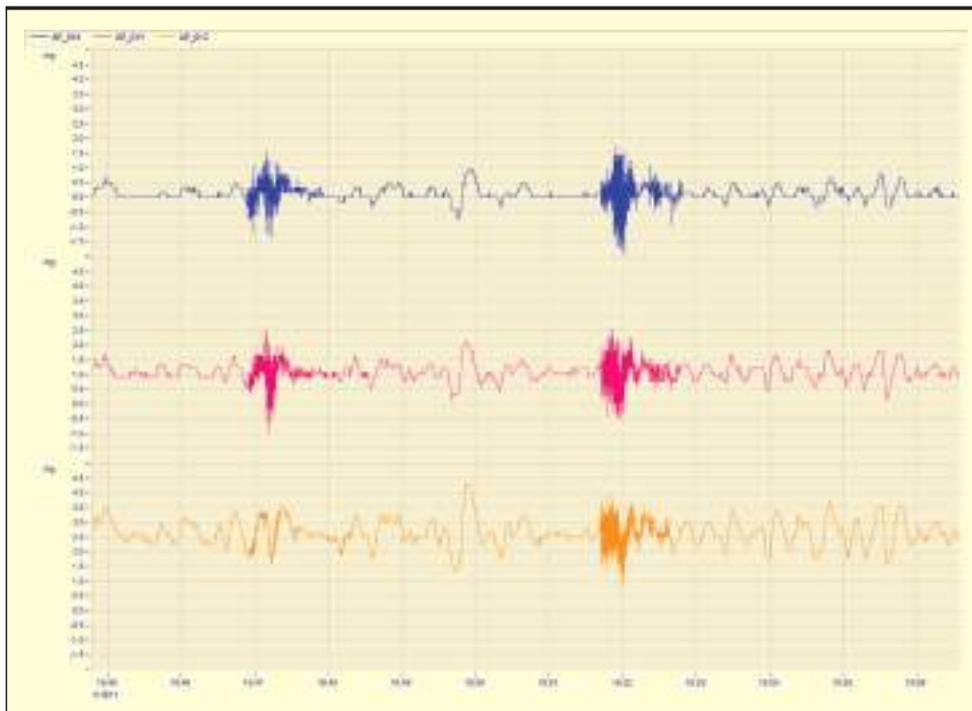


FIGURA 20. Sismo de Lorca detectado por el acelerómetro del terreno en Salinetas (3 ejes).

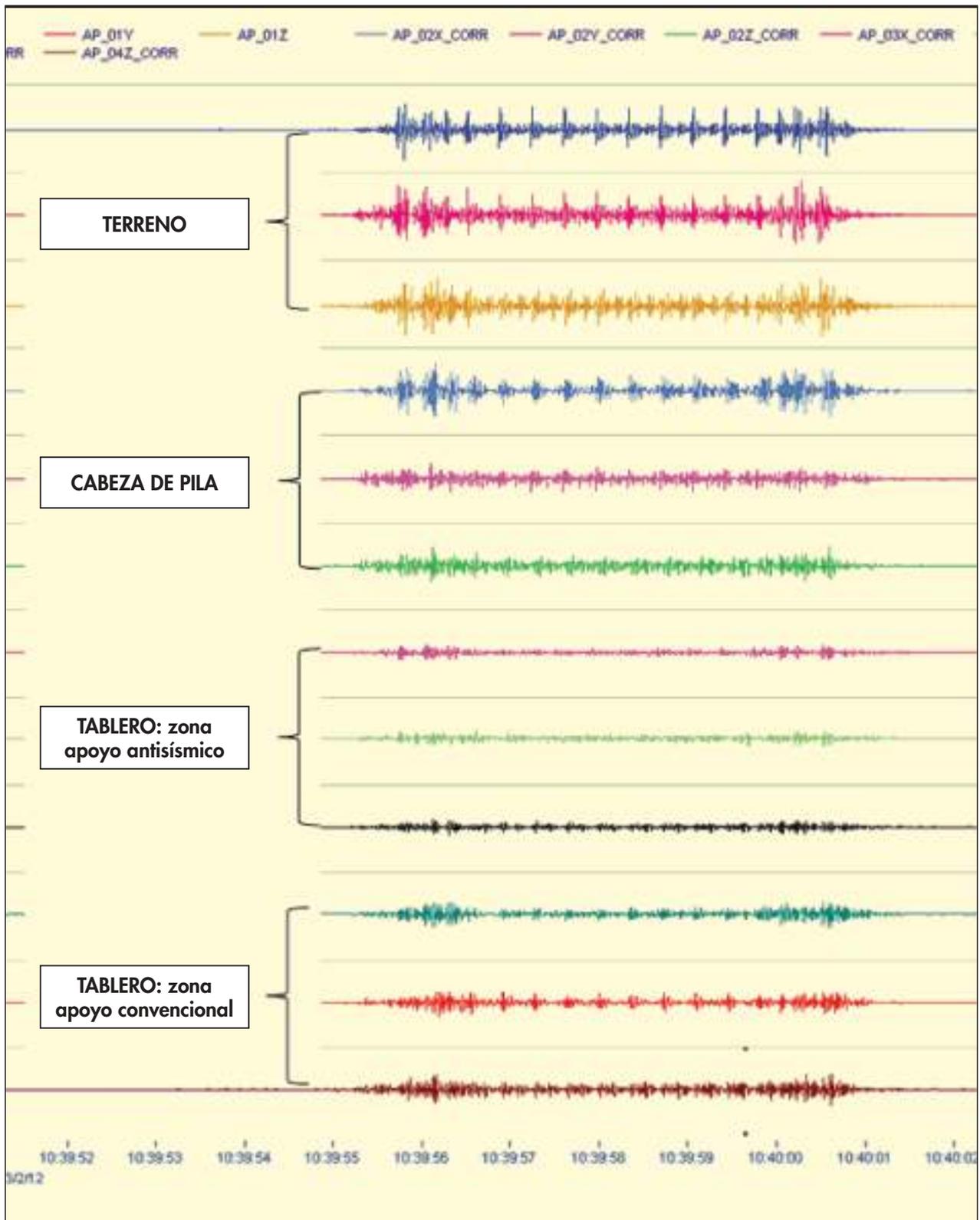


FIGURA 21. Paso de tren por vía convencional adyacente (todos los acelerómetros).

Los registros de la Figura 22 muestran las señales amplitud/tiempo en los acelerómetros instalados. La disposición es la misma que en el caso anterior, observándose en este

caso que prácticamente no se transmite vibración al terreno (las 3 líneas superiores, que corresponden a movimientos del terreno en las tres direcciones tienen amplitud cero).

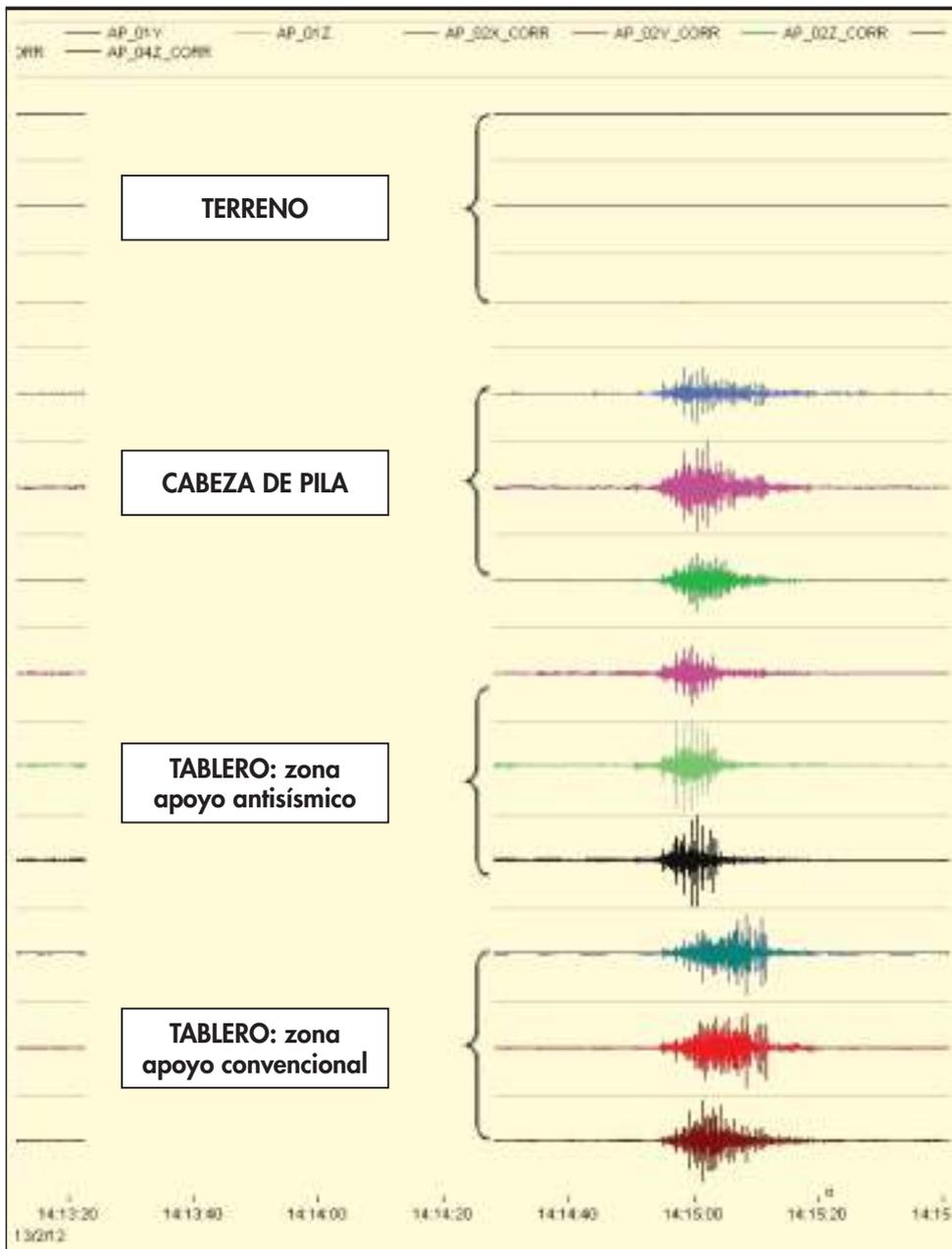


FIGURA 22. Paso de tren de obra sobre viaducto Salinetas (todos los acelerómetros).

5.12. PROXIMAS ACTUACIONES EN EL VIADUCTO DE SALINETAS.

En un futuro inmediato se va a analizar la respuesta de la instrumentación instalada durante las pruebas de carga de recepción del viaducto.

Asimismo, se están analizando las respuestas en frecuencias para todas las situaciones comentadas de excitación de la estructura.

6. BIBLIOGRAFÍA

1. Ministerio de Fomento. *Norma de Construcción Sismorresistente: Puentes (NCSP-07)* (2007)
2. AENOR. *EN 1998. Eurocódigo 8: Proyecto de estructuras sismorresistentes. Partes 1 y 2* (2007-2011)
3. AENOR. *EN 1337: Apoyos estructurales. Partes 1 a 11* (1998-2009)
4. AENOR. *EN 15129: Dispositivos antisísmicos* (2011)
5. ATC-ACHE. *Monografía 18. Conservación de Aparatos de Apoyo, Juntas y Drenaje en Puentes*. Asociación Técnica de la Carretera y Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural (2012)
6. PULIDO, I. *Selección y tendencias actuales en aparatos de apoyo*. IDEAM. Jornada técnica sobre conservación de aparatos de apoyo, juntas y drenaje en puentes. Madrid (2012)

AGRADECIMIENTOS Y COLABORACIONES

Agradecemos la colaboración de Adif para la realización del trabajo que ha dado lugar al presente artículo.



Good Vibrations

**SPS – Protection
against earthquakes!**



MAURER Seismic Protection Systems

- **MSTU** shock transmitter
- **MSTL** shock transmitter with load limiter
- **MHD** hydraulic dampers for energy dissipation
- **MLRB** lead rubber bearings
- **MHDRB** high-damping elastomeric bearings
- **SIP** sliding pendulum isolators

Maurer Söhne seismic protection systems are designed to protect all kinds of structures against the destructive inputs of heavy earthquakes.



TRABAJAMOS EN LA GESTIÓN DE INFRAESTRUCTURAS DE TRANSPORTE FERROVIARIO EN 5 CONTINENTES

En Indra ofrecemos a nuestros clientes la más avanzada tecnología en la gestión del transporte ferroviario, para hacer más seguras y eficientes las infraestructuras de transporte. Y lo hacemos con la vocación científica y el talento de nuestros profesionales. Porque cuando afrontamos un reto importante, Indra responde con innovación.

36.000 profesionales en 118 países
500 M€ invertidos en I+D+i en tres años

