

(02-015) - Study of the dynamic response of three types of high-speed trains traveling on a high viaduct during an earthquake

Paunova, Sonja K. ¹; Olmos, José M. ²

¹ Gransolar Group, ² Universidad Politécnica de Cartagena

This paper presents the results obtained through numerical simulations analyzing the dynamic behaviour of three categories of high-speed trains - conventional, articulated, and regular - as they travel over a high viaduct under seismic movements of several intensities. It is also intended to study the improvement in the behaviour of the bridge and in the safety of traffic produced by a series of tuned mass dampers, installed at the head of the bridge piers, during moderate seismic events. The numerical models developed for this study incorporated the dynamic nonlinear interaction between the train (multi-body model) and the bridge (finite element model), specifically derived from the contact between the train wheels and the rail. The results reveal that trains with lower mass exhibit a significantly higher risk of derailment when entering a viaduct during a seismic event. In the same way, it has been proven that tuned mass dampers installed at the head of the bridge piers can significantly reduce the risk of derailment of these trains during an earthquake, while improving the bridge dynamic response.

Keywords: High-speed train; high viaducts; earthquakes; bridge-train nonlinear interaction models

Estudio del comportamiento dinámico de tres tipos de trenes de alta velocidad viajando sobre un viaducto alto durante un sismo

Esta comunicación presenta los resultados de una serie de simulaciones numéricas en las que se analiza el comportamiento dinámico de tres tipos de trenes de alta velocidad -convencional, articulado y regular- mientras atraviesan un viaducto alto sometido a movimientos sísmicos de diversas intensidades. Se pretende así mismo, estudiar la mejora en el comportamiento del puente y en la seguridad del tráfico que producen una serie de amortiguadores de masa sintonizados, instalados en la cabeza de las pilas del puente, durante eventos sísmicos moderados. Los modelos numéricos desarrollados para este estudio incorporaron la interacción dinámica no lineal entre el tren (modelo multi-body) y el puente (modelo de elementos finitos), específicamente derivada del contacto entre las ruedas del tren y el carril de la vía. Los resultados obtenidos revelan que los trenes de menor masa, presentan un riesgo significativamente mayor de descarrilamiento al entrar a un viaducto durante un evento sísmico. De la misma forma, se ha comprobado que los amortiguadores de masa sintonizados instalados en la cabeza de las pilas del puente pueden reducir significativamente el riesgo de descarrilamiento de estos trenes durante un sismo, al mismo tiempo que mejoran la respuesta dinámica del puente.

Palabras clave: Tren de alta velocidad; viaductos altos; terremotos; modelos interacción no lineal puente-tren;

Correspondencia: José Manuel Olmos Noguera josemanuel.olmos@upct.es



©2024 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introducción

La seguridad de los trenes de alta velocidad al transitar sobre puentes, durante eventos sísmicos, puede ser un tema de gran interés en numerosos países, destacando especialmente España, líder en Europa y a nivel mundial (segunda posición tras China) en términos de kilómetros de líneas ferroviarias de alta velocidad en funcionamiento. El comportamiento sísmico de puentes y la respuesta dinámica de trenes utilizando modelos no lineales han sido ya estudiados en la literatura científica. Sin embargo, pocos estudios han considerado aspectos como la variación espacial de la acción sísmica o modelos de trenes ligeros de alta velocidad (AV) tipo regular para evaluar la seguridad del tráfico ferroviario sobre puentes.

El presente trabajo estudia el comportamiento de un puente ferroviario de AV, con pilas altas, sometido a diferentes cargas de uso, representadas por tres tipos diferentes de trenes de AV, y a diferentes eventos sísmicos. Además, se examina la respuesta dinámica tanto del puente como de los trenes, considerando el efecto de la instalación de amortiguadores de masa sintonizados (AMS) para mejorar la respuesta sísmica del puente.

El puente estudiado es una idealización del viaducto *Arroyo de las Piedras* (Millanes, Santos, & Cornejo, 2007), construido cerca de Málaga, zona de peligrosidad sísmica moderada. Es un puente de tablero continuo de sección en cajón de estructura mixta de acero y hormigón. El tablero está formado por 19 vanos con longitudes de 50.4 + 17 x 63,5 + 44 m. Su longitud total es de 1173.9 m. Varios de sus pilares de sección hueca de hormigón superan los 93 m de altura (Figura 1).

Para este estudio se han elegido tres tipos de trenes de alta velocidad: Tipo convencional (RENFE S-103 de Siemens), tipo articulado (RENFE S-100 de Alstom) y tipo regular el más ligero (RENFE S-130 de Talgo). La interacción del sistema no lineal tren-vía-puente se ha abordado utilizando modelos de elementos finitos para el puente y multibody para los trenes previamente desarrollados (Olmos & Astiz, 2018a). Además, se han empleado series temporales de aceleraciones y desplazamientos del suelo en los emplazamientos de las pilas correspondientes a sismos espacialmente no uniformes generados numéricamente (Olmos & Ástiz, 2023) para el puente estudiado.

Los resultados del estudio muestran que un sismo de intensidad moderada, con aceleración pico del suelo de 0.3 m/s^2 , puede provocar riesgo de descarrilamiento en un tren articulado cuando viaja por un viaducto alto a velocidad mayor de 280 km/h. Además, se ha comprobado que los amortiguadores de masa sintonizados instalados en la cabeza de las pilas del puente pueden reducir significativamente el riesgo de descarrilamiento de estos trenes durante un sismo.

2. Objetivos

Los objetivos principales del estudio son conocer el comportamiento dinámico de tres tipos distintos de trenes de AV viajando por un viaducto alto cuando ocurre un sismo de intensidad moderada, así como evaluar el nivel de seguridad del tráfico ferroviario que atraviesa dicho puente durante dicho evento sísmico. También se pretende estudiar el potencial uso de dispositivos, como los amortiguadores colocados en la cabeza de los pilares del puente, con el fin de mejorar la respuesta dinámica lateral, tanto del puente como de los trenes, mejorando de esta forma la seguridad del tráfico. De la misma forma, se pretende identificar posibles efectos de resonancia en el comportamiento dinámico transversal tanto de los trenes como del puente.

3. Método de investigación

3.1 Modelo del puente y la vía

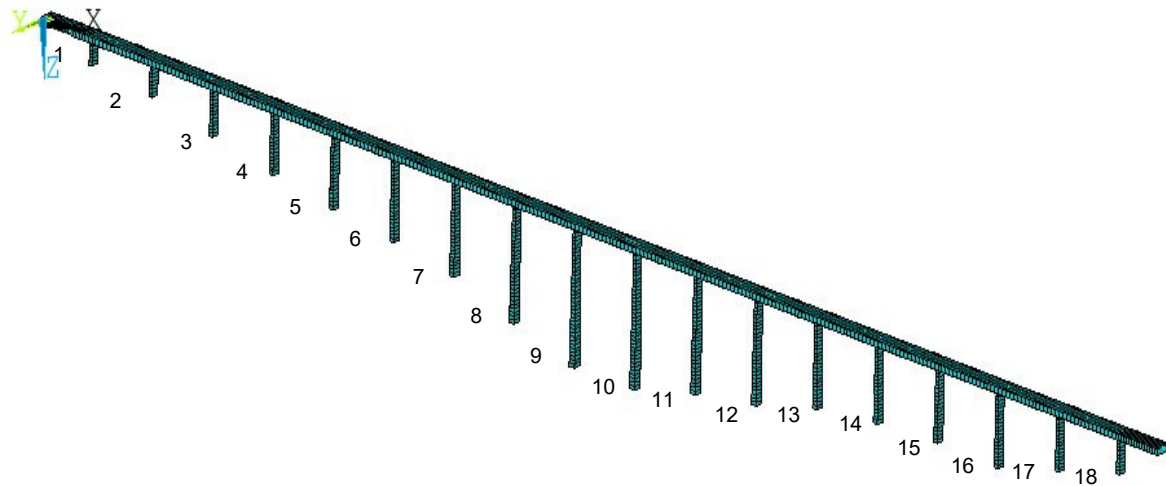
El modelo del puente y de la vía utilizado consiste en un modelo de elementos finitos previamente desarrollado (Olmos, 2015). El modelo usa los programas MATLAB y ANSYS simultáneamente, considerando un comportamiento elástico y lineal de los materiales y despreciando los efectos de segundo orden. Se compone de dos tipos de elementos finitos, viga elástica y elementos de masa puntual.

En el modelo del puente estudiado, el Viaducto de Arrollo de las Piedras, se permite el giro relativo alrededor del eje vertical entre el tablero y la cabeza de la pila (en las secciones de apoyos del tablero), excepto para las pilas no. 8, 9, 10 y 11 (véase la Figura 1). Durante un evento sísmico, se impide la rotación alrededor del eje vertical en las secciones del tablero en los estribos del puente. Estas restricciones de movimiento reflejan las condiciones reales de apoyo del tablero del puente.

La matriz de amortiguamiento del sistema dinámico del puente-vía, C_b de Ec. (1), se obtiene mediante la técnica de superposición modal considerando los 336 primeros modos de vibración del puente con un coeficiente de amortiguamiento igual al 1% respecto al amortiguamiento crítico en todos ellos.

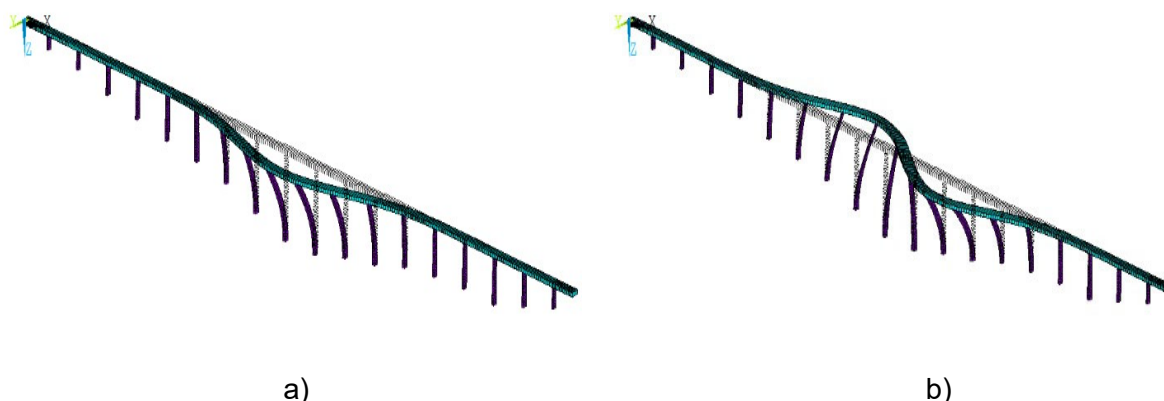
El modelo de vía utilizado en este estudio está descrito en (Olmos & Astiz, 2018b). Considera la vía infinitamente rígida y los movimientos del carril en los puntos de contacto rueda-carril se obtienen a partir de los movimientos de las secciones de tablero correspondientes, utilizando relaciones cinemáticas de sección rígida.

Figura 1. Modelo de elementos finitos del puente



En relación con las frecuencias de vibración del puente derivadas un análisis modal, se identifican 11 primeros modos de flexión lateral del puente con frecuencias comprendidas entre 0,34 y 1,311 Hz. Los 7 primeros modos de flexión vertical del tablero tienen frecuencias comprendidas entre 1.365 y 1.598 Hz. La Figura 2 representa las formas modales de los primeros dos modos de vibración lateral del puente.

Figura 2. a) Modo de vibración lateral 1. $Fr = 0.34$ Hz. b) Modo de vibración lateral 2. $Fr = 0.45$ Hz

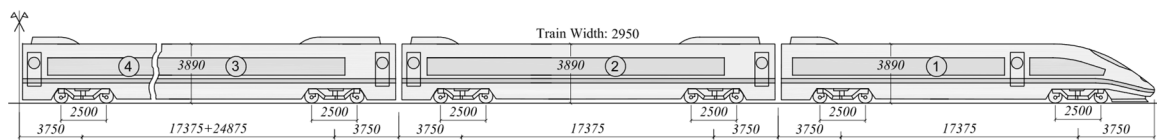


3.2 Modelos de trenes de alta velocidad

Para este estudio se han utilizado tres modelos de trenes de AV con tres diferentes modelos 3D multi-body. La formulación del modelo multi-body para el tren regular ha sido desarrollada para el Trabajo Fin de Máster de (Paunova, 2023). Los trenes estudiados se describen a continuación:

Tren tipo convencional, RENFE S-103 (ICE 3 - Siemens) con 10 vehículos. El convoy no dispone de cabezas tractoras y todos sus 10 vehículos son de pasajeros, con la tracción distribuida en varios vehículos situados bajo los bastidores de la composición.

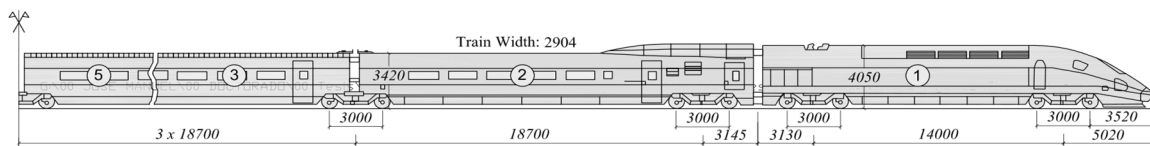
Figura 3. Tren tipo convencional ICE3. (Dimensiones en mm)



Cada vehículo consta de un coche, dos bogies y cuatro ejes, con un total de 23 g.d.l. por vehículo. Destacan dos elementos de suspensión del vehículo que no se encuentran en otros modelos de interacción tren-puente que merecen mención. El primero es la barra anti-giro en la suspensión secundaria. Se puede considerar como un muelle rotacional que restringe el giro relativo en el eje x (eje longitudinal de la vía) entre el coche y el bogie con una rigidez k_{RX2} . El segundo elemento es un dispositivo anti-lazo, ubicado también en la suspensión secundaria del vehículo. Este elemento restringe el giro relativo en el eje vertical entre el coche y un bogie en el vehículo. Las características mecánicas del tren, parámetros geométricos y de las constantes de rigidez, de amortiguamiento y de masa se detallan en los documentos de (Olmos & Ástiz, 2023), (Nguyen, 2013) y (Doménech, 2014).

Tren tipo articulado, RENFE S-100 (Thalys S-100 - Alstom) fue descrito en estudio previo (Olmos & Astiz, 2018b). Tiene una composición formada por 10 vehículos, dos locomotoras, dos coches de transición con pasajeros y 6 coches de pasajeros (Figura 4).

Figura 4. Tren tipo articulado Thalys. (Dimensiones en mm)

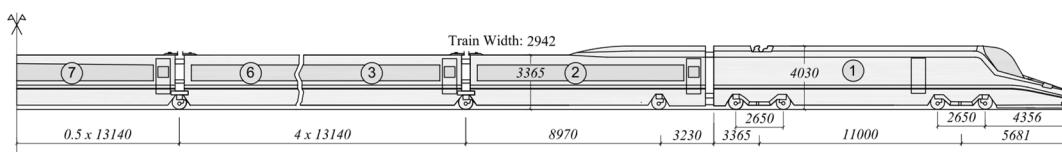


El modelo 3D multi-body de este tren está formado por una serie de coches, bogies y ejes, considerados como cuerpos rígidos, unidos entre sí mediante los sistemas de suspensión del tren. El sistema de suspensión primaria que une los ejes con los bogies del vehículo mediante un sistema de muelles lineales y amortiguadores viscosos, dispuestos en dirección vertical y horizontal. La suspensión secundaria que une los bogies con los coches, también utiliza el mismo tipo de dispositivos (muelles y amortiguadores) que aparecen en la suspensión primaria. (Olmos & Astiz, 2018b), p.68. Cada locomotora tiene 23 g.d.l., cada vehículo articulado tiene 14 g.d.l. (5 del coche, 5 del bogie y 4 de los dos ejes de ese bogie), hay 9 g.d.l. adicionales correspondientes a los 5 del segundo bogie del último vehículo articulado y 4 de sus dos ejes.

La geometría, las constantes de rigidez y amortiguación de las suspensiones y las constantes de masa de los cuerpos rígidos de este tren se encuentran en la literatura científica, como en los trabajos de (Kwark, 2004), (Song, 2003) y (Lee, 2009)). Por otro lado, los modos y frecuencias de vibración pueden consultarse en (Olmos, 2015).

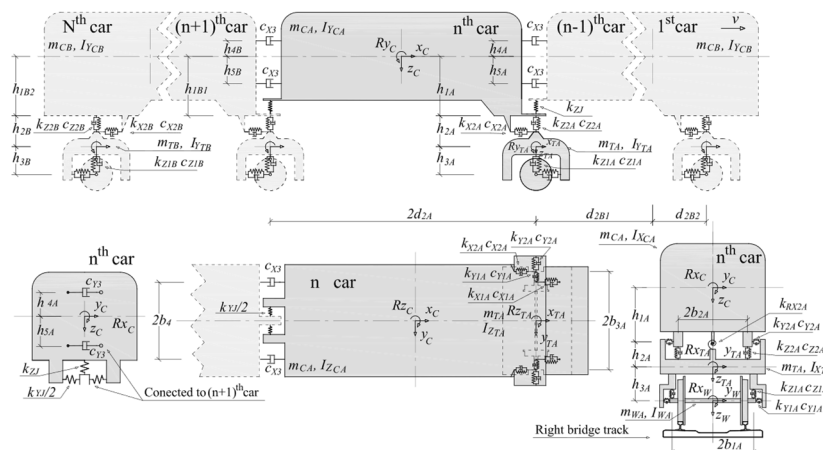
El estudio del **Tren tipo regular, RENFE S-130 (Talgo 250)** representa un avance significativo en la investigación sobre seguridad del tráfico ferroviario en puentes. Hasta la tesis de máster de (Paunova, 2023), no se han encontrado estudios previos sobre este tipo específico de trenes. Es el tren más ligero de los tres estudiados, y consta de 13 vehículos (Figura 5): dos locomotoras, dos coches de transición con pasajeros y 9 coches de pasajeros. Las locomotoras son similares a las del tren articulado, con la diferencia en de las distancias entre ejes de ruedas. Los vehículos nº 2 y nº 12, o tipo B, son de tipo articulado, pero con solo un par de ruedas en los bogies. Y todos los vehículos tipo A, desde del nº 3 al nº 11, comparten bogie con el vehículo siguiente, y en el eje de su bogie hay solo un par de ruedas.

Figura 5. Tren tipo regular Talgo 250. (Dimensiones en mm)



El modelo 3D multi-body de este tren está formado por una serie de coches, bogies y ejes, considerados como cuerpos rígidos que están unidos entre sí mediante los sistemas de suspensión del tren (Figura 6). El tren cuenta con 23 g.d.l. de cada locomotora, 12 de cada vehículo articulado (5 del coche, 5 del bogie y 2 del eje de ese bogie), a los que hay que sumar 7 g.d.l. más correspondientes a los 5 del segundo bogie del último vehículo articulado y 2 de su eje. En el modelo multi-body, los vehículos nº 2 a nº 12 del convoy además de compartir bogie, están unidos con los coches vecinos por amortiguadores dispuestos en las direcciones longitudinal y transversal del tren. (Paunova, 2023) pag.96).

Figura 6. Modelo multi-body de la parte articulada del tren RENFE S-130 (Talgo 250)



Para la obtención de las expresiones analíticas de las matrices de la Ec. de movimiento de este tren, ha sido necesario plantear las ecuaciones de equilibrio dinámico de Newton-Euler a los cuerpos rígidos del mismo. Ya que la formulación de los sistemas multi-body de los trenes regulares, como el estudiado, no se ha encontrado en la literatura científica. Para caracterizar mecánicamente este tren, se han utilizado valores publicados sobre la geometría y la masa de los cuerpos rígidos de este tren. Sin embargo, al no encontrar publicados los valores de las características mecánicas de las suspensiones de este tipo de tren en la literatura científica, estos valores se han deducido de las propiedades mecánicas del tren articulado. Por lo tanto, este modelo de tren puede no reproducir adecuadamente la respuesta de un tren real. De todas formas, se ha considerado interesante el estudio de este tipo de tren que es el más ligero, y por lo tanto, puede presentar mayores problemas de circulación durante un sismo.

3.3 Ecuaciones dinámicas del sistema tren-puente sometido a sismo

Cuando el modelo de elementos finitos del puente y el modelo multi-body de los trenes se utilizan para describir el comportamiento dinámico de trenes y puentes sometidos a movimientos sísmicos no uniformes del terreno en los apoyos (pilares) del puente, las ecuaciones de movimiento dinámico del sistema tren-puente pueden expresarse como en las Ec. (1) y Ec. (2).

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_b & \mathbf{M}_{bs} \\ \mathbf{M}_{sb} & \mathbf{M}_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{u}}_b(t) \\ \ddot{\mathbf{u}}_s(t) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_b & \mathbf{C}_{bs} \\ \mathbf{C}_{sb} & \mathbf{C}_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{u}}_b(t) \\ \dot{\mathbf{u}}_s(t) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_b & \mathbf{K}_{bs} \\ \mathbf{K}_{sb} & \mathbf{K}_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{u}_b(t) \\ \mathbf{u}_s(t) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{F}_{bv}(\mathbf{u}_b, \dot{\mathbf{u}}_b, \ddot{\mathbf{u}}_b, \mathbf{u}_v, \dot{\mathbf{u}}_v, t) \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

$$\mathbf{M}_v \cdot \ddot{\mathbf{u}}_v(t) + \mathbf{C}_v \cdot \dot{\mathbf{u}}_v(t) + \mathbf{K}_v \cdot \mathbf{u}_v(t) = \mathbf{F}_{vb}(\mathbf{u}_b, \dot{\mathbf{u}}_b, \mathbf{u}_v, \dot{\mathbf{u}}_v, t) \quad (2)$$

En estas ecuaciones, se adopta el sistema de coordenadas global absoluto. v es subíndice del subsistema de tren, b el del subsistema de la superestructura del puente, y s es el subíndice que denota los apoyos del puente en el terreno. F_{vb} y F_{bv} son las fuerzas de interacción tren-puente que actúan sobre los subsistemas de tren y puente respectivamente. $\ddot{u}_k(t)$, $\dot{u}_k(t)$ y $u_k(t)$ son vectores de la aceleración, la velocidad y el desplazamiento según los g.d.l. considerados en el modelo del tren ($k = v$) y en el modelo de puente ($k = b$)

convenientemente dispuestos. M_k, C_k y K_k son las matrices constantes de masa, amortiguamiento y rigidez del sistema dinámico del vehículo ($k = v$), sistema de superestructura de puente ($k = b$), o los apoyos del puente en el terreno ($k = s$). Los vectores $\ddot{u}_s(t)$, $\dot{u}_s(t)$ y $u_s(t)$ contienen los movimientos sísmicos verticales y horizontales del terreno en las pilas del puente durante un terremoto.

Cuando la Ec.(1) se resuelve usando el método de solución directa (Xia, 2018), el primer término en el lado izquierdo de la ecuación se expande, se desprecian los términos de masa y amortiguamiento del lado derecho y la ecuación de movimiento del puente en coordenadas absolutas se puede escribir como la Ec. (3).

$$M_b \cdot \ddot{u}_b(t) + C_b \cdot \dot{u}_b(t) + K_b \cdot u_b(t) = -K_{bs} \cdot u_s(t) + F_{vb}(u_b, \dot{u}_b, \ddot{u}_b, u_v, \dot{u}_v, t) \quad (3)$$

Las Ec. (1) y Ec. (3) constituyen el sistema de ecuaciones de movimiento de los sistemas tren y puente. Como el modelo de interacción rueda-carril utilizado es no lineal (Olmos & Astiz, 2018b), los vectores de fuerzas F_{vb} y F_{bv} están formados por funciones no lineales que dependen de los movimientos de los sistemas acoplados tren y puente.

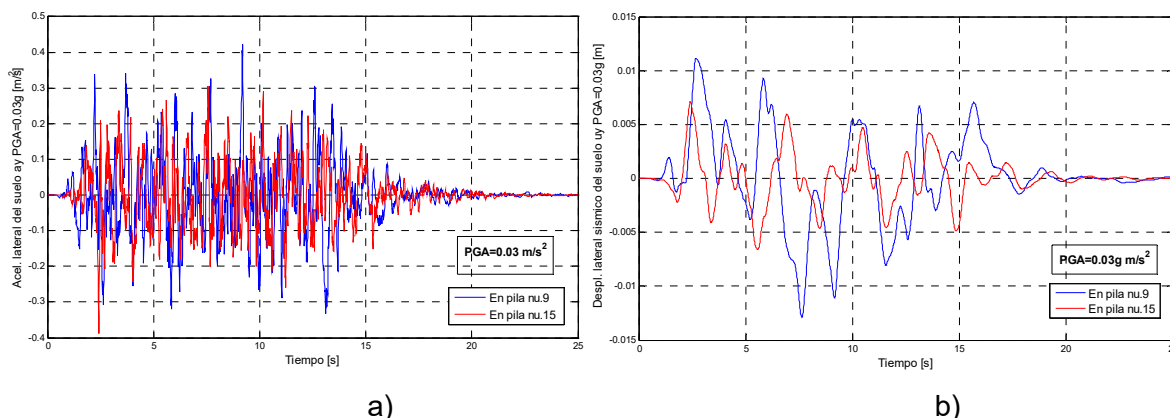
Como se ha indicado, en este estudio se utiliza el método de solución directa (Xia, 2018). Este método contempla la introducción de la excitación sísmica, en el modelo de interacción tren- puente, a partir de las series temporales de desplazamientos del terreno en cada apoyo del puente (pilas y estribos). En la Ec. (3), $-K_{bs} \cdot u_s(t)$ son las cargas sísmicas aplicadas directamente sobre los nodos del modelo de elementos finitos del puente adyacentes a la base de cada pila, en forma de fuerzas y momentos flectores concentrados.

3.4 Simulación de cargas sísmicas

El procedimiento para generar movimientos sísmicos del suelo considerando la variación espacial de la acción sísmica, ha sido abordado en estudios previos, dando lugar a series temporales de aceleraciones y desplazamientos del suelo en cada apoyo de este puente (J. M. Olmos & Astiz, 2023). El proceso se basa en el método de representación espectral incorporando funciones de modulación. El algoritmo genera historias temporales estacionarias de la aceleración del terreno en cada apoyo del puente, que son compatibles con una función de coherencia y una velocidad de propagación de ondas, pero no con los espectros de respuesta objetivo del Eurocódigo 8 (EN-1998-2, 2018). Estas funciones consideran la velocidad de propagación de las ondas sísmicas en la superficie del suelo, así como la pérdida de coherencia entre los movimientos del suelo en distintos puntos, obteniendo así una representación más realista del fenómeno sísmico. Para que esas funciones de densidad espectral sean compatibles con el espectro de respuesta establecido por el Eurocódigo 8, se utilizó el esquema iterativo de Deodatis.

Con el procedimiento descrito, se realizaron simulaciones de dos eventos sísmicos para obtener conjuntos de historias temporales de desplazamiento y aceleración del terreno en los apoyos del puente. Estos dos eventos sísmicos tienen intensidades, (o aceleraciones pico del terreno, PGA según sus siglas en inglés), de $PGA=0.01g$ y $PGA=0.03g$ respectivamente. Siendo g la aceleración de la gravedad.

**Figura 7. a) Aceleraciones lateral sísmicas del suelo en pila n.9 y pila n.15, PGA=0.03g m/s².
b) Desplazamientos laterales sísmicos del suelo en pila n.9 y pila n.15, PGA=0.03g m/s²**



En la Figura 7 a), las amplitudes de las aceleraciones del suelo en pila 9 fueron mayores que las de la pila 15. En la Figura 7 b), las amplitudes de los desplazamientos del suelo en el apoyo 10 del puente (pila 9), fueron mayores que las del apoyo 16 (pila 15). Esto se debió a que el terreno en la pila 15 era menos rígido que en el de la pila 9 del puente, y por lo tanto, los espectros de respuesta correspondientes en estos dos lugares eran diferentes. En estas gráficas puede observarse el efecto de la existencia de diferentes tipos de terreno en este movimiento sísmico espacialmente variable del terreno. Por otra parte, en la gráfica de la Figura 7 b), también puede observarse el efecto de paso de ondas. El desplazamiento sísmico del suelo comenzó antes en la pila 9 que en pila 15.

3.5 Implementación del sistema dinámico tren-puente

La implementación y solución numérica del modelo de interacción dinámica tren-puente utilizado en este estudio se ha descrito en un trabajo anterior de los autores:

Se escribió un código de software (Interaction Railway Bridges V1.0) en lenguaje MATLAB. Este código usa las matrices el sistema de ecuaciones puente... obtenido con el software ANSYS, construye el resto de la ecuación de movimiento del puente y la ecuación de movimiento del tren completa... y resuelve numéricamente el problema.

Para calcular numéricamente las soluciones de los sistemas de ecuaciones no lineales y obtener las respuestas del tren y del puente en el dominio del tiempo (movimientos) bajo la acción sísmica, se utilizó un procedimiento iterativo y eficiente que combina el θ -método de paso de tiempo de Wilson (diferencias finitas) y el método de Newton-Raphson. Este método iterativo resuelve las ecuaciones de movimiento del puente y del tren por separado en cada paso de tiempo del análisis. (Olmos & Astiz, 2018a), p. 375-376).

3.6 Amortiguadores de masa sintonizados

Para mejorar la respuesta dinámica del puente *Arroyo de las Piedras* bajo la acción de trenes y sismos, se ha introducido en el modelo dinámico de elementos finitos del puente un AMS horizontal en la cabeza de cada pila. Estos dispositivos consisten en una masa sujeta a la cabeza de la pila correspondiente del puente mediante un muelle. Esta masa puede oscilar en la dirección transversal del puente. La masa del AMS j se calculó como el 1% de la masa estructural y no estructural del tramo del tablero que carga la pila j , más el 1% de la masa de la mitad superior de la pila j . La rigidez del muelle del AMS se calcula de forma que el AMS tenga la misma frecuencia de vibración lateral que la principal frecuencia de vibración lateral de la cabeza de la pila correspondiente, determinada previamente. De esta forma los AMS quedan sintonizados con el movimiento de las pilas donde se instalan.

La masa de los AMS se podría materializar con un sólido de fundición con las dimensiones aproximadas de un cubo de 1.82 m de lado.

4. Resultados

4.1 Simulaciones de los trenes viajando sobre el puente bajo la acción de un sismo moderado, con y sin AMS

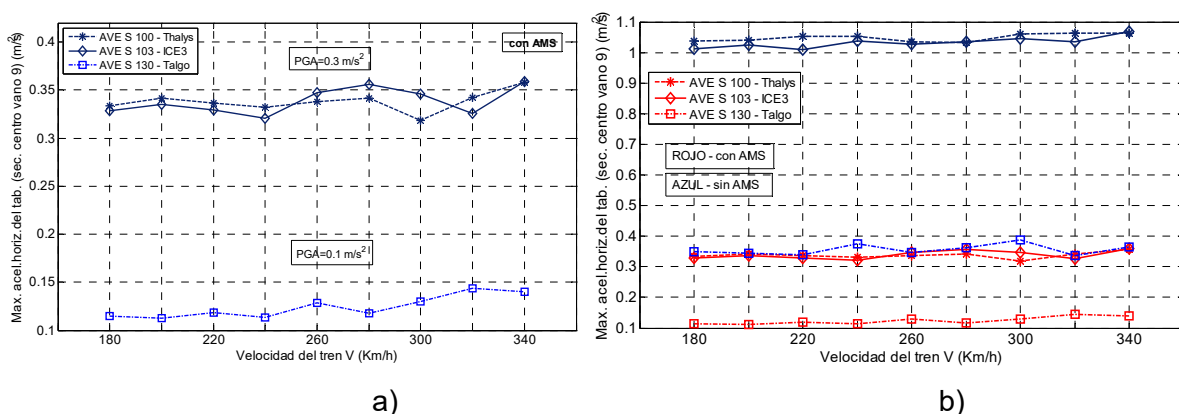
Para los análisis de seguridad del tráfico, se han realizado varias simulaciones o viajes de los trenes sobre el puente en eventos sísmicos. Se han realizado simulaciones con los trenes viajando sobre el puente, y sobre el puente mejorado con los AMS. Se ha estudiado la respuesta de los trenes (máximas aceleraciones laterales y máximos factores de seguridad de tráfico) y la respuesta del puente (máximas aceleraciones y desplazamientos horizontales del tablero). En las simulaciones, los trenes han viajado a las siguientes velocidades 180, 200, 220, 240, 260, 280, 300, 320 y 340 km/h. Para cada velocidad de viaje de los trenes sobre el puente (con y sin AMS), se han probado sismos moderados de aceleración máxima del suelo $PGA=0.01g$ y $PGA=0.03g$. Todos los viajes del tren convencional (ICE3) y del tren articulado (Thalys) se han simulado con el sismo de intensidad $PGA=0.03g = 0.3 \text{ m/s}^2$. Mientras que el viaje del tren regular (Talgo) se ha simulado con el sismo de intensidad $PGA=0.01g = 0.1 \text{ m/s}^2$.

El sismo comienza en el momento en el que el tren entra en el puente, y la simulación termina cuando el último vagón del tren sale del puente. De esta forma, el puente es excitado por el sismo cuando el tren está en él. Además, para todas las velocidades de los trenes probadas, el tren tiene ejes dentro del puente al menos entre el segundo 2,5 y el segundo 15 de los sismos. En este intervalo de tiempo es donde los sismos generados son relevantes (Figura 7).

4.2 Respuesta del puente

En la respuesta del puente se ha analizado la máxima aceleración lateral horizontal y el máximo desplazamiento horizontal del tablero en dos secciones del tablero del puente. Estas secciones son la sección del centro del vano 9, y la sección de apoyo en la pila 9. Y se han comparado los movimientos obtenidos en las secciones mencionadas del tablero del puente, en las simulaciones realizadas, considerando los AMS instalados en el puente o no instalados.

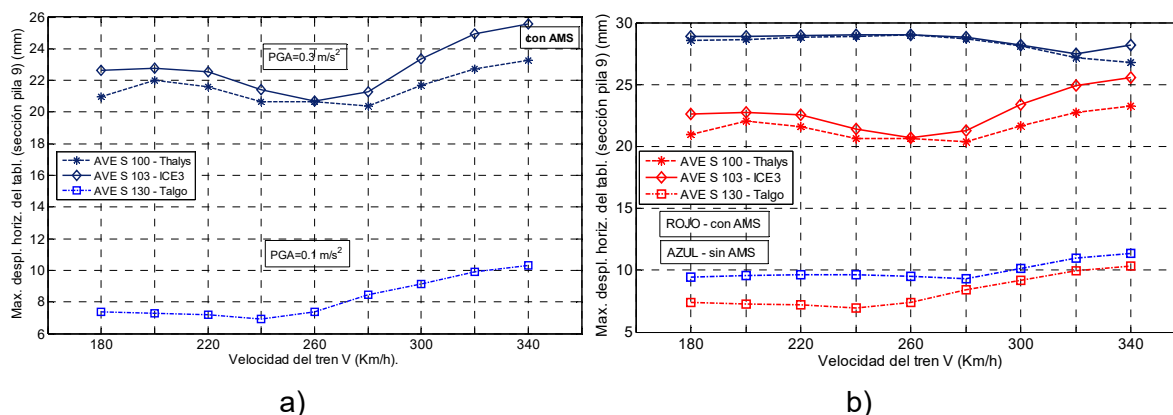
Figura 8. Máxima aceleración horizontal del tablero, sección centro vano 9 [m/s^2]: a) solo con AMS; b) comparativa con y sin AMS



De la Figura 8 a) se puede observar que la aceleración horizontal del tablero en la sección del centro del vano 9 del puente, mejorado con AMS, depende de la intensidad del sismo. El viaje del tren regular (Talgo) provoca una aceleración máxima del tablero de aproximadamente 0.14 m/s^2 , mientras que los viajes de los trenes convencional (ICE3) y articulado (Thalys) provocan

una aceleración máxima del tablero de aproximadamente 0.36 m/s^2 . Parece que la velocidad de los trenes no tiene influencia en la aceleración horizontal del tablero. En la Figura 8 b), claramente se aprecia la mejora de la respuesta del puente con AMS. Con el sismo de $\text{PGA}=0.03\text{g}$, con el que viajan los trenes convencional y articulado, el uso de AMS reduce la aceleración lateral del tablero en casi 0.7 m/s^2 . Y con el sismo de $\text{PGA}=0.01\text{g}$, con el que viaja el tren regular, los AMS instalados en la cabeza de las pilas del puente consiguen reducir la aceleración lateral del tablero en 0.2 m/s^2 .

Figura 9. Máximo desplazamiento horizontal del tablero, sección pila n.9 [m/s²]: a) solo con AMS; b) comparativa con y sin AMS



En la Figura 9 a), se puede observar que el desplazamiento horizontal del tablero del puente depende de la intensidad del sismo. El viaje tren regular provoca un desplazamiento máximo del tablero de aproximadamente 10 mm, mientras los trenes convencional y articulado de aproximadamente 25 mm. Parece que la velocidad de los trenes no tiene mucha influencia en el desplazamiento horizontal del tablero. En la Figura 9 b), claramente se observa la mejora de la respuesta del puente con AMS, tanto con el sismo de $\text{PGA}= 0.03\text{g}$ con el que viajan los trenes convencional y articulado, como con el sismo de $\text{PGA}=0.01\text{g}$, con el que viaja el tren regular.

4.3 Respuesta de los trenes

En la Figura 10, las gráficas de aceleraciones laterales máximas de las locomotoras del tren Thalys y del ICE3 presentan picos cuando estos trenes viajan a 280 km/h. A esa velocidad se produce un fenómeno de resonancia debido a la interacción entre el vehículo y el puente excitado por el terremoto. Cuando la velocidad del tren es $v = 280 \text{ km/h}$ ($77,77 \text{ m/s}$), la aceleración lateral de la locomotora es mayor. Una explicación de este fenómeno puede ser que a $77,77 \text{ m/s}$ el movimiento lateral de la locomotora, con una frecuencia de $\text{Fr} = 0,643 \text{ Hz}$ en el caso del tren Thalys, y de $\text{Fr}=0,613 \text{ Hz}$ en el caso del tren ICE3, tiene una longitud de onda ($L = v/\text{Fr}$) de $L = 121 \text{ m}$ (ó 127 m) que coincide aproximadamente con la longitud de onda del modo de vibración número 43 del puente (Figura 11).

En la respuesta de los trenes, también se ha analizado el máximo factor de descarrilamiento y el índice de fuerza lateral máxima del par de ruedas (eje)-vía (índice Prud'Homme), bajo diferentes intensidades de sismo, con y sin implementación de los AMS.

Figura 10. Aceleraciones laterales máximas de las locomotoras de los trenes

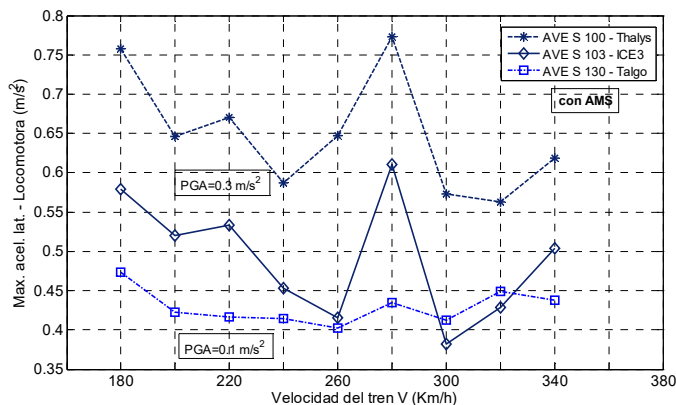
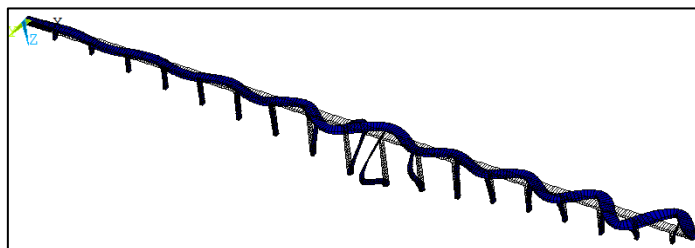


Figura 11. Modo de vibración nº 43. Fr = 2.99 Hz



Como podemos observar en las gráficas de la Figura 12, todos los trenes están fuera de peligro de descarrilamiento, y el factor de descarrilamiento está muy por debajo del valor límite recomendado que es 0.8, cuando están viajando sobre puente con AMS. Solamente el tren articulado (Thalys) muestra riesgo de descarrilamiento, a partir de velocidad de 280 km/h cuando viaja por el puente sin los AMS instalados. El tren regular (Talgo) muestra peor comportamiento según este factor de descarrilamiento, a pesar de que este tren ha sido ensayado con el sismo de menos intensidad ($PGA=0.01g$).

En la Figura 13 se puede observar que el índice PH cumple con el criterio de seguridad ($PH < 1$) para los tres tipos de trenes, tanto con AMS instalados en el puente como sin su instalación. Los AMS consiguen reducir la respuesta de los trenes en este índice de seguridad de tráfico. La velocidad del tren si parecen tener influencia en este índice de PH. En la Figura 13 b), se aprecia que conforme aumenta la velocidad de los trenes va aumentando el valor de este índice. El tren regular muestra peor comportamiento que los otros dos trenes también en este índice de seguridad del tráfico.

5. Conclusiones

Se ha abordado la evaluación de la seguridad del tráfico de tres tipos de trenes de alta velocidad que están viajando sobre el viaducto *Arroyo de las Piedras* con y sin amortiguadores de masa sintonizados instalados en sus pilas bajo la acción de sismos moderados.

- Para los viajes de los trenes sobre el puente sin la instalación de AMS, se han obtenido resultados de simulaciones numéricas para sismos moderados espacialmente variables. Los viajes del tren convencional y el tren articulado han sido simulados con sismos de intensidad $PGA=0.03g$ m/s^2 , mientras los del tren regular se han simulado con sismo de intensidad $PGA=0.01g$ m/s^2 . De todos los viajes de los trenes, el único que muestra riesgo en la seguridad del tráfico es el tren articulado para velocidades superiores de 280 km/h.

Figura 12. Máximo factor de descarrilamiento: a) Tren completo solo con AMS; b) Tren completo comparado con y sin AMS; c) Coches de pasajeros + coches de transición; d) Locomotora; e) Coches de pasajeros; f) Coches de transición

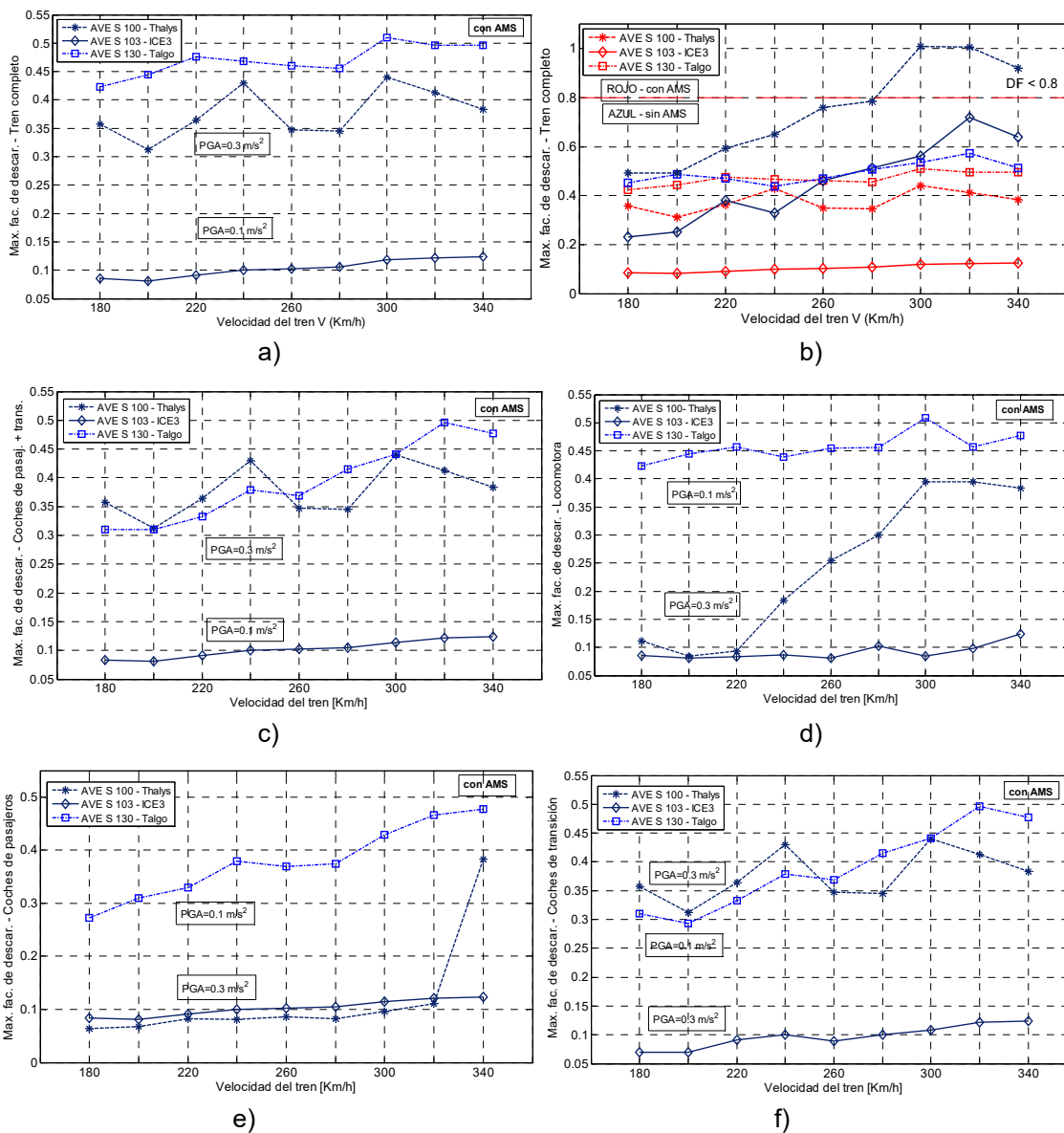
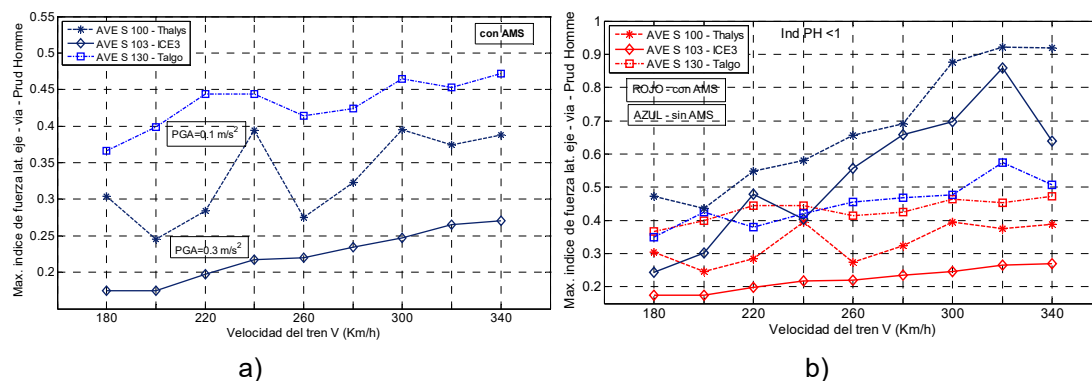


Figura 13. Máximo índice de fuerza lateral de eje – vía (Prud'Homme): a) solo con AMS; b) comparativa con y sin AMS



- Los factores que más afectan a la seguridad del tráfico durante la acción de un sismo moderado son la intensidad del sismo, la velocidad de los trenes y el tipo de vehículo. Los vehículos que presentaron un peor comportamiento ante los sismos al viajar por el puente estudiado fueron los coches de transición en los trenes articulado y regular. El momento más crítico para la seguridad del tráfico durante un sismo se produce cuando los coches de transición de un tren entran en el puente.
- La mejora de las respuestas de los trenes y del puente es notable cuando se utilizan AMS en las pilas del puente. Es importante destacar que, a pesar de que la respuesta del tren regular ha sido analizada con sismos moderados de menor intensidad que los utilizados para los otros dos trenes, la mejora en el comportamiento de este tren debido a los AMS es muy pequeña en comparación con la de los otros dos trenes. Esto se puede atribuir a que el tren regular es el más ligero de todos, lo que le confiere menor inercia y se ve más afectado por cargas sísmicas incluso y con menor intensidad de sismo.
- El uso de amortiguadores de masa sintonizados horizontales en el puente ha demostrado ser altamente efectivo para disminuir la respuesta dinámica del puente:
 - Disminuye significativamente las aceleraciones laterales y el desplazamiento del tablero en todas sus secciones (y secciones de centro de vano y secciones en pilas), y por lo tanto, éste transmite una menor excitación al vehículo a través de las fuerzas de contacto. Al disminuir las fuerzas de contacto eje-vía, mejoran los índices de seguridad del tráfico.
 - Permite que los tres tipos de trenes de alta velocidad estudiados circulen a 340 km/h por un viaducto alto en condiciones de seguridad, cuando actúa un sismo moderado con $PGA=0.03g \text{ m/s}^2$ (para el tren articulado y el convencional) y $PGA=0.01g \text{ m/s}^2$ (para el tren regular). El viaje del tren convencional, a esa velocidad (340 km/h), es seguro sin necesidad de instalar en el puente los AMS. El viaje del tren articulado, a esa velocidad (340 km/h), no es seguro cuando actúa un sismo de $PGA=0.03g \text{ m/s}^2$, si el puente no tiene instalados los AMS. Este tren sólo podría soportar sismos con $PGA=0.03g \text{ m/s}^2$ cuando viaja por un viaducto alto a una velocidad de hasta 280 km/h. El viaje del tren regular, a esa velocidad (340 km/h), es seguro bajo la acción de un sismo con $PGA=0.01g \text{ m/s}^2$ sin que el puente tenga instalados los AMS.
- Este estudio ha identificado resonancias en las aceleraciones laterales de los vehículos, manifestadas como un ligero aumento en el movimiento del tren a ciertas velocidades, subrayando la importancia de considerar tales fenómenos en el diseño y operación de sistemas ferroviarios en áreas sísmicas.
- A pesar de los resultados de este estudio, es conveniente mencionar que la probabilidad de que en España suceda un sismo moderado en el emplazamiento de un puente alto de una línea de alta velocidad al mismo tiempo que pasa un tren por dicho puente es prácticamente despreciable con las frecuencias actuales de circulación de esos trenes (Olmos & Ástiz, 2023).
- A pesar de que el complejo modelo de contacto rueda-carril empleado en este estudio tiene en cuenta varias de las no linealidades que intervienen en la interacción de estos dos elementos, no es capaz de reproducir el despegue de la rueda del carril, teniendo que parar la simulación numérica cuando esto se va a producir. Para futuros trabajos se construirá un modelo de interacción rueda-carril que reproduzca también este fenómeno.

Referencias

- Doménech, A. (2014). *Influencia del modelo de vehículo en la predicción del comportamiento a flexión de puentes isostáticos de ferrocarril para tráfico de alta velocidad*, Ph.D. thesis. Valencia: , Universidad Politécnica de Valencia.
- EN-13848-5. (2009). Railway applications – Track – Track geometry quality – Part 5: Geometric quality assessment, European Committee for Standardization. . Brussels.
- EN-1998-2. (2018). *UNE-EN 1998-2:2018 Eurocódigo 8: Proyecto de estructuras sismorresistentes. Parte 2: Puentes*. AENOR.
- Fryba, L. (1996). *Dynamics of Railway Bridges*.
- Kalker, J. J. (1991). Wheel-rail rolling contact theory. *Wear* 144, 243–26.
- Kwark, J. W. (2004). Dynamic Behavior of Two-Span Continuous Concrete Bridges under Moving High-Speed Train. *Computers & Structures* 82 (4), 463–74.
- Lee, Y. S. (2009). Structural Analysis of 3D High-Speed Train–Bridge Interactions for Simple Train Load Models. *Vehicle System Dynamics* 48 (2), 263–81.
- Millanes, F. M., Santos, J. P., & Cornejo, M. O. (2007). Arroyo Las Piedras” Viaduct: The First Composite Steel-Concrete High Speed Railway Bridge in Spain. *Structural Engineering International* 17-4, 292–97 .
- Nguyen, K. (2013). *Efectos dinámicos debidos al tráfico de ferrocarril sobre la infraestructura de vía y las estructuras*, Ph.D. thesis. E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos (UPM). .
- Olmos, J. M. (2015). Estudio de la respuesta dinámica transversal de viaductos altos de líneas de ferrocarril de alta velocidad bajo la acción de las cargas de uso.
- Olmos, J. M., & Astiz, M. A. (2018a). Improvement of the lateral dynamic response of a high pier viaduct under turbulent wind during the high-speed train travel. *Engineering Structures, Volume 165*, 368-385.
- Olmos, J. M., & Astiz, M. Á. (2018b). Non-linear vehicle-bridge-wind interaction model for running safety assessment of high-speed trains over a high-pier viaduct. *Journal of Sound and Vibration, Volume 419*, 63-89.
- Olmos, J. M., & Ástiz, M. A. (2023). Response of a high-speed train travelling over a long and high-pier viaduct during moderate earthquakes. *Bull Earthquake Eng* 21, 2369–2407, <https://doi.org/10.1007/s10518-022-01579-6>.
- Paunova, S. (2023). Estudio de la influencia del tipo de tren de alta velocidad en el riesgo de descarillamiento sobre un viaducto durante la acción de un sismo. *Universidad Politécnica de Cartagena*.
- Song, M.-K. H.-C.-K. (2003). A New Three-Dimensional Finite Element Analysis Model of High-Speed Train–Bridge Interactions. *Engineering Structures* 25 (13), 1611–26.
- Xia, H. N. (2018). *Dynamic Interaction of Train-Bridge Systems in High-Speed Railways: Theory and Applications*. Obtenido de <https://doi.org/10.1007/978-3-662-54871-4>

Comunicación alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible

