

## CARACTERIZACIÓN DE LAS VIBRACIONES PROVOCADAS POR LA CIRCULACIÓN FERROVIARIA SOBRE UN VIADUCTO

REF. PACS: 43.40.At

J. Cardona<sup>1</sup>, R. Arcos<sup>2</sup>, J. Romeu<sup>2</sup>, S. Jiménez<sup>2</sup>; A. Balastegui<sup>2</sup>

<sup>1</sup> AV Ingenieros. c/ Abat Marçet, 41 baixos. 08173 St. Cugat del Vallès (Barcelona).

Tel: 93.674.31.91. e-mail: [jcg@avingenieros.com](mailto:jcg@avingenieros.com)

<sup>2</sup> Laboratorio de Ingeniería Acústica y Mecánica, LEAM. Universidad Politécnica de Catalunya, UPC. c/ Colom, 11. 08222 Terrassa (Barcelona). 93.739.81.46.

### ABSTRACT

The environmental impact assessment is one of the necessary studies to develop new territorial infrastructures, with the aim of predicting their effect on the surrounding. One of the vectors of the environmental impact evaluation is the vibration effect determination, especially in new railway infrastructures. Even though, there is still no vibration prediction model available to determine it.

This paper describes a model developed to characterise a viaduct as a railway infrastructure which transmits the vibration due to the trains pass-by to the surrounding ground. This viaduct vibration radiation is analysed by a numerical simulation which considers every pier as a punctual vibration source that follows its own wave equation. These results are validated by means of ground vibration propagation experimental tests.

### RESUMEN

La determinación del impacto ambiental es uno de los estudios necesarios para el desarrollo de nuevas infraestructuras del territorio, cuyo objetivo es llevar a cabo una predicción de las afecciones sobre el entorno que provocaran dichas infraestructuras. Uno de los vectores de los estudios de impacto ambiental es la determinación del impacto por vibraciones, especialmente en lo referente a nuevas infraestructuras ferroviarias. Sin embargo, aún no existe un modelo de predicción de vibraciones que permita determinar dicho impacto.

En el presente artículo, se va a desarrollar un modelo para la caracterización de un viaducto como infraestructura sobre la cual circulan unidades ferroviarias y, por tanto, encargada de transmitir vibraciones al entorno. Para ello, se analizará la radiación de dichas vibraciones sobre el terreno adyacente mediante simulación numérica que partirá de la consideración que cada pilar del viaducto es asimilable a una fuente puntual que radia vibración según la ecuación de onda. Estos resultados teóricos se validaran mediante ensayos experimentales de propagación de vibraciones en el entorno de viaductos.

## **1.- Introducción**

Los viaductos ferroviarios representan una solución a la infraestructura utilizada para salvar topografías complejas, como son los valles, o para elevar dicha línea ferroviaria en caso que tenga que transcurrir por zonas geológicamente adversas, como pueden ser el paso de ríos así como su entorno, como es el presente caso objeto de estudio.

La generación y propagación de las vibraciones causadas por líneas ferroviarias en superficie han sido estudiadas por diferentes autores. Algunos de estos autores consideran la superestructura como una viga soportada discretamente sobre elementos elásticos que, a su vez, descansan sobre unas traviesas espaciadas cierta distancia entre ellas [1,2], por lo que se pueden considerar las traviesas como los elementos que radian la vibración hacia el terreno cuando cada uno de los ejes del tren pasan por encima de ellas. Por tanto, las traviesas se pueden considerar como fuentes puntuales de vibración [3,4].

En el caso de los viaductos, y siguiendo la tendencia comentada anteriormente, se puede considerar que cada una de las pilas supone una fuente de vibración puntual que radiará la vibración generada por el contacto rueda-carril sobre el tablero hacia el terreno adyacente. En este caso, debe tenerse en cuenta que la estructura del viaducto introducirá cierta modificación del patrón de vibración respecto al patrón de una infraestructura superficial, ya que se verá afectado por la dinámica de dicha estructura [5].

## **2.- Descripción del viaducto y el entorno**

El viaducto objeto de estudio tiene una longitud de 3.443 m y se construye para salvar el río Guadalete en lo que es el proyecto de duplicación de vía y acondicionamiento para alta velocidad de la línea Sevilla-Cádiz.

El estribo de entrada del viaducto sobre el valle del río Guadalete se sitúa sobre los niveles alterados de marga terciarias, mientras que el resto del viaducto se sitúa sobre la llanura aluvial del río con depósitos aluviales y de marisma, con espesor próximo a los 30 m, por debajo del cual se encuentra un sustrato terciario.

La estructura del viaducto es de 21 vanos, la mayor parte de ellos isostáticos aunque se alternan con un par de secciones hiperestáticas. El tablero, de 13 m de ancho, se resuelve con una solución hiperestática de 2 vigas artesa prefabricadas de 30 m de longitud, 1,9 m de altura y con una separación entre ellas de 4,30 m. La Figura 2.1 muestra una vista longitudinal del viaducto así como una sección tipo del tablero.

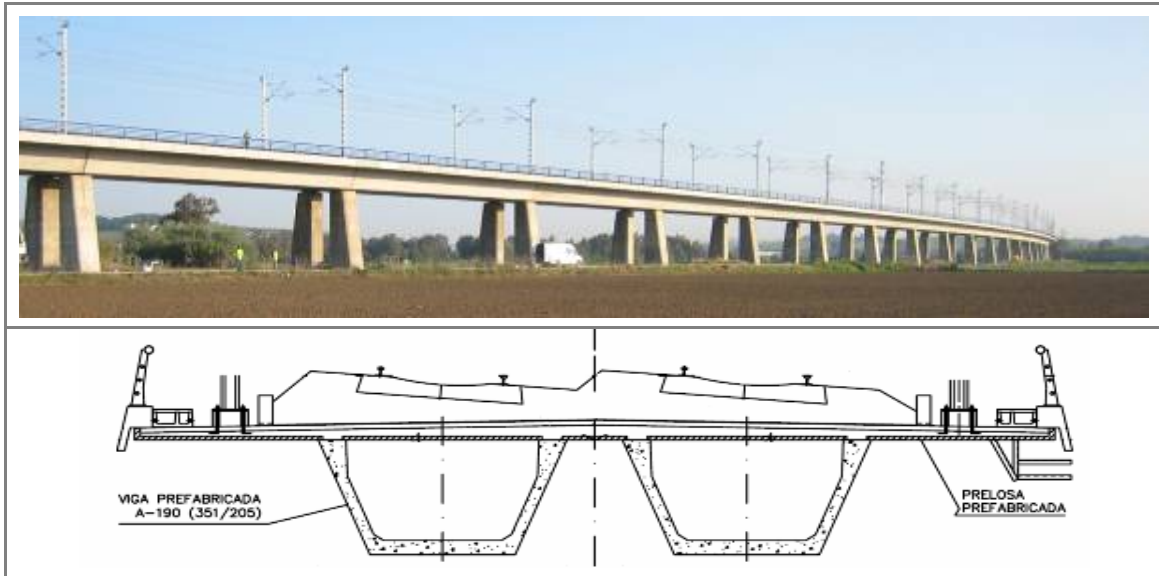


Figura 2.1. Vista longitudinal del viaducto así como sección transversal del tablero del mismo.

Las pilas sobre las que descansan las vigas artesa son dobles, de forma que cada viga descansa sobre su propia pila, de altura y geometría variable con dicha altura. Ambas pilas están unidas en su parte inferior sobre una zapata continua vista de 2,5 m de canto cuya cimentación se resuelve mediante pilotes con inclinación variable. El apoyo de las vigas sobre las pilas se resuelve mediante apoyos tipo POT. La Figura 2.2 muestra un detalle de las pilas.

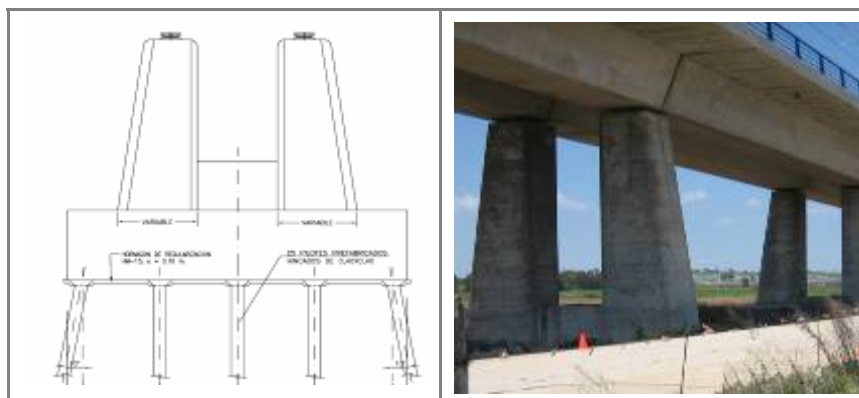


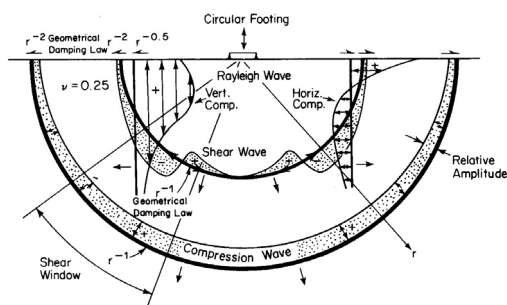
Figura 2.2. Detalle de las pilas sobre las que descansa el tablero del viaducto.

### 3.- Modelado de la propagación de vibraciones en el terreno

La vibración se propaga desde la fuente hasta el receptor a través del terreno que los une mediante ondas volumétricas (P y S) y ondas superficiales (Rayleigh y Love), por lo que los niveles de vibración en el receptor dependerán de las propiedades de la fuente (entre ellas, el tipo de infraestructura por donde circule el tren), de las propiedades del terreno y de la distancia entre fuente y receptor.

A medida que las ondas se alejan de la fuente, se produce una pérdida de energía motivada por dos mecanismos: expansión del frente de onda (atenuación geométrica) y fricción entre las partículas del terreno (atenuación material). Este último parámetro depende de las características del terreno, con lo que se deberá considerar dispersivo, mientras que el primero está directamente relacionado con la fuente de vibración.

Partiendo de la teoría de ondas para un medio infinito y de sus ecuaciones gobernantes, se determina la ecuación que define el desplazamiento en sentido vertical en la superficie de un semi-espacio homogéneo.



Ecuación básica del desplazamiento vertical:

$$w = \frac{\partial \varphi}{\partial z} - \frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} - \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial r} \quad (1)$$

Ecuaciones de onda que definen los potenciales:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = v_p^2 \cdot \nabla^2 \varphi \quad ; \quad \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = v_s^2 \cdot \nabla^2 \psi \quad (2)$$

Figura 3.1. Modelo de terreno considerado (semi-espacio infinito) así como ecuaciones de onda y genérica de desplazamiento a partir de las que se deriva la ecuación particular de desplazamiento vertical

Esta ecuación es función de la distancia a la fuente de vibración y viene definida por los términos que hacen referencia a cada uno de los tres tipos de ondas que se propagan en el terreno y que transportan la mayor parte de la energía vibratoria, siendo éstas las ondas superficiales de Rayleigh así como las volumétricas de compresión, P, y cortantes, S.

Además de la ecuación que define el desplazamiento superficial, para modelar la propagación de vibraciones deben conocerse los datos referentes al terreno por donde tiene lugar la circulación, como son las velocidades de propagación de las diferentes ondas que intervienen, la densidad del terreno y su coeficiente de Poisson.

Se implementa un código Matlab que considera lo expuesto anteriormente y que permite obtener el campo de desplazamientos en función de la frecuencia debido a la circulación de un tren de unas determinadas características de longitud y velocidad sobre un terreno determinado y considerado el viaducto como una fuente de vibración multi-puntual.

#### 4.- Medidas de vibración en el entorno del viaducto

Coincidiendo con las pruebas de carga del viaducto, previas a su entrada en servicio, se lleva a cabo una campaña de medidas experimentales de vibración en el entorno del viaducto con el objetivo de determinar su patrón de radiación de vibraciones debido a la circulación ferroviaria.

Para ello, se disponen un total de cinco acelerómetros sísmicos colocados perpendicularmente al trazado del viaducto, además de dos acelerómetros más que servirán para determinar la velocidad de circulación de los trenes de pruebas. La Figura 4.1 muestra una vista general del viaducto y de los puntos de medida utilizados.



Figura 4.1. Vista de la disposición de los acelerómetros utilizada para la caracterización de la propagación de vibraciones en el terreno generadas por la circulación ferroviaria sobre viaducto.

Como puede observarse en la figura anterior, se utilizan dos disposiciones de acelerómetros diferentes: en un primer set-up (izquierda), los acelerómetros se colocan alineados con una pila del viaducto, mientras que en el segundo set-up (derecha) los acelerómetros se disponen en la zona central de dos pilas adyacentes. De esta forma, se determinará la propagación de vibraciones en las dos secciones características para este tipo de estructuras.

La excitación del viaducto tiene lugar mediante la circulación de unidades locomotoras diesel de RENFE, utilizadas para la realización de las pruebas de carga, por las dos vías del viaducto. Dichas unidades locomotoras no remolcan ningún coche, por lo que son lo más parecido a una fuente puntual de vibración circulando por el viaducto.

## 5.- Resultados

### 5.1.- Resultados experimentales

Los resultados de las medidas de vibración muestran patrones de radiación diferentes en función de si las medidas se han realizado en una línea perpendicular a las pilas del viaducto o si éstas se han realizado colocando la línea de acelerómetros centrada entre dos pilas consecutivas, tal como puede observarse en la Figura 5.1. En esta figura se representan los resultados de las medidas sobre diferentes circulaciones de la unidad de ensayo, apreciándose la dispersión de niveles en función de la distancia al viaducto.

Los resultados experimentales de la Figura 5.1 muestran las siguientes particularidades:

- El nivel de vibración para distancias próximas al viaducto, especialmente el primer punto localizado a 4m, es más elevado en el caso de tener los acelerómetros centrados en la pila que no en el caso en que están localizados entre dos pilas consecutivas.
- Cuando se colocan los acelerómetros centrados entre dos pilas consecutivas, el nivel de vibración en los puntos situados a 10 y 4m del viaducto son muy similares, incluso algo superiores los del punto de medida a 10m. Este fenómeno viene motivado por la interferencia destructiva de las ondas a 50Hz en el punto de evaluación más próximo, tal como se puede apreciar en la Figura 5.3.
- La reducción del nivel de vibración con la distancia para el caso en que la línea de puntos de medida está centrada en la pila (izqda.), tiene un comportamiento similar a la radiación de una fuente puntual, mientras que el nivel de vibración cuando los puntos de medida se colocan entre dos pilas (derecha) sigue una ley de reducción diferente debido a la interferencia de ondas procedentes de las dos fuentes adyacentes.

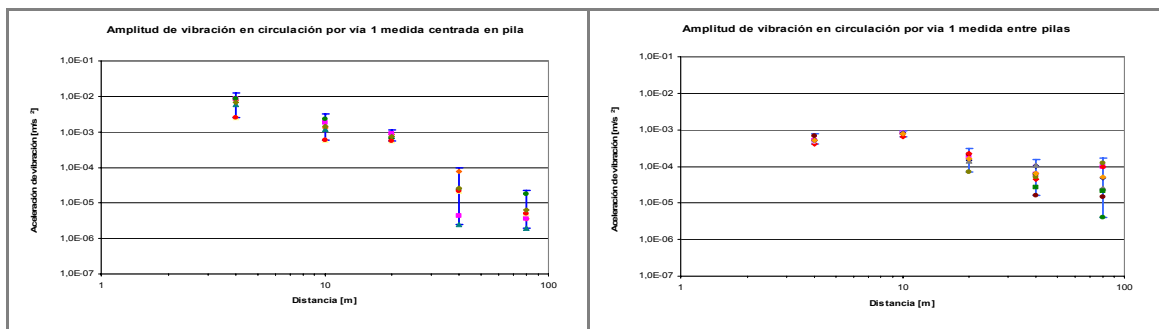


Figura 5.1. Niveles de vibración en el terreno, medidos con los acelerómetros centrados en una pila (izquierda) y con los acelerómetros entre dos pilas consecutivas (derecha).

## 5.2.- Resultados de la simulación

Los resultados simulados mediante el modelo numérico desarrollado son los que se muestran en la Figura 5.2, donde se aprecia su alta correlación con los valores experimentales medidos in situ ya presentados en el apartado anterior.

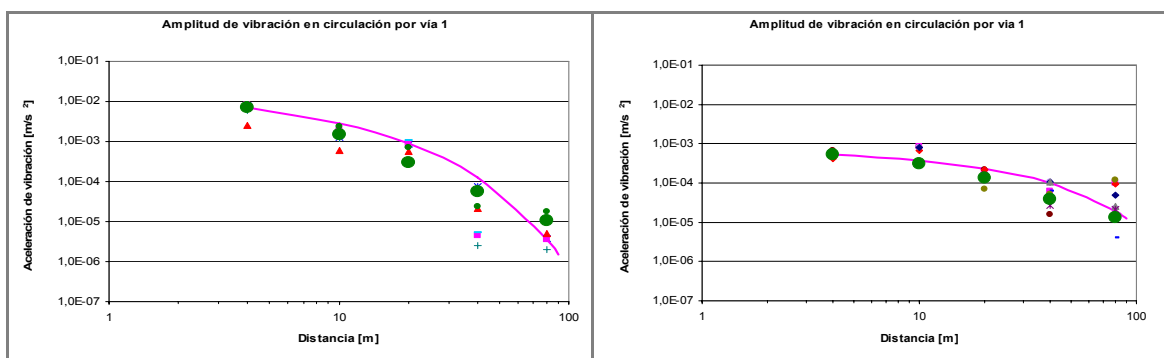


Figura 5.2. Niveles de vibración simulados (puntos en verde) respecto a los niveles medidos y a su regresión no lineal, para los dos set-up de medida llevados a cabo.

La Figura 5.3 muestra el campo de aceleraciones superficiales simuladas mediante el modelo numérico, obtenido a partir del campo de desplazamientos, en función de la distancia perpendicular y longitudinal a la infraestructura, y para la frecuencia de análisis de 50 Hz.

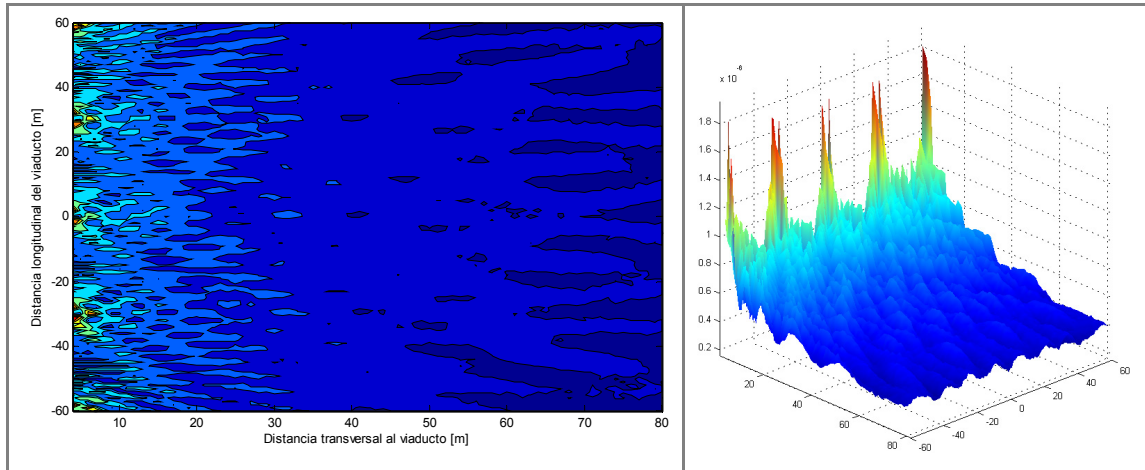


Figura 5.3. Campo de aceleraciones superficiales a 50 Hz provocadas por la circulación de una unidad locomotora diesel por un viaducto.

## 6.- Conclusiones

Los resultados presentados en la presente comunicación demuestran la validez del modelo numérico desarrollado para la predicción del campo de niveles de vibración en el terreno provocado por la circulación ferroviaria. En el caso objeto de estudio, el modelo numérico de predicción se ha desarrollado para una infraestructura del tipo viaducto y ha sido validado mediante medidas experimentales en circulación de pruebas en el viaducto sobre el Río Guadalete de la línea de alta velocidad Sevilla-Cádiz.

El modelo de predicción de la propagación de las vibraciones en el terreno permite llevar a cabo estudios predictivos de impacto por vibraciones provocadas por la explotación de este tipo de infraestructuras con la única necesidad de determinar el nivel de vibración en un punto de referencia próximo a la infraestructura, a partir del cual se aplicará el modelo predictivo.

## 7.- Agradecimientos

Los trabajos de investigación que han conducido a los resultados expuestos han sido posibles gracias a la financiación del Ministerio de Fomento a través de las ayudas a la investigación de I+D Transportes – 2005, coordinada por el Sr. Ignacio Alonso Berrioategortua, de la Dirección General de Ferrocarriles, y que ha contado con la participación empresarial de SENER, Ingeniería y Sistemas.

Agradecer también la colaboración del Sr. Juan Carlos Aceituno, de la Dirección General de Infraestructuras Ferroviarias del Ministerio de Fomento, en la documentación y coordinación de los trabajos experimentales llevados a cabo.

## **8.- Bibliografía**

- [1] X. Sheng, C.J.C Jones, D.J. Thompson. A comparison of a theoretical model for quasi-statically and dynamically induced environmental vibration from trains with measurements. *Journal of Sound and Vibration*, 267, 621-635, 2003.
- [2] The excitation of ground vibration by rail traffic: theory of vehicle-track-soil interaction and measurements on high-speed lines. *Journal of Sound and Vibration*, 284, 103-132, 2005.
- [3] A.M. Kaynia. Measurement and prediction of ground vibration from railway traffic. *Int. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 15 (3), 2105-2109, 2011.
- [4] V.V. Krylov, A.R. Dawson, M.E. Heelis, A.C. Collop. Rail movement and ground waves caused by high-speed trains approaching track-soil critical velocities. *Proc Instn Mech Engrs*, Vol 214, Part F, 107-116, 2000.
- [5] H. Takemiya, X.C. Bian. A. Shinkansen high-speed train induced ground vibrations in view of viaduct-ground interaction. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 27, 506-520, 2007.