

## ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO VIBRATORIO DE DIFERENTES TIPOLOGÍAS DE VÍA EN ÁMBITO URBANO EN LA LÍNEA 4 DEL TRANVÍA DE ALICANTE

Vicente Puig Garcés<sup>1</sup>  
Miguel Ramos Carrera<sup>2</sup>  
Julia Real Herráiz<sup>3</sup>  
Pablo Martínez Fernández<sup>4</sup>  
Laura Montalbán Domingo<sup>5</sup>  
Alberto Galisteo Cabeza<sup>6</sup>  
Antonio Villanueva Segarra<sup>7</sup>

<sup>1,2</sup>GTP, Pda. Xirivelleta s/n, 46014 Valencia.

<sup>3,4,5,6</sup>Universidad Politécnica de Valencia. Dpto. de Ingeniería e Infraestructura de los Transportes. Camino de Vera s/n, 46022 Valencia.

<sup>7</sup>INECO, Roger de Lauria, 19, 4º B, Edificio Park, 46002 Valencia.

E-mail: <sup>1</sup>puig\_vicgar@gva.es; <sup>2</sup>ramos\_mig@gva.es; <sup>3</sup>jureaher@tra.upv.es;  
<sup>4</sup>pabmarfe@cam.upv.es; <sup>5</sup>laumondo@cam.upv.es; <sup>6</sup>algaca@cam.upv.es;  
<sup>7</sup>antonio.segarra@ineco.es

**Resumen:** El presente artículo detalla la campaña de mediciones realizada por la Universidad Politécnica de Valencia en la línea 4 de la red de Tranvía de Alicante. Dicha campaña tiene como objeto estudiar el comportamiento vibratorio de las diferentes tipologías y elementos específicos instalados en la red para así obtener conclusiones válidas sobre la eficacia de cada uno de ellos. En el artículo se expone la planificación de la campaña, los sensores y esquemas de medición empleados y el procesado de datos realizado. Los principales resultados obtenidos son analizados en profundidad, siendo el más notable la superioridad de la tipología de vía en placa respecto a la vía verde en términos de mitigación de vibraciones.

**Palabras clave:** Vibraciones, tranvía, vía en placa, vía verde

**Abstract:** This paper details the measurement campaign carried out by the Universidad Politécnica de Valencia in the line 4 of Alicante's Tram Network. This campaign aims to study the behaviour of different track typologies and elements with regards to vibration so as to assess their efficiency. The paper shows the campaign planning, the sensors used and the measurement and processing schemes adopted. The main results are thoroughly discussed, being the most relevant a clear superiority of the slab track typology when compared to the green track in terms of vibration alleviation.

**Keywords:** Vibrations, tram, slab track, green track.

## 1. Introducción

Hoy en día el ferrocarril se encuentra en auge como medio de transporte tanto a nivel urbano como interurbano debido a su reducido impacto ambiental, elevada capacidad y otra serie de ventajas. Sin embargo, como cualquier otro medio de transporte, el ferrocarril genera una serie de externalidades que deben ser tenidas en cuenta. En el ámbito urbano las más notables son el ruido y las vibraciones.

En este contexto, el presente artículo pretende exponer la campaña de mediciones realizada en la red de Tranvía de Alicante en el marco del proyecto de investigación TRAVIESA (TRANsmisión de VIBraciones al entorno: EStrategias, tecnologías y materiales para su Atenuación). Este proyecto ha sido posible gracias a su aprobación por parte del Ministerio de Fomento y a la financiación proporcionada por el Ministerio de Ciencia e Innovación. Su motivación es estudiar la generación de vibraciones en el ámbito del ferrocarril urbano, su propagación a través del terreno y su afección a edificaciones colindantes.

En el marco de dicho proyecto, la campaña de mediciones realizada tiene como objetivo recabar datos reales que permitan estudiar el fenómeno a nivel de vía y evaluar el comportamiento de diferentes tipologías presentes en la red y de ciertos elementos específicos de mitigación. Estos datos servirán de base para el posterior desarrollo de modelos matemáticos y el diseño de nuevos sistemas de mitigación.

La campaña consiste en la toma sistemática de registros de aceleración en diferentes puntos de la vía al paso de los vehículos durante jornadas completas. Para ello se emplean acelerómetros triaxiales, cuyos registros son posteriormente filtrados y procesados. De los espectros de vibración así obtenidos se estudia el fenómeno de vibración en función del tipo de vía, velocidad del vehículo, etc.

## 2. Ámbito de estudio

El ámbito de estudio del presente artículo es la línea 4 de la Red de Tranvía de Alicante, construida por GTP<sup>1</sup> y operada por FGV<sup>2</sup>, y más concretamente el llamado bucle de San Juan. Cabe mencionar que la implicación de ambos entes públicos ha sido de vital importancia para la correcta realización de la campaña de mediciones así como de otras actividades asociadas al proyecto TRAVIESA. Además, es de destacar la preocupación de GTP por instalar en este tramo una gran variedad de tipologías y elementos específicos de atenuación de vibraciones, lo que lo convierte en un lugar de gran interés para el estudio del fenómeno vibratorio.

Dentro del bucle de San Juan se monitorizan varias secciones diferentes atendiendo a dicha variedad de tipologías y elementos. De todas ellas, a continuación se describen las que constituyen el ámbito de los análisis recogidos en el presente artículo:

### Sección B1

La primera sección se encuentra dentro de la Avenida de las Naciones en el PK 3+400. Se configura como vía en placa de hormigón con carril Phoenix 37N, embebido en elastómero vertido TIPO 1<sup>3</sup>[Figura 1]. Con respecto al trazado, se encuentra dentro de una recta en planta y en alzado se ubica en un tramo en pendiente de -0.528%.

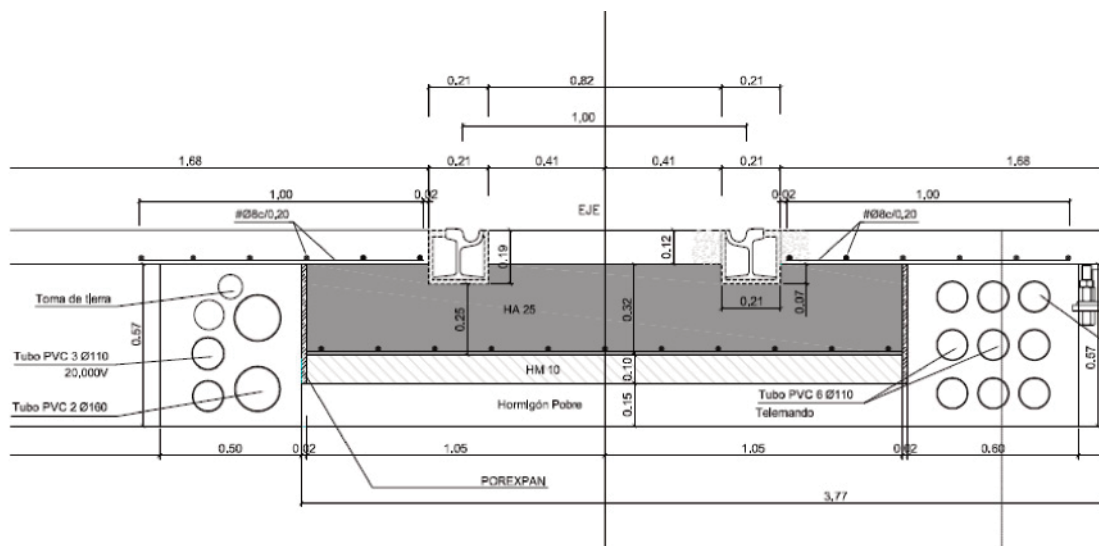


Figura 1. Vista transversal de la sección B1. Fuente: GTP

<sup>1</sup> Ente Gestor de la Red de Transportes y Puertos de la Generalitat Valenciana.

<sup>2</sup> Ferrocarriles de la Generalitat Valenciana

<sup>3</sup> El nombre comercial y las características de los elastómeros presentes en vía son confidenciales, de ahí que se denominen TIPO 1 y TIPO 2 en el texto.

## Secciones B2 y B3

Estas secciones se encuentran también dentro de la Avenida de las Naciones, en los PK 4+148 y 4+196 respectivamente. La configuración general de vía en placa es similar a la de la sección B1 pero hay una variación en cuanto al material que embebe el carril. En este caso se trata de elastómero TIPO 2, con propiedades mecánicas diferentes a las del elastómero TIPO 1. Por otra parte, en lo que se refiere a la pieza prefabricada instalada entre carril y elastómero, la sección B2 presenta una pieza prefabricada de poliuretano mientras que la B3 tiene una pieza prefabricada de hormigón. Ambas secciones seubican dentro de un tramo en pendiente de -0.487%.

## Sección B4

La quinta sección se encuentra dentro de la Avenida Costa Blanca, en el PK 1+320. La sección es una vía verde, es decir, con acabado en tierra vegetal y césped en el que queda embebido el carril, que se encuentra protegido con una espuma de poliuretano. El carril es de tipo UIC 54 colocado sobre taco holandés con sujeción SKL1 [Figura 2]. Todo este tramo de vía verde tiene bajo la capa de tierra vegetal un geotextil para garantizar el correcto drenaje y proteger la losa de hormigón que hay debajo y las conducciones que discurren por ella. La sección se encuentra dentro de un tramo en pendiente de -0.164%. En cuanto al trazado en planta, se trata de una curva de radio reducido.

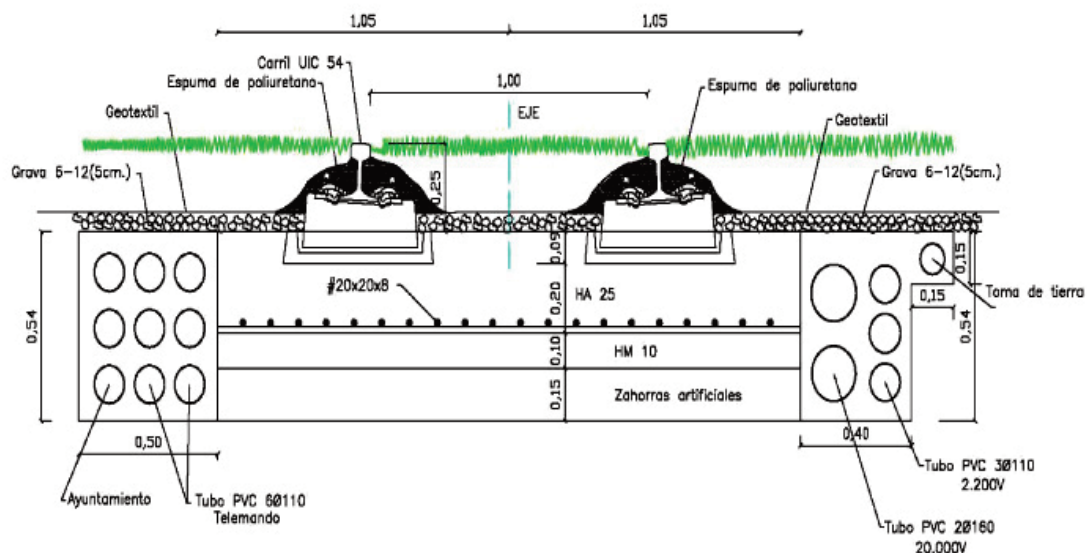


Figura 2. Vista transversal de la sección B4. Fuente: GTP

En lo que se refiere al material móvil que circula por las vías, se trata de tranvías modelo Flexity Outlook serie 4200 de la casa Bombardier. Es un tipo de tranvía diseñado para vía métrica cuya configuración habitual consta de cinco coches: dos extremos apoyados sobre bogie motor, uno central sobre bogie remolque y dos módulos puente intermedios. Su peso en vacío es de 41000 kg.

### 3. Equipos y planificación

#### 3.1. Sensores

Para la campaña de mediciones se han empleado acelerómetros triaxiales modelo FastTracer con las siguientes características:

<b>Rango de medición</b>	$\pm 2g$	$\pm 5g$
<b>Ancho de banda (Hz)</b>	0-2500	0-2500
<b>Resolución (<math>m/s^2</math>)</b>	0,017	0,041
<b>Ruido (<math>m/s^2</math>)</b>	0,055	0,075

**Tabla 1.** Características de los acelerómetros. Fuente: Proveedor

Estos sensores poseen tecnología capacitiva MEMS (MicroElectroMechanical Systems) y cuentan con un sistema de auto calibración y diagnosis que garantiza la validez de las mediciones. Para su uso se conectan directamente a un ordenador portátil a través del puerto USB, y la señal es captada y almacenada mediante el paquete de software FTAnalyzer en forma de archivos txt.

#### 3.2. Configuración

Los sensores se disponen en cada sección siguiendo un patrón regular de manera que los registros sean comparables entre sí. Concretamente en cada sección se sitúa un sensor cerca de carril que recoja la señal tras atravesar los elementos de atenuación y otro más alejado que recoja el efecto de la losa de hormigón/tierra vegetal. Los ejes de los sensores se disponen con X en paralelo a la vía, Y perpendicular a la vía y Z vertical. En la Tabla 2 se detalla la colocación exacta de sensores en cada sección de estudio.

	<b>Sensor Interior (2g)</b>	<b>Sensor Exterior (2g)</b>
<b>B1</b>	30 cm	120 cm
<b>B2</b>	30 cm	120 cm
<b>B3</b>	30 cm	120 cm
<b>B4</b>	30 cm	280 cm

**Tabla 2.** Distancias de colocación de los sensores respecto al eje del carril

### **3.3. Toma de medidas**

Cada sección se instrumenta durante un día completo (laborable), tomando registros al paso de todos los trenes que circulan por dicha sección desde primera hora (alrededor de las 5:30 h) hasta el cese del servicio (en torno a las 22:30 h). De este modo se pretende analizar el fenómeno vibratorio bajo diferentes condiciones de velocidad y carga.

Para cada paso de tren se toman registros en todos los sensores a una frecuencia de 8192 muestras por segundo. Cada toma de datos se prolonga lo suficiente para captar toda la señal vibratoria desde su inicio hasta su total atenuación. Además, a lo largo de cada jornada se realizan algunas mediciones en vacío para evaluar el ruido de la señal y detectar cualquier pico no relacionado con el tránsito ferroviario.

Por último, para poder considerar con detalle las variables antes mencionadas de velocidad y carga, FGV proporciona datos de las cajas negras de los vehículos con los registros de velocidad circulación. Sin embargo, en algunos casos no están disponibles los datos reales de velocidad, por lo que se estiman a partir de los acelerogramas registrados.

### **4. Procesado de datos**

Para un correcto análisis de los datos se requiere un procesado previo de los mismos. En primer lugar, los ficheros txt obtenidos mediante el software FTAnalyzer son importados al paquete de software matemático Wolfram Mathematica 7. Este programa se emplea como principal herramienta de tratamiento de los datos.

De los ficheros importados se obtiene, en primer lugar, el osciloscopio completo para cada medición en el eje Z (corregido por la aceleración gravitatoria). También se obtienen los picos máximos y mínimos de cada medida tanto en términos absolutos como en valor promedio. A continuación a cada listado de datos tiempo/aceleración se le aplica la Transformada Discreta de Fourier, obteniéndose así el espectro frecuencia/amplitud. El análisis espectral de las mediciones permite estudiar la señal vibratoria descompuesta en sus diferentes componentes de frecuencia.

Por último se realiza un proceso de filtrado que elimine el ruido de la señal por comparación con los registros en vacío y los picos anómalos no causados por el paso del tranvía sino por otros factores (ej. tráfico viario).

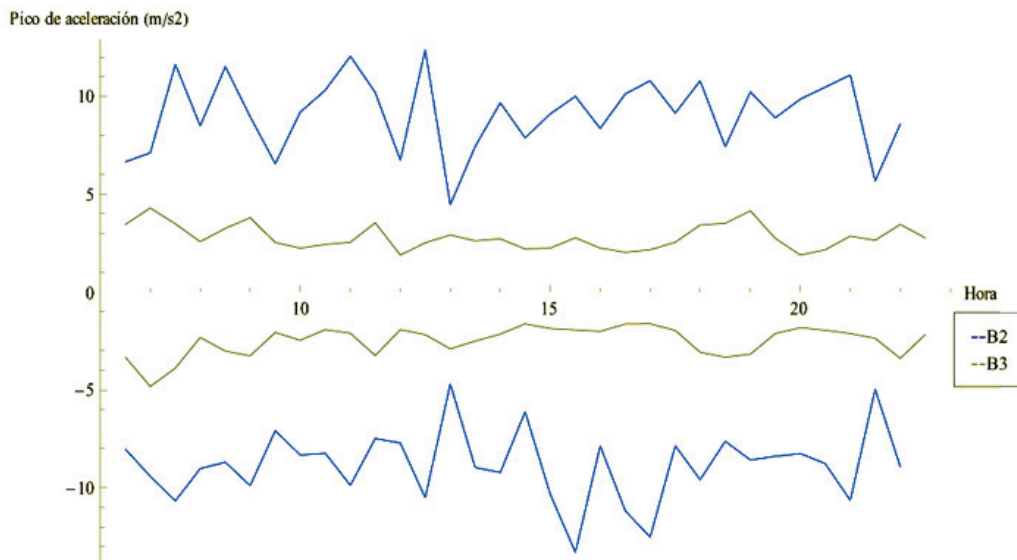
### **5. Resultados y análisis**

En un primer lugar, se va a comparar la eficacia mitigadora de los diferentes elastómeros y elementos de aligeramiento instalados en las secciones de vía en placa (B1 a B3). Un factor clave a considerar es la velocidad de paso de los tranvías, cuyos valores promedio se muestran en la Tabla 3.

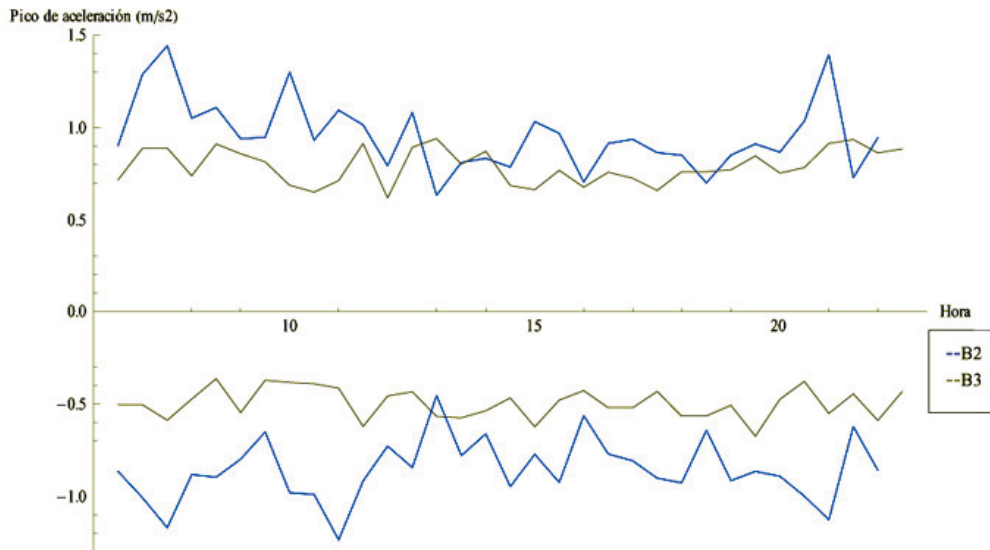
Sección	Velocidad media (m/h)
<b>B1</b>	24,13
<b>B2</b>	28,41
<b>B3</b>	23,76
<b>B4</b>	20,76

**Tabla 3.** Velocidad media en las secciones del tramo B

De la tabla se deduce que los valores de velocidad son bastante similares, y por tanto este factor se puede obviar en el siguiente análisis. A continuación se muestra la evolución de los picos máximos y mínimos de aceleración a lo largo del día en las secciones B2 y B3 para el sensor más próximo a la vía [Figura 3] y para el más lejano [Figura 4].

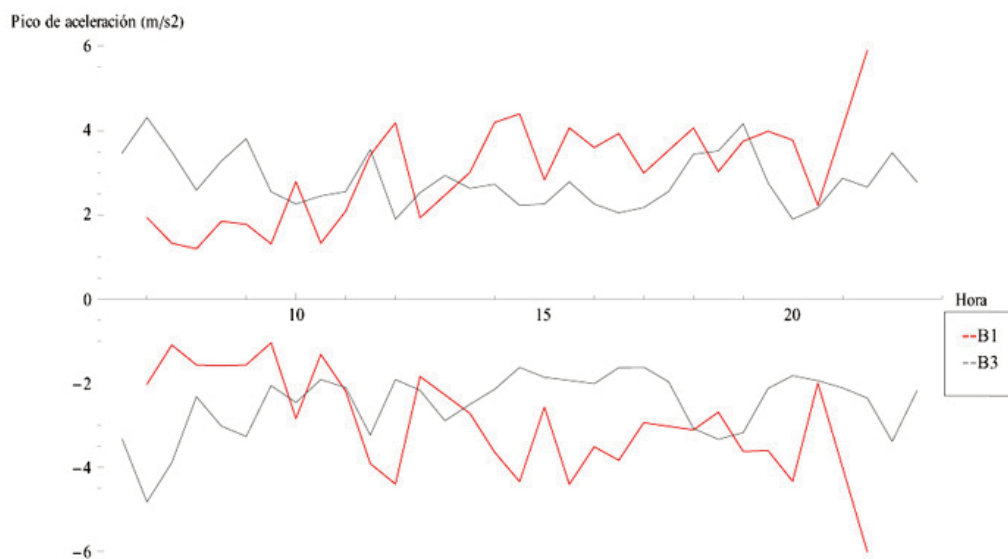


**Figura 3.** Evolución de picos a lo largo del día en B2 y B3 (sensor interior)



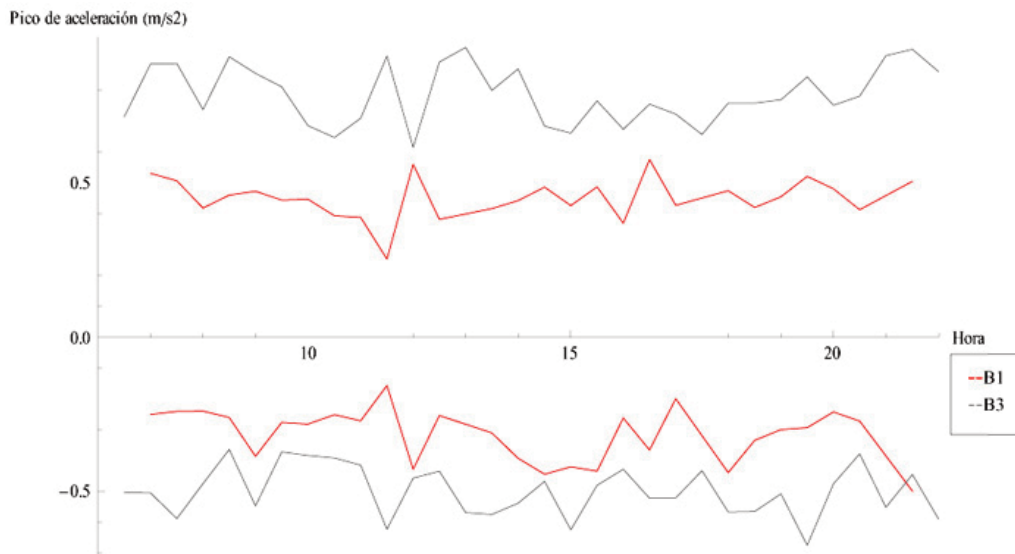
**Figura 4.** Evolución de picos a lo largo del día en B2 y B3 (sensor exterior)

La Figura 3 muestra un mayor registro de aceleración en la sección B2 respecto a la B3 en el sensor interior (a 30 cm del carril). Por el contrario, la Figura 4 muestra cómo ambas señales se atenúan a un nivel muy similar en el sensor exterior (a 120 cm del carril) por efecto de la propia losa de hormigón. Todo esto indica que, a corta distancia del carril y bajo condiciones similares la sección B2 registra más vibración. Esto puede achacarse al elemento de poliuretano instalado como aligeramiento, pues es la única diferencia estructural respecto a B3. Por tanto, se puede concluir que el aligeramiento de poliuretano resulta más desfavorable que el de hormigón en términos de vibración, si bien la diferencia de picos se atenúa hasta niveles similares en ambas secciones con la distancia.



**Figura 5.** Evolución de picos a lo largo del día en B1 y B3 (sensor interior)

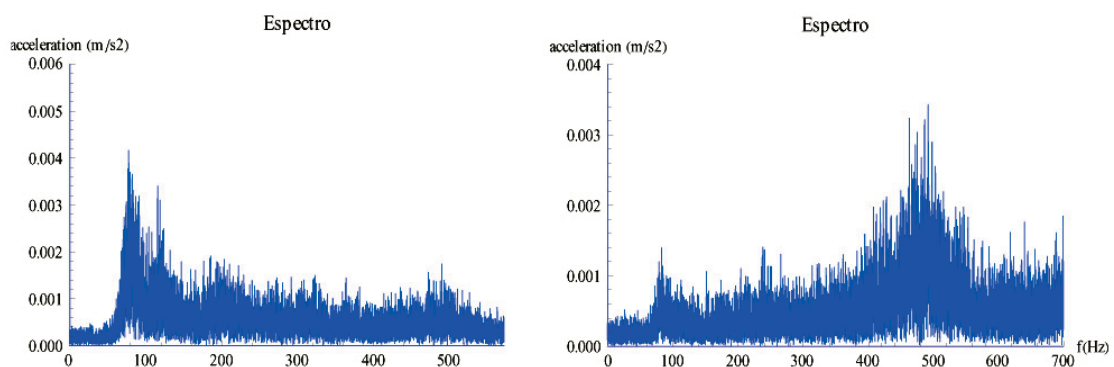




**Figura 6.** Evolución de picos a lo largo del día en B1 y B3 (sensor exterior)

En cuanto a la comparación entre elastómeros, las Figuras 5 y 6 muestran los mismos resultados que las anteriores pero para las secciones B1 y B3.

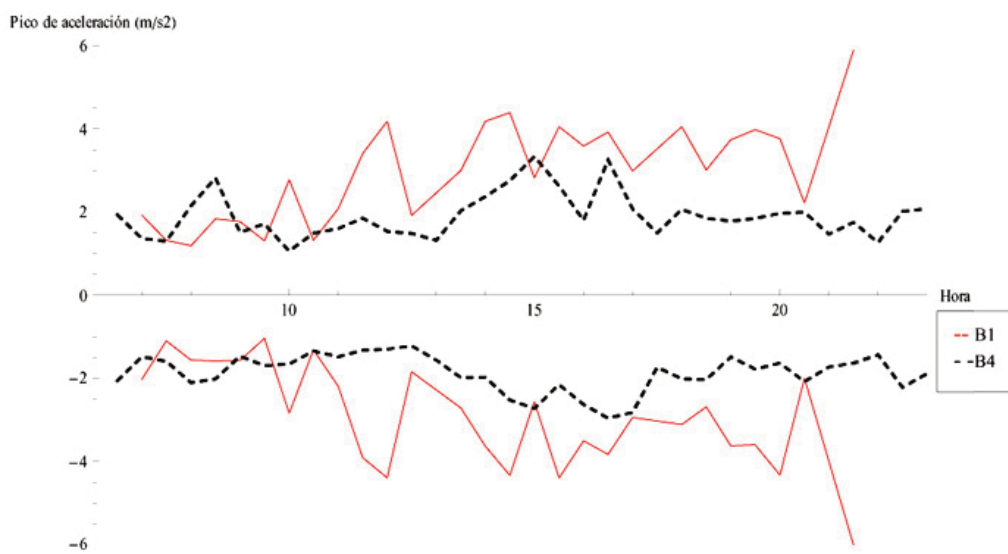
En la primera gráfica se observa que la señal de vibración es muy similar entre ambas secciones en el sensor interior lo que, teniendo en cuenta que la velocidad media es también muy parecida, indica un comportamiento equiparable entre ambos tipos de elastómero. En el sensor exterior sí parece haber una cierta diferencia de atenuación en favor de la sección B1, pero es de poca magnitud y podría deberse a la propia placa de hormigón (ej.: irregularidades o discontinuidades puntuales).



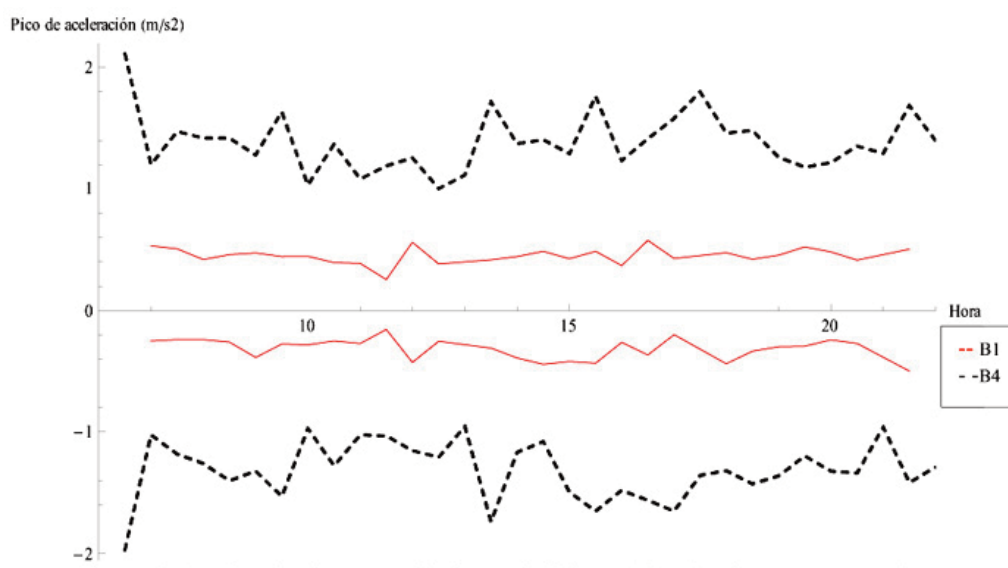
**Figura 7.** Espectro de frecuencias. Izquierda: B3. Derecha: B1 (sensor interior)

Lo que muestra la Figura 7 es la comparación del espectro de frecuencias entre ambas secciones en el sensor interior. De estas gráficas se observa que, si bien los picos máximos en promedio pueden ser similares entre ambas secciones, sí existe cierta diferencia cuando la señal se descompone por frecuencias. Así, el elastómero presente en B1 (TIPO 1) parece mitigar preferentemente las frecuencias más bajas mientras que el elastómero de B3 (TIPO 2) muestra un pico mayor a dichas frecuencias y en cambio atenúa mejor las componentes de frecuencia superior dentro del rango mostrado.

En cuanto a la comparación entre vía en placa y vía verde, a continuación se muestran los registros de picos máximos y mínimos correspondientes a las secciones B1 y B4 [Figuras 8 y 9].

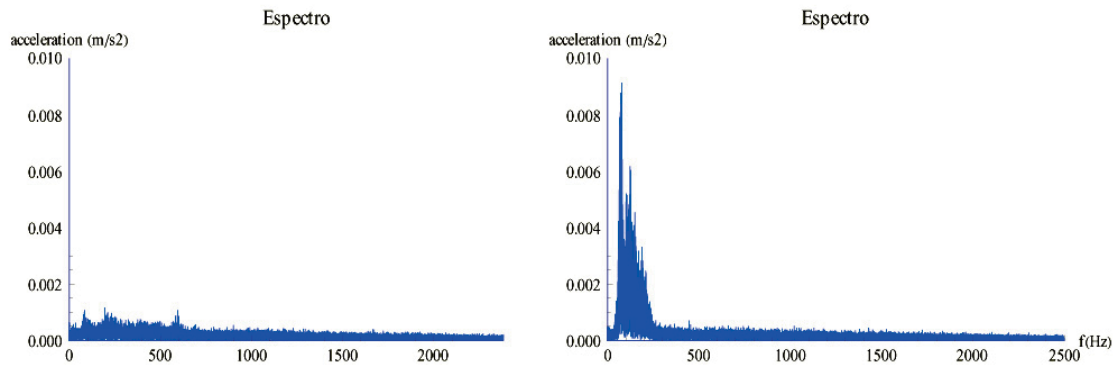


**Figura 8.** Evolución de picos a lo largo del día en B1 y B4 (sensor interior)



**Figura 9.** Evolución de picos a lo largo del día en B1 y B4 (sensor exterior)

En las gráficas precedentes se observa que la vibración es similar e incluso superior en la sección de vía en placa (B1) a nivel del sensor interior, mientras que el sensor exterior registra una señal mayor en la sección B4. Por lo tanto, se deduce que una onda de similar magnitud se disipa mucho menos a través de la capa de tierra vegetal que a través del hormigón. Esta conclusión se ve refrendada por el hecho de que el sensor exterior está situado a 280 cm del carril en B4, por los 120 cm de B1.



**Figura 10.** Espectro de frecuencias. Izquierda: B1. Derecha: B4 (sensor exterior)

La comparación entre ambas tipologías también se puede hacer en términos de frecuencia [Figura 10]. De los espectros se deduce que, efectivamente, la vía verde muestra todavía una señal con un pico muy acusado a baja frecuencia, mientras que la vía en placa muestra un espectro mucho más reducido en todo el rango considerado.

Todo esto indica que la menor eficacia de la vía verde se produce fundamentalmente para las frecuencias más bajas, lo cual es debido a la menor rigidez global de la capa de tierra vegetal frente a la losa de hormigón.

## 6. Conclusiones

A partir de los resultados analizados se extraen las siguientes conclusiones de la campaña de medición realizada:

La velocidad es un factor fundamental. A igualdad de otros factores, una mayor velocidad de paso del vehículo ferroviario implica una mayor magnitud de vibración generada.

Las características mecánicas de los materiales, fundamentalmente su rigidez, también son un factor a tener en cuenta. Materiales más rígidos parecen atenuar mejor las frecuencias más bajas, mientras que los materiales más flexibles actúan mejor sobre las más altas.

No existe diferencia significativa entre los dos tipos de elastómero instalados en lo que se refiere a los picos máximos de aceleración obtenidos. Sí la hay, en cambio, entre los espectros de frecuencia que genera cada uno. El elastómero TIPO 1 muestra picos a frecuencias mayores que el TIPO 2.

Existe una diferencia notable en los picos de aceleración según el tipo de elemento para aligerar instalado en la cazoleta, siendo más desfavorable el de poliuretano.

La vía en placa resulta más eficiente que la vía verde a la hora de mitigar la vibración generada por el paso del vehículo. Esto es particularmente notable para el rango de frecuencias más bajo.

## **Bibliografía**

BALACHANDRAN, Balakumar y MAGRAB, Edward (2006): Vibraciones. Editorial Thomson. Mexico D.F.

LÓPEZ PITA, Andrés (2006): Infraestructuras ferroviarias. Editorial UPC. Barcelona.

GERE, James (2004): Timoshenko: Resistencia de materiales. Editorial Thomson Paraninfo. Madrid.

AMBARDAR, Ashok (2002): Procesamiento de señales analógicas y digitales. Editorial Thomson. Mexico D.F.