



PROYECTO RECYTRACK: MODELADO VIBRATORIO DE TRAVIASAS BI-BLOQUE DE MATERIAL ELASTOMÉRICO Y VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

Joan Cardona¹, Ada Subirà¹, Marc Albaladejo¹, Rafael Torres¹, Robert Arcos²

¹AV Ingenieros, St. Cugat del Vallés - Barcelona

jcg@avingenieros.com; ast@avingenieros.com; map@avingenieros.com; rtc@avingenieros.com

²Laboratorio de Ingeniería Acústica y Mecánica, LEAM. Universidad Politécnica de Cataluña, UPC. Terrassa

robert.arcos@upc.edu

Resumen

RECYTRACK es un proyecto de investigación de 3 años y medio subvencionado por la Unión Europea a través de la convocatoria LIFE+ 2010 cuyo objetivo es demostrar los beneficios medioambientales y técnicos de la implementación de un material elastomérico eco-friendly desarrollado a partir de neumáticos fuera de uso mezclados con resina para aplicaciones ferroviarias.

AV Ingenieros, junto con el LEAM, lleva a cabo el estudio del comportamiento vibratorio de dicho material, que será aplicado en forma de manta bajo balasto y tacos para superestructura en losa. En este artículo se define el modelo de predicción vibratoria desarrollado y se comparan los resultados teóricos obtenidos mediante el modelo con los resultados experimentales obtenidos después de la implantación de un tramo de bloques aislados en un túnel de cercanías en España.

Palabras-clave: vibraciones, modelado, ferroviario, material reciclado.

Abstract

RECYTRACK is a 3.5 year project granted by the European Union through LIFE+ 2010 program. The overall objective of the project is to demonstrate the environmental benefits and technical and economic feasibility of the implementation of an elastomeric eco-friendly material made of end-of-life tires with resin for railway applications.

Within the consortium, AV Ingenieros jointly with LEAM, carries out the study of the vibration behaviour of the eco-friendly material, which will be applied as a mat for ballasted tracks as well as an isolated block system for slab tracks. In this paper, the analytical model developed to characterize the material vibration behaviour is explained and theoretical results are compared with field tests after the implementation of a set of isolated blocks in a Spanish tunnel with commuter rail traffic.

Keywords: vibrations, model, railway, recycled material.

PACS no. 43.40.Tm

1 Introducción

Según la Asociación Europea de fabricantes de Neumáticos y Caucho (European Tyre&Rubber manufacturers' Association), ETRMA, en el año 2007 en Europa se generaron más de 3,4 millones de toneladas de neumáticos usados, NFU, correspondientes a unos 300 millones de unidades [1].

El objetivo de este trabajo es demostrar que un material elastomérico respetuoso con el medioambiente, preparado en base a una mezcla de neumáticos fuera de uso con resina, pueden llegar a cumplir con los requerimientos de reducción de las vibraciones impuestos por las administraciones ferroviarias, con lo que sería posible una revalorización de 1.5 M de neumático en 10 años, con la consiguiente reducción del impacto medioambiental provocado por estos residuos.

En este artículo se presentan los trabajos desarrollados a lo largo del proyecto, con lo resultados parciales obtenidos, así como los resultados finales después de la implementación de los materiales desarrollados en una infraestructura real, con circulación comercial de material móvil.

2 Material desarrollado

El material desarrollado se fabrica en forma de manta continua, para ser instalada bajo superestructura de balasto, y en forma de cazoleta para ser instalada en forma de recubrimiento exterior de bloques de hormigón que actúan como traviesas en superestructura hormigonada. En la Figura 1 se puede ver una imagen de cada uno de los dos tipos de productos desarrollados.

Los productos desarrollados se han producido mediante la mezcla homogénea a presión de granos de neumático fuera de uso de vehículos ligeros con resina de matriz polimérica además de algún aditivo que mejora el rendimiento del producto. El diseño geométrico de los productos, en cuanto a forma y grosor, se lleva a cabo a partir de simulaciones mecánicas FEM y simulaciones dinámicas mediante modelo analítico para determinar su comportamiento frente a la atenuación de vibraciones.



Figura 1– Vista de los dos tipos de producto desarrollados con el material elastomérico.

3 Diseño de los productos

3.1 Diseño mecánico FEM

El diseño mecánico de elementos elastoméricos es complejo, por lo que se ha desarrollado un modelo FEM para el estudio de las propiedades mecánicas de los productos RECYTRACK. Los materiales



hiperelásticos [2] son aquellos en que la función del potencial tensión-energía existe, siendo una función escalar de la componente del tensor de tensión, $U = U(E_{ij})$.

Cada modelo incluye un conjunto de parámetros del material que, en principio, son desconocidos pero que se pueden obtener de forma empírica a partir de ensayos de caracterización mecánica. El programa de simulación ANSYS [3] consta de un conjunto de modelos teóricos que incluyen las herramientas para evaluar los modelos con los resultados experimentales mediante el ajuste de los parámetros desconocidos. Las constantes del material se obtienen mediante el ajuste de mínimos cuadrados, por el que se minimiza el error relativo en tensión, RE.

$$RE = \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{T_i^{th}}{T_i^{test}}\right)^2 \quad (1)$$

Donde T_i^{test} es un valor de tensión obtenido de los datos de tensión, T_i^{th} se obtiene a partir de la evaluación de la expresión de tensión nominal.

Después de analizar diferentes modelos, como el Mooney-Rivlin, Polinómico, Yeoh, Neo-Hookean, Ogden o Arruda-Boyce, se determina que el modelo que mejor reproduce el comportamiento del material es el de 5 parámetros de Mooney-Rivlin, que responde a la siguiente ecuación (2).

$$U = c_{10}(\bar{I}_1 - 3) + c_{01}(\bar{I}_2 - 3) + c_{20}(\bar{I}_1 - 3)^2 + c_{11}(\bar{I}_1 - 3) \cdot (\bar{I}_2 - 3) + c_{02}(\bar{I}_1 - 3)^2 + \frac{1}{d}(J - 1)^2 \quad (2)$$

Donde c_{10} , c_{01} , c_{20} , c_{11} y c_{02} son los cinco parámetros del modelo Mooney-Rivlin, $d = \left(\frac{1-2\nu}{c_{10}+c_{01}}\right)$ y ν es el ratio de Poisson del material.

3.2 Diseño vibratorio

La generación de vibraciones en infraestructuras ferroviarias es debida a las cargas generadas en el contacto rueda-carril. Dichas cargas generan dos tipos de excitaciones [4]: excitación quasi-estática, debida a las componentes estáticas de las cargas de los ejes cuando se desplazan a lo largo de la vía, y la excitación dinámica, debida a la variación espacial de la rigidez del soporte a medida que el tren avanza así como a la rugosidad de rueda y carril. El modelo de superestructura tiene en cuenta estas dos tipologías de excitación para determinar los niveles de vibración en el terreno adyacente a la vía.

La superestructura se modela mediante un modelo de 2 capas soportado de forma continua, donde el carril se considera como una viga de Euler-Bernoulli [5], el acoplamiento dinámico entre carriles no se considera porque las traviesas se consideran completamente rígidas, y la fuerza de contacto entre traviesas y terreno se considera como una función continua en la dirección longitudinal del carril mientras que se considera como una función rectangular en la dirección transversal al carril. La Figura 2 representa el modelo de superestructura considerado, donde z_r , z_s y z_g representan los desplazamientos del carril, traviesas y sustrato, respectivamente, k_f , k_b y k_{bm} son las rigideces de las fijaciones, el balasto y de la manta bajo balasto, c_f , c_b y c_{bm} son los amortiguamientos viscosos de las fijaciones, el balasto y de la manta bajo balasto, y m_b es la masa del balasto. Las rigideces, el amortiguamiento y la masa de las traviesas son parámetros distribuidos a lo largo de la vía.

La expresión que gobierna el desplazamiento vertical del carril, z_r , debido a la propagación de las ondas de flexión en él es [6]:

$$EI \frac{\partial^4 z_r}{\partial x^4} + \rho S \frac{\partial^2 z_r}{\partial t^2} + f(x, t) = q(x, t) \quad (3)$$

Donde E es el módulo de Young, I es el segundo momento de inercia del carril, ρ es la densidad del carril, S es la sección del carril, $f(x, t)$ es la fuerza distribuida debido a las traviesas y $q(x, t)$ es la fuerza distribuida debido al tren. A partir de esta ecuación y de lo indicado en la Figura 2, se obtiene la fuerza de acople superestructura-terreno (4):

$$f_g(x, t) = k_B(z_s - z_g) + c_B(\dot{z}_s - \dot{z}_g) \quad (4)$$

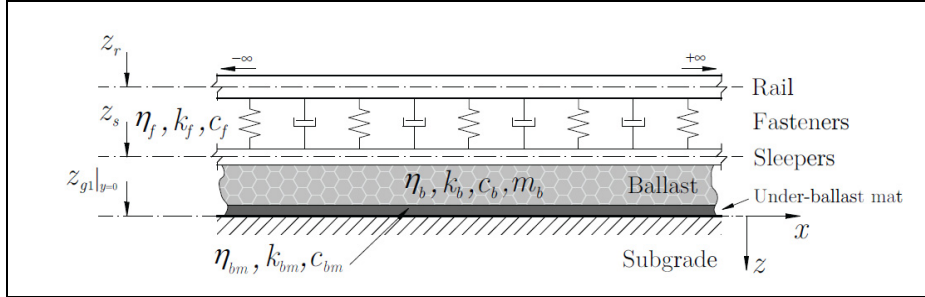


Figura 2- Esquema del modelo de superestructura considerado.

El terreno se modela como un semi-espacio homogéneo y viscoelástico definido por las constantes de Lamé, λ y μ , la densidad ρ , el amortiguamiento de las ondas P, D_P , y el de las ondas S, D_S . A partir de [7] se obtiene la expresión que gobierna el desplazamiento del semi-espacio (5).

$$\begin{aligned} (\bar{X}_g, Y_g, Z_g) = & (-ik_{x'} - ik_{y'}, -v)Ae^{-vz} + \left(-\frac{k_x k_y}{v'}, \frac{k_x^2 - v'^2}{v'}, ik_y \right) B e^{-v'z} \\ & + \left(-\frac{k_y^2 - v'^2}{v'}, \frac{k_x k_y}{v'}, -ik_x \right) C e^{-v'z} \end{aligned} \quad (5)$$

Donde A, B y C son constantes de integración que pueden calcularse a partir de las condiciones de contorno, k_x y k_y son los números de onda en las direcciones x e y , respectivamente, y $k_\alpha^2 = \omega^2/\alpha^2$, $k_\beta^2 = \omega^2/\beta^2$, $\alpha^2 = (\lambda + 2\mu)/\rho$, $\beta^2 = \mu/\rho$, $v = \sqrt{k_x^2 + k_y^2 - k_\alpha^2}$, $v' = \sqrt{k_x^2 + k_y^2 - k_\beta^2}$.

La eficacia de los productos elastoméricos en términos de reducción de la vibración se evalúa mediante la pérdida por inserción o *Insertion Loss*, IL , parámetro que define la diferencia de nivel de vibración en un punto determinado del terreno debido a la inserción de la manta bajo balasto (UBM) o los bloques aislados (IBS) en la superestructura ferroviaria. El IL se describe según (6)

$$IL = 20 \log_{10} \left(\frac{U_{g1}^{uniso}(0, y, \omega)}{U_{g1}^{iso}(0, y, \omega)} \right) \quad (6)$$

donde

$$U_{g1}^{uniso}(x, y, \omega) = \sqrt{|X_{g1}^{uniso}(x, y, \omega)|^2 + |Y_{g1}^{uniso}(x, y, \omega)|^2 + |Z_{g1}^{uniso}(x, y, \omega)|^2} \quad (7)$$

$$U_{g1}^{iso}(x, y, \omega) = \sqrt{|X_{g1}^{iso}(x, y, \omega)|^2 + |Y_{g1}^{iso}(x, y, \omega)|^2 + |Z_{g1}^{iso}(x, y, \omega)|^2} \quad (8)$$

4 Ensayos de caracterización mecánica en laboratorio

Para la caracterización de las propiedades que definen los materiales, se llevaron a cabo ensayos en el laboratorio LADICIM, todos ellos basados en la normativa europea específica para ello [8-12].

4.1 Ratio de Poisson, ν , y módulos estático, C_{sta} , y dinámico, C_{dyn}

El ratio de Poisson, ν , se obtiene utilizando actuador servo-hidráulico con célula de carga de $100 \pm \text{kN}$ y con dos platos de compresión del mismo diámetro que la muestra. Se utiliza un extensómetro para medir su tensión longitudinal ($\epsilon_L = \Delta L/L_0$) y 4 transductores diferenciales, LVDT, para determinar la tensión transversal ($\epsilon_T = \Delta \varnothing/\varnothing_0$). Ver Figura 3.

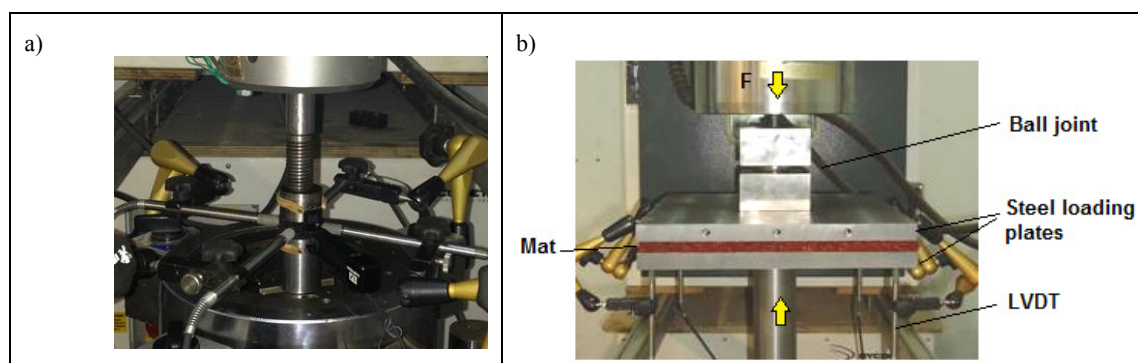


Figura 3– a) Ensayo para la determinación del ratio de Poisson y b) ensayo para la determinación del módulo estático y dinámico.

El módulo estático, C_{stat} , se obtiene aplicando 3 ciclos de carga a compresión desde 0 a 9.9 kN a 1 mm/min, mientras que el módulo dinámico, C_{dyn} , se obtiene aplicando 1,000 ciclos de carga a compresión de 1.9 a 9 kN a las frecuencias de 1 Hz, 5 Hz, 10 Hz y 20 Hz. Los valores de los módulos C_{stat} y C_{dyn} se calculan como el ratio de la variación de tensión, $\Delta F/S_0$, y la deflexión media del material elastomérico a través de la expresión (9).

$$C_{sta} = C_{dyn} = \frac{\Delta F}{S_0 \cdot \Delta \delta_m} \left(\text{N/mm}^3 \right) \quad (9)$$

4.2 Módulo estático horizontal, $C_{sta,h}$, y fatiga

Para la obtención del módulo estático horizontal se necesitan dos actuadores servo-hidráulicos con células de carga de $\pm 5 \text{ kN}$ y $\pm 100 \text{ kN}$. El material a ensayar se coloca entre dos platos metálicos y se aplican 3 ciclos de carga cortante desde 0 a 0.675 kN a 1 m/min simultáneamente a una tensión a compresión vertical (0.0125 N/mm^2). Ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**.a. El valor de $C_{stat,h}$ se calcula como el módulo secante entre 0.09 kN y 0.585 kN en el último ciclo, siguiendo la expresión (9).

El ensayo se desarrolla en dos fases: en la primera fase, se aplica una carga sinusoidal a compresión que varía entre 10 kN y 56 kN y que se aplica durante 10^7 ciclos a 5 Hz, mientras que en la segunda fase, la carga máxima aumenta hasta 75 kN y la duración se reduce a $2.5 \cdot 10^6$ ciclos.

4.3 Caracterización dinámica 1-80 Hz

Debido a que el modelo de simulación vibratoria trabaja en el rango 1-80 Hz, el material se ensaya dinámicamente en este rango de frecuencias para obtener los parámetros de interés para el modelo vibratorio.

Los ensayos se llevan a cabo utilizando 8 acelerómetros, 4 de ellos dispuestos en el plato superior, donde un actuador servo-hidráulico aplica una pre-compresión de 9 kN además de una fuerza vertical armónica de 500 N sobre la muestra, y otros 4 acelerómetros dispuestos sobre el banco de ensayo. Ver Figura 4.a. La fuerza aplicada por el actuador se adquiere mediante célula de carga mientras que las señales temporales de aceleración se integran para obtener los desplazamientos, con el objetivo de construir las curvas de histéresis del material.

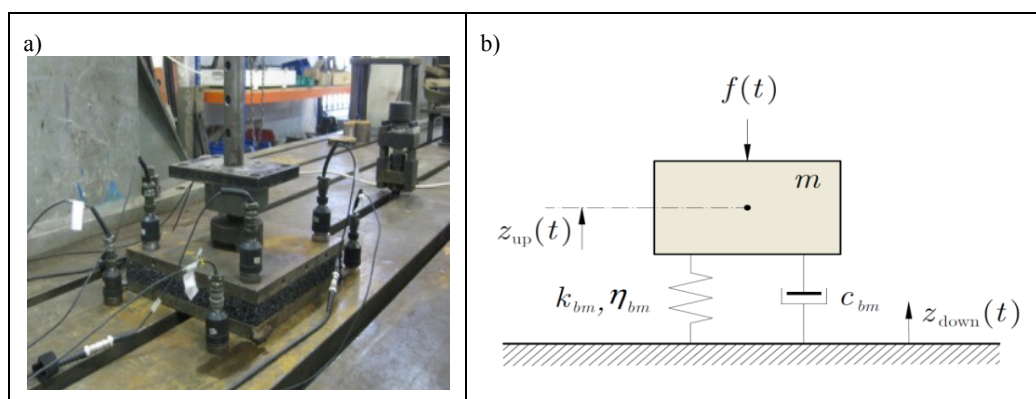


Figura 4– a) Ensayo de caracterización dinámica entre 1 Hz y 80 Hz y b) vista del modelo teórico de 1 GDL para el ajuste de las curvas de histéresis y obtención de las propiedades dinámicas del material.

Con las curvas de histéresis experimentales, se ajusta un modelo de 1 GDL como el de la Figura 4.b donde k_{bm} , c_{bm} y η_{bm} son la rigidez, el amortiguamiento viscoso y el amortiguamiento estructural del producto elastomérico, mientras que m es la masa vibrante, para la obtención de los parámetros dinámicos equivalentes del material elastomérico: k_{bm} , c_{bm} y η_{bm} .

5 Ensayos de campo

El material elastomérico se implanta en dos infraestructuras ferroviarias reales para la determinación experimental de su comportamiento en cuanto a aislamiento de las vibraciones generadas por el tráfico ferroviario.

El demostrador de manta se trata de una vía superficial balastada de ancho ibérico con traviesas de hormigón ubicado en Aranda de Duero, por la que circulará tráfico de mercancías. Por otro lado, el demostrador de taco está en un túnel del Corredor del Mediterráneo a su paso por Valencia (zona El Cabañal) en vías de 3 hilos por las que circula tráfico mixto de pasajeros y mercancías y cuya superestructura es de hormigón in situ con bloques elásticos. La Figura 5 muestra las infraestructuras ferroviarias donde se han instalado los dos demostradores.

El demostrador de taco RECYTRACK se instaló en la vía 1 del túnel del Cabañal, mientras que en la vía 2 permanece el sistema de superestructura convencional, formado por los mismos bloques de hormigón pero con un elastómero convencional. Para comprobar el comportamiento del taco RECYTRACK, se instrumentaron las dos vías y se realiza la comparativa entre ellas.

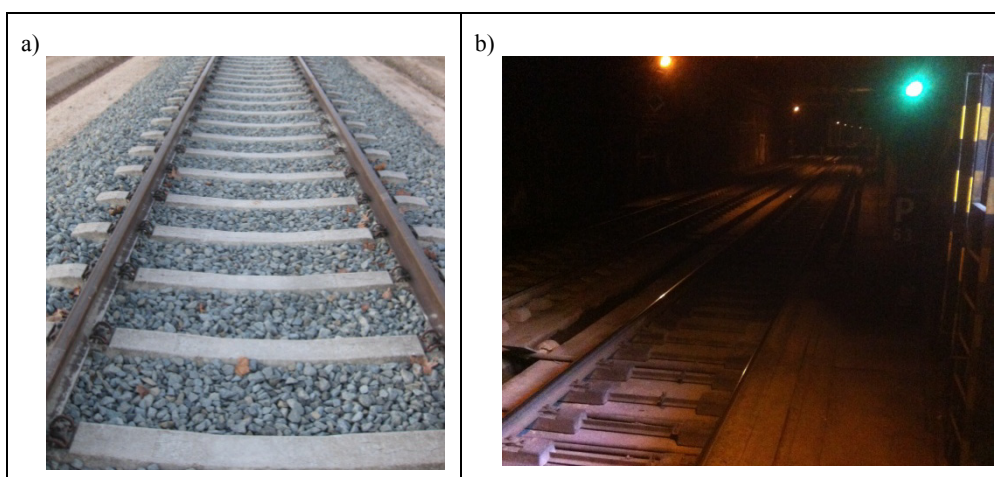


Figura 5– a) Infraestructura superficial en la que se ha instalado la manta y b) túnel con taco.

Las dos vías se instrumentaron con un total de 12 sensores de aceleración (6 en cada vía) dispuestos de la siguiente forma: acelerómetros verticales en carril (entre dos traviesas), sobre bloque y en la losa de hormigón, y 3 acelerómetros en montaje triaxial en el hastial del túnel. Ver Figura 6. Se registran simultáneamente las señales temporales de vibración en los 12 sensores con una frecuencia de muestreo de 5 kHz durante la explotación comercial de la línea, registrando los niveles de vibración provocados por la circulación de trenes de mercancías, trenes de cercanías y trenes de media distancia tipo Talgo.

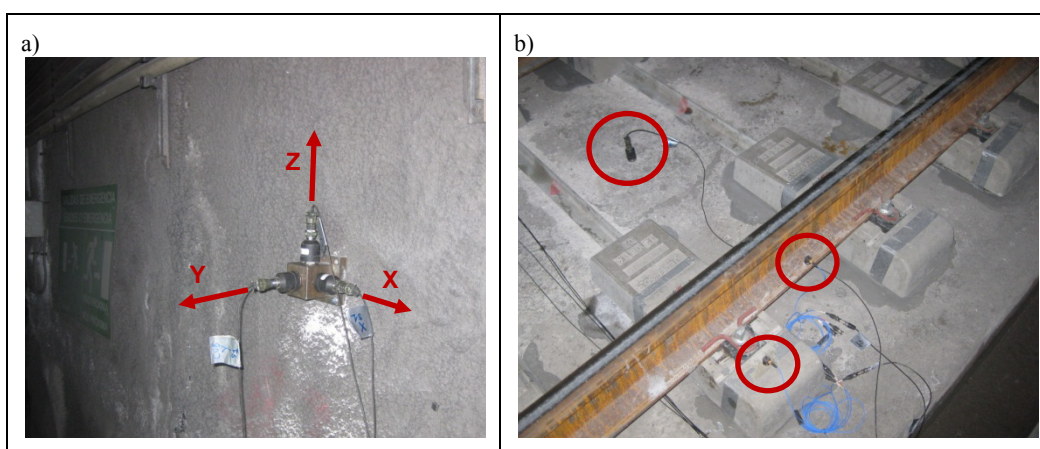


Figura 6– a) Vista de los 3 acelerómetros en el hastial del túnel y b) acelerómetros verticales en carril, bloque y losa.

En lo que se refiere al demostrador de manta, se trata de una vía nueva cerrada aún a la explotación comercial, por lo que no se disponía de circulación de trenes. Para validar el comportamiento vibratorio de la manta se utilizó un prototipo de excitador de desarrollo propio para la generación de las vibraciones que ocasiona el paso de un tren. Se trata de un sistema que se coloca sobre la vía y que mediante un motor con un variador de frecuencia genera el espectro de fuerza en el rango 1-80 Hz (medido con sensores de fuerza colocados en los 4 apoyos de la máquina sobre los carriles) proporcional al del paso de un tren. Ver Figura 7. Además de los sensores del carril, también se colocan acelerómetros en las traviesas y en el terreno.

Las medidas con el sistema de excitación se realizan en una sección con manta y sobre otra sin manta, por lo que la diferencia entre las dos secciones de medida será la capacidad de atenuación de vibraciones de la manta. Mediante los resultados de estas medidas y un modelo de inversión, se determina el comportamiento vibratorio de la manta RECYTRACK.

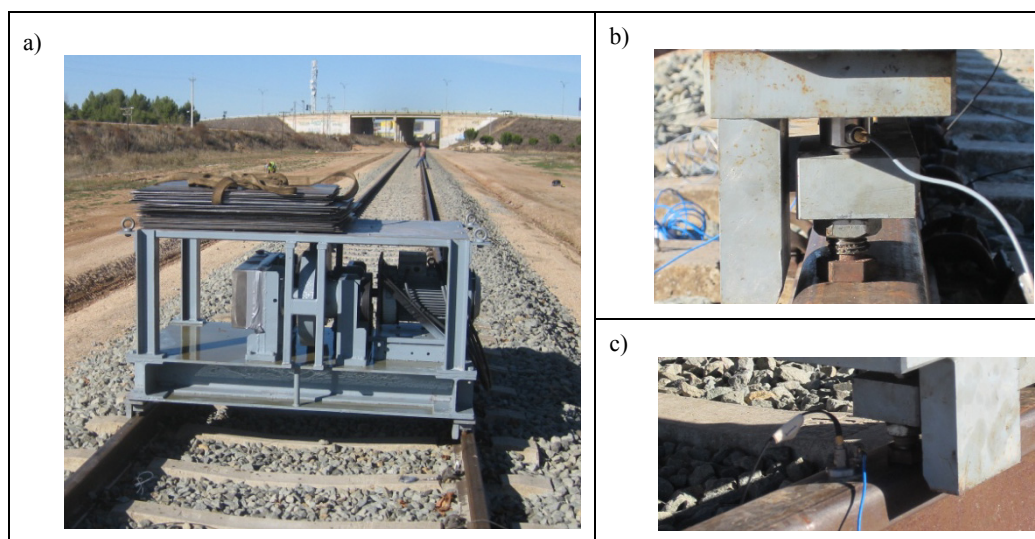


Figura 7– a) Vista general del excitador de vibraciones, b) sensores de fuerza encada uno de los 4 apoyos de la máquina con el carril y c) sensores de vibración sobre carril.

6 Resultados de los ensayos de campo

La Figura 8 muestra los espectros de aceleración de vibración promedio registrados en 3 posiciones de medida, tanto para la vía con bloques RECYTRACK como para la vía estándar. Para cada espectro, esta figura muestra el valor medio de vibración más la fluctuación de valores respecto a este valor medio debido a las diferentes circulaciones registradas. Además, la Figura 8.d muestra la relación entre los niveles de vibración en el carril y en el hastial, también para ambas vías, a través del parámetro *Transmission Loss*, definido como la diferencia entre ambos espectros.

Como puede verse en esta figura, los niveles de vibración son similares en ambas vías, aunque para el caso del carril y el bloque el espectro de la vía RECYTRACK sea algo más elevado que el de la vía estándar a altas frecuencias. La diferencia de niveles de vibración globales promedio entre ambas vías en el rango frecuencial 1-316 Hz es de 3 dB, por lo que se puede considerar que tienen un comportamiento análogo.

Por contrapartida, la atenuación del nivel de vibración entre el carril y el hastial, dada por el parámetro *Transmission Loss*, TL , es más elevada para el caso de la vía RECYTRACK, especialmente a bajas frecuencias, que son las que finalmente se transmitirán desde el túnel hacia las edificaciones a proteger. Concretamente, en el rango frecuencial 1-316 Hz la vía RECYTRACK presenta un TL 4.5 dB mayor que el TL de la vía estándar.

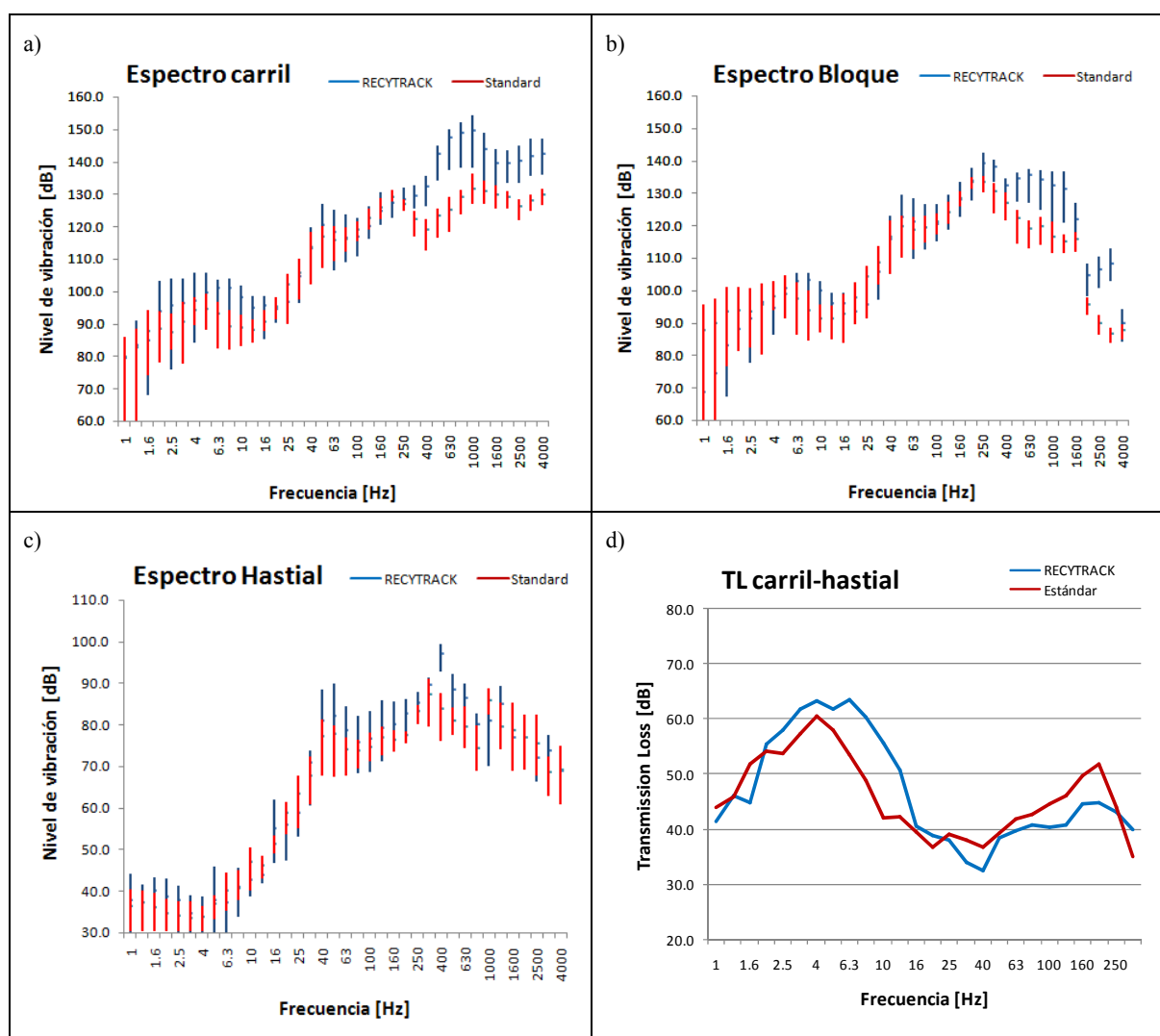


Figura 8– Espectros promedio para la vía RECYTRACK (azul) y para la vía estándar (roja) correspondientes a: a) carril, b) bloque y c) losa. d) *Transmission Loss* carril-hastial de la vía RECYTRACK y la vía estándar.

7 Conclusiones

Se han diseñado dos productos elastoméricos orientados a la reducción de las vibraciones de infraestructuras ferroviarias. Se ha desarrollado el diseño mecánico y el vibratorio, a partir de ensayos normalizados en laboratorio y mediante modelos predictivos, respectivamente. Una vez diseñados los productos, éstos se han instalado en vías reales para la verificación de su comportamiento frente a las vibraciones.

A la vista de los resultados presentados, se concluye que los productos elastoméricos a base de neumático reciclado desarrollados en el marco del proyecto RECYTRACK tienen un comportamiento vibratorio similar a otros productos existentes en el mercado, con lo que se comprueba la bondad de este material para su utilización en la reducción de la emisión de vibraciones de las infraestructuras ferroviarias.



Agradecimientos

Este trabajo se ha desarrollado en el marco del Proyecto RECYTRACK, con referencia LIFE10 ENV/ES/000514, consorcio formado por Acciona Infraestructuras, Adif, LADICIM (Universidad de Cantabria) y AV Ingenieros, y soporte financiero de la Comisión Europea mediante el instrumento LIFE+.

Referencias

- [1] ETRMA. Annual Activity Report, 2007.
- [2] L. E. Malvern. Introduction to the Mechanics of a Continuous Medium. Prentice-Hall Inc. N. J. 1969.
- [3] ANSYS User's Manual, 2013.
- [4] Lombaert, G., Degrande, G. Ground-borne vibration due to static and dynamic axle loads of InterCity and high-speed trains. *Journal of Sound and Vibration*, 319(3-5), 2009, pp. 1036-1066.
- [5] Knothe, K.L., Grassie, S.L. *Modelling of railway track and vehicles/track interaction at high frequencies*. *Vehicle System Dynamics*, 22(3-4), 1993, pp. 209-262.
- [6] Graff, F.G. *Wave Motion in Elastic Solids*. New York, Dover publications Inc., 1975, pp. 309-430.
- [7] Metrikine, A.V., Dieterman, H.A., The equivalent vertical stiffness of an elastic half-space interacting with a beam, including the shear stresses at the beam – Half-space interface. *European Journal of Mechanics A/Solids*, 16(3), 1997, pp. 515-527.ç
- [8] Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares “Contratación del suministro de manta antivibratoria destinada a la línea de alta velocidad noroeste” de ADIF. Abril 2010.
- [9] DBS 918 071-01, “Condiciones técnicas de suministro, Acolchado de subbalasto para reducir la carga ejercida sobre el balasto. Ensayos mecánicos”.
- [10] Especificación Técnica ET-V-C-99-99-0102/6-U00-999, “Manta amortecedora de impacto e vibração do lastro-fornecimento e instalação”.
- [11] DIN 45673-1:2010-08, “Mechanical vibration. Resilient elements used in railway tracks. Part 1: Terms and definitions, classification, test procedures”.
- [12] DIN 45673-5:2010-08, “Mechanical vibration. Resilient elements used in railway tracks. Part 5: Laboratory test procedures for under-ballast mats”.