



Received: 21-03-2021
Accepted: 03-04-2021

Anales de Edificación
Vol. 7, Nº1, 1-8 (2021)
ISSN: 2444-1309
Doi: 10.20868/ade.2021.4586

Análisis acústico del uso de neumáticos reciclados en vías férreas. Acoustic analysis of the use of recycled tires on railways.

Catalina Mondragón-Enguïdanos^a, Amparo Verdú-Vázquez^b, Tomás Gil-López, Jorge Gomez-Hoyos^d.

^a PhD, Escuela Técnica Superior de Edificación, UPM, España

^{b,c} Dpto. Tecnología de la Edificación. Escuela Técnica Superior de Edificación, Universidad Politécnica de Madrid, España.

^d Dirección de Innovación Tecnología de Acciona Construcción S.A

Resumen—La presente investigación consiste en el desarrollo de un novedoso material elastomérico fabricado a partir del reciclado de neumáticos. Este material se emplea como atenuador de vibraciones en sistemas comúnmente usados en las líneas férreas. Una vez definida la rigidez estática del sistema y caracterizados los componentes elásticos del conjunto, se fabricaron cuatro prototipos a escala real para validar su comportamiento acústico. Tras los ensayos realizados, se observa que este material sufre un proceso de flexibilización, en lugar del habitual proceso de rigidización en cauchos sintéticos, debido a los efectos derivados de la fatiga. Los resultados numéricos confirman la viabilidad de este nuevo eco-material para su uso como atenuador de vibraciones en líneas ferroviarias.

Palabras Clave— Neumático reciclado, análisis acústico, elastómero, vibración, validaciones.

Abstract—This research consists of the development of a novel elastomeric material manufactured from tyre recycling. This material is used as a vibration attenuator in systems commonly used in railway lines. Once the static rigidity of the system was defined and elastic components of the assembly were characterized, four full-scale prototypes were manufactured for validate their acoustic behavior. After tests carried out, it is observed that this material undergoes a process of flexibility, instead of the usual stiffening process in synthetic rubbers, due to the fatigue-derived effects. The numerical results confirm the feasibility of this new eco-material for use as a vibration attenuator on railway lines.

Index Terms—Recycled tires, acoustic analysis, elastomer, vibration, validations,

I. INTRODUCCIÓN

Uno de los residuos más contaminantes de la sociedad actual, tan dependiente del automóvil, son los neumáticos fuera de uso. La Comisión Europea a través de la Directiva

2008/98/CE prohíbe el depósito de estos residuos en vertederos y obliga a su reutilización o valorización (European, 2008). Por otro lado, y gracias a las excelentes propiedades elásticas de este material, hacen de los neumáticos un producto idóneo para mejorar los niveles de

Catalina Mondragón-Enguïdanos y Jorge Gómez-Hoyos, pertenecen a la empresa Acciona Construcción S.A, a la Dirección de Innovación Tecnológica. Amparo Verdú-Vázquez, Tomás Gil-López pertenecen al Departamento de Tecnología de la Edificación, Escuela Técnica Superior de Edificación, Universidad Politécnica de Madrid.

atenuación de vibraciones en el sector ferroviario, especialmente en entorno urbano (Sol-Sanchez et al., 2020).

En este artículo se analiza la adecuación de un nuevo material elastómero, creado a partir de neumáticos fuera de uso, para su aplicación en sistemas de vía en placa con fijación indirecta, que son aquellos en los que se interpone un elemento elástico entre el carril y la placa principal de hormigón.

Esta tipología ha sido ampliamente implantada en las líneas del metro en la ciudad de Madrid durante más de 25 años a través del sistema Edilon (Gonzalez and Fuentes, 2019). El objetivo del elastómero desarrollado es que se pueda emplear tanto en la construcción de nuevas líneas metropolitanas como en la renovación de los tramos de vía existentes. Los datos experimentales obtenidos durante esta investigación serán útiles para nuevos estudios que vayan enfocados a aprovechar las ventajas de los neumáticos fuera de uso en otros elementos de la plataforma ferroviaria o en otras aplicaciones de ingeniería (Pajak et al., 2019).

Caracterizar y previsualizar el correcto funcionamiento de un sistema de bombeo formado por diversos elementos (bombas, tuberías, cuadros de comunicación...) de diferentes fabricantes, que en su conjunto permitan controlar la presión de lavado del suelo en la cámara de excavación y mantener el caudal durante la extracción fuera de la galería.

Desarrollar una solución más eficiente y segura, que respete en medio ambiente a la vez que tenga un desgaste controlado de los dispositivos de transporte y extracción.

II. MATERIALES Y MÉTODO

La investigación se desarrolla en tres fases:

- Caracterización mecánica de los materiales, donde se definen las propiedades del material elastomérico.

- Caracterización mecánica de los prototipos para su validación mecánica en laboratorio, acorde a la normativa establecida.

- Caracterización vibro acústica, para obtener la frecuencia de resonancia del sistema y los valores de pérdidas por inserción dependientes de la frecuencia.

A. Características de los materiales

El elastómero propuesto en este estudio consiste en una mezcla de partículas de caucho, obtenidas a partir del corte mecánico de neumáticos fuera de uso, mezcladas con una resina, que actúa como matriz de las partículas de caucho. Las partículas de caucho fueron clasificadas en 3 granulometrías principales, de acuerdo a los tamaños comerciales existentes: grano grueso (2,5 – 4 mm), grano medio (0,8 – 2,5 mm) y grano fino o también denominado polvo de neumático (< 1 mm). La resina empleada como ligante de las partículas de caucho fue una resina de poliuretano mono-componente por sus altas propiedades mecánicas, su mejor trabajabilidad y su menor coste en comparación con otro tipo de resinas.

Se fabricaron catorce probetas cilíndricas (con un diámetro de 150 mm y una altura de 300 mm) con diferentes mezclas de caucho y porcentajes de resina (entre el 15% y el 40% en peso de caucho) para la determinación de su módulo de Young. El proceso de mezclado fue manual y el curado se realizó a temperatura ambiente durante un tiempo no inferior a 24 horas. El módulo de Young se obtuvo realizando sobre las probetas una carga de compresión de 8 kN, equivalente a una tensión de 0,45 MPa, en una prensa multi-ensayos (OMADISA 34.120.31) con una célula de carga de 200 kN. Este módulo de Young se establece a partir de la Ley de Hooke, de acuerdo a la Ecuación 1.

$$E = \frac{F \cdot L_0}{S \cdot \Delta L} \quad (1)$$

Donde E es el módulo de Young (N/mm²), F la fuerza aplicada (N), L₀ la altura de la probeta (mm), S la sección transversal de la probeta (mm²) y ΔL la elongación de la probeta (mm).

El módulo de Young se determinó para el valor medio de tres ciclos de carga en cada probeta, aplicando un ajuste de mínimos cuadrados en cada ciclo, dentro del tramo elástico del material. En la Tabla 1 se recogen las dosificaciones empleadas para la fabricación de probetas y los valores del módulo de Young obtenidos para cada dosificación. En dicha tabla se refleja el porcentaje de cada una de las granulometrías empleadas sobre el total de masa de neumático, y el contenido de resina, expresado igualmente en tanto por ciento, está referido en peso de neumático.

Por otro lado, el bloque de hormigón que descansa sobre el elastómero desarrollado está equipado con una sujeción, compuesta a su vez por: placa acodada ligera A2, placa de asiento de 7 mm con rigidez 100 kN/mm, clip elástico SKL-1, tornillo 22-115-5 y vaina 22-115. Esta sujeción ha sido ampliamente investigada en laboratorio y testada en campo a lo largo de los últimos años (Diego et al., 2010), por lo que la validación que se va a describir en este documento no está enfocada hacia dicha sujeción sino hacia la interacción global del conjunto, es decir, el efecto combinado de la fijación Vossloh y el elastómero propuesto a partir de neumático fuera de uso. El carril correspondiente para esta fijación Vossloh sería el UIC-54 EI. No obstante, el procedimiento llevado a cabo sería análogo para carriles tipo UIC-60 EI.

El siguiente paso del desarrollo fue establecer las dosificaciones óptimas para la fabricación de prototipos a escala real en base a los módulos de Young obtenidos en probeta. Para ello, lo primero fue establecer la rigidez estática del sistema, representada por la letra K y expresada en kN/mm. Esta rigidez, que se define como la carga necesaria para producir una deflexión unitaria en el carril en el punto de aplicación de dicha carga, es el parámetro mecánico

fundamental que define a cualquier sistema de vía, ya que está directamente relacionado con el confort del viajero durante el tránsito y por su capacidad para atenuar vibraciones (Fonseca, 2003).

En este caso, la rigidez establecida para el sistema

TABLA I
COMBINACIONES DE TAMAÑOS DE GRANO Y CONTENIDO DE RESINA EN PESO DE NEUMÁTICO

	Grano grueso (%)	Grano medio (%)	Grano fino (%)	Resina (%)	E (MPa)
1	50%	50%	0%	40%	7.54
2	0%	0%	100%	40%	2.85
3	40%	40%	20%	40%	1.63
4	100%	0%	0%	40%	1.18
5	30%	70%	0%	40%	1.05
6	50%	50%	0%	30%	4.67
7	0%	100%	0%	30%	3.06
8	30%	40%	30%	30%	2.23
9	0%	0%	100%	30%	1.89
10	100%	0%	0%	30%	0.72
11	50%	50%	0%	30%	1.62
12	0%	0%	100%	20%	1.59
13	100%	0%	0%	20%	0.75
14	50%	50%	0%	15%	1.43

propuesto fue de $K = 20$ kN/mm, ya que la compañía que gestiona la red de metro de la ciudad de Madrid (Metro de Madrid) quería sustituir el sistema Edilon con una rigidez standard de 60 kN/mm (sistema EBS LR SS), por un sistema de menor rigidez, equivalente al sistema de media rigidez de Edilon, con una rigidez $K = 15$ kN/mm (sistema EBS LR MS).

Una vez definida la rigidez del sistema fue necesaria establecer el diseño de mezclas para conseguir dicha rigidez. Para ello, se decidió utilizar dos mezclas elastoméricas diferentes: una para la base, que se ajusta a las dimensiones de la cara inferior del bloque de hormigón (430 x 280 mm), con un valor bajo del módulo de Young, de acuerdo a los resultados reflejados en la tabla 1, ya que se busca una alta elasticidad vertical del sistema, y otra mezcla para los laterales, con el mayor valor posible del módulo de Young, ya que aquí interesa que la rigidez horizontal del sistema sea muy alta para evitar sobre-anchos de vía. La combinación de ambas mezclas elastoméricas, junto con la rigidez característica de la fijación Vossloh superior, debe dar como resultado una rigidez del sistema equivalente a $K = 20$ kN/mm.

Para definir este diseño de mezclas se fabricó una batería de prototipos para su ensayo mediante un procedimiento de prueba y error hasta ajustar las mezclas para obtener la rigidez buscada. Una vez ajustado el diseño de mezclas se fabricaron 4 prototipos a escala real e idénticas condiciones, para su validación mecánica y acústica en laboratorio.

B. Características de los prototipos.

La batería de ensayos para la validación mecánica del sistema de sujeción propuesto se realizó en base a diferentes normas europeas, como se puede apreciar en la Tabla 2. Los ensayos de validación mecánica se han realizado en el Laboratorio de la División de Ciencia e Ingeniería de Materiales (LADICIM) de la Universidad de Cantabria, que dispone de acreditación ENAC (Entidad Nacional de Acreditación). Además, los ensayos se realizaron bajo la supervisión de INECO, ingeniería que habitualmente asesora al Ministerio de Fomento español.

La batería de ensayos mecánicos únicamente fue necesaria realizarla sobre uno de los prototipos fabricados, escogido aleatoriamente por INECO, sobre el que se imprimió un par de apriete de 250 Nm para minimizar los efectos generados por las imperfecciones geométricas del bloque.

A continuación, en la Tabla 2, se resume la batería de ensayos realizados sobre el prototipo, reflejando tanto la normativa de aplicación como el valor a cumplir.

La primera prueba de la batería fue el ensayo de rigidez dinámica a baja frecuencia para caracterizar la elasticidad del sistema de sujeción y comprobar que la rigidez del conjunto era inferior a 50 kN/mm. Este ensayo se realizó aplicando una fuerza cíclica de compresión con un valor mínimo de 5 kN y un valor máximo de 35 kN, a 4 Hz durante 1.000 ciclos.

El segundo ensayo de la batería fue la determinación de la fuerza de apriete, consistente en aplicar, a través del cupón del carril, una fuerza de tracción creciente que tienda a producir la separación entre el carril y el bloque de hormigón, de manera que la placa de asiento se pueda retirar manualmente. A continuación, se descarga el sistema hasta las condiciones iniciales del ensayo, es decir, hasta recuperar el posicionamiento original del carril con respecto del bloque cuando estaba colocada la placa de asiento.

El tercer ensayo de la batería fue el correspondiente al deslizamiento longitudinal. Para este ensayo se dispuso el prototipo sujeto a la bancada de ensayo y mediante un tirador soldado al carril, se impuso una carga de carácter horizontal, coincidiendo con el eje del carril.

El ensayo consiste en registrar la carga y el desplazamiento longitudinal efectuado por el carril al aplicar una carga de tracción escalonada en incrementos de 2,5 kN hasta que se produzca el deslizamiento longitudinal del carril respecto a la bandeja de hormigón o la carga sea mayor que cuatro veces la exigida en funcionamiento (δ_{max}), momento en el que se reduce la carga rápidamente a cero y se continúa midiendo el desplazamiento del carril durante 2 minutos, registrando el deslizamiento remanente (δ_{min}). A partir de la diferencia de estos dos valores (Δd), se obtiene de dicha curva la resistencia al deslizamiento longitudinal, aportada por las fijaciones, como la carga correspondiente al valor de deslizamiento (Δd).

El siguiente ensayo se corresponde con el de cargas cíclicas.

TABLA II
SISTEMA DE ENSAYOS PARA LA VALIDACION MECANICA DEL SISTEMA
DE SUJECION PROPUESTO

ENSAYO		VALOR A CUMPLIR
Ensayo de rigidez dinámica a baja frecuencia		< 50 kN/mm
Efecto de las cargas repetidas: (UNE-EN 13146-4:2002) ⁷	Fuerza de apriete	
	Deslizamiento longitudinal	>7 kN
	Rigidez vertical	
	Carga cíclica (3M ciclos)	
	Rigidez vertical	< 25%
	Deslizamiento longitudinal	< 20%
Fuerza de apriete		< 20%

En este ensayo se aplicó una carga variable al prototipo, hasta una carga máxima de 50 kN, durante 3 millones de ciclos a una frecuencia de 5 Hz, un ángulo de aplicación de 45° y una distancia entre la línea de aplicación y el centro del radio de la esquina interior de la cabeza del carril de 100 mm.

El resultado del ensayo se obtiene realizando una inspección visual de los diferentes elementos de la fijación sin desmontar y midiendo la diferencia de los desplazamientos relativos anteriormente señalados al inicio y al fin de los 3 millones de ciclos de fatiga.

Para el ensayo de rigidez vertical se empleó la misma disposición y el mismo equipo que en el ensayo de rigidez dinámica a baja frecuencia. Se aplicó sobre el carril una carga vertical de 85 kN procediéndose después a la descarga de dicha fuerza.

Además de los ensayos mencionados anteriormente, y fuera del alcance ENAC, se realizaron un ensayo de resistencia eléctrica y un ensayo de adherencia del elastómero al bloque de hormigón sobre el prototipo.

El ensayo de resistencia eléctrica se realizó según la norma UNE-EN 13146-5:20038 (UNE, 2002a) y la especificación de vía “Fabricación y homologación de vía en placa con tacos prefabricados embebidos en elastómero”, Metro de Madrid, MM-EV-1-2-019 (Fabricación, 2005). La configuración de este ensayo establece el posicionamiento de dos prototipos a la distancia correspondiente al ancho de vía, 1.445 mm, dentro de una plataforma de hormigón para efectuar el riego, de dimensiones de 20 x 100 x 250 cm, apoyada en una sub-base eléctricamente aislante. Posteriormente se posiciona un pórtico con un sistema de 4 inyectores y se conectan los cupones de carril al circuito de corriente alterna de 27 V. El pórtico con el sistema de riego se sitúa en el plano vertical que pasa por el

eje longitudinal de la placa y, los inyectores a una de 1000 mm de la superficie superior de la cabeza del carril y distancias entre sí a 400 mm del plano de simetría de los cupones de carril. El valor mínimo de resistencia eléctrica debe ser superior a 5 kΩ

El ensayo de adherencia al bloque se realizó mediante el procedimiento de Metro de Madrid descrito para el ensayo de resistencia eléctrica. En este ensayo el bloque de hormigón se somete a un ensayo de carga vertical, manteniendo la bandeja firmemente sujeta a la bancada, y se detiene manteniendo la carga constante, durante 30 segundos, cuando se haya elevado el dado 2 mm respecto a la bandeja. Tras los 30 segundos, se retira a carga suavemente, y a continuación, para conocer la resistencia última del sistema en estas condiciones de esfuerzo se lleva a cabo el arranque del componente empotrado.

C. Características vibro acústicas.

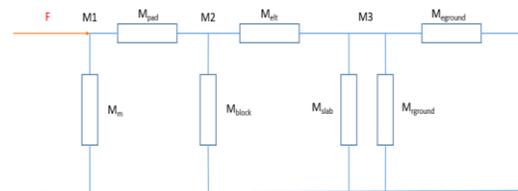


Fig. 1. Analogía eléctrica del modelo mecánico de cálculo.

La atenuación de vibraciones de un sistema a través de un elemento elástico se define mediante el parámetro de pérdidas por inserción IL (dB) (Hussein and Hunt, 2003; Diego et al., 2017). Este parámetro muestra la diferencia entre la fuerza transmitida por el sistema, proveniente de una fuerza de excitación, una vez insertado el elemento elástico, en este caso ELTs, y la fuerza transmitida en ausencia de este elemento, de acuerdo a la Ecuación 2 (ISO, 2008).

$$IL = 20 \cdot \log \left(\frac{F_{\text{con elemento elástico}}}{F_{\text{sin elemento elástico}}} \right) \text{ (dB)} \quad (2)$$

Las pérdidas por inserción del sistema fueron obtenidas a partir de un modelo mecánico, y su análogo circuito eléctrico. Para ello fue necesario conocer la rigidez dinámica y el factor de pérdidas del elemento elástico, parámetros que inciden directamente sobre las pérdidas por inserción. Los ensayos para determinar estos parámetros se realizaron en colaboración con el departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Sevilla, sobre el prototipo no sometido a ensayo durante la batería de ensayos mecánicos en LADICIM, siguiendo las indicaciones de la norma UNE-EN ISO 10846-212 (UNE, 2002b), aplicando el método directo, por el cual se mide la fuerza a la salida del sistema y el desplazamiento a la entrada.

La rigidez y el factor de pérdida varían en función de la carga aplicada. Teniendo en cuenta que el sistema desarrollado está enfocado a vías de metro, se pueden encontrar dos valores recomendados: una carga por rueda de 60 kN o de 85 kN. Por lo tanto, los ensayos se realizaron con los valores

mencionados. Sin embargo, fue necesario hacer una modificación puesto que en una vía real la carga por rueda no está soportando un solo apoyo sino varios, y el reparto de carga varía en función de la rigidez del apoyo y la rigidez de la vía. En este caso, suponiendo que la distancia entre apoyos es de 1 m, que el carril es del tipo UIC-54 EI y que la carga de la rueda está aplicada justo encima de uno de los apoyos, se puede comprobar que la carga que en realidad se lleva el apoyo que está debajo de la rueda es de 30 kN o 40 kN respectivamente, para las dos cargas por rueda mencionadas anteriormente.

Para la medida de la rigidez sobre cada ciclo de carga se calculó la rigidez de dos formas: ajustando la nube de puntos por una línea recta donde la pendiente de ésta es la rigidez y a través del cociente entre el incremento de fuerza y el incremento de desplazamiento.

Para la medida del factor de pérdidas se emplearon las mismas cargas que las mencionadas para la medida de rigidez. El factor de pérdidas, η , se puede obtener a partir de la energía disipada (E_d) en cada ciclo (Liu et al., 2014), de acuerdo a la Ecuación 3.

$$E_d = \pi \eta k X^2 \quad (3)$$

Donde k , es la rigidez medida, tal y como se muestra en el apartado anterior, y X es la amplitud del desplazamiento en el ciclo, es decir, la mitad del rango.

Una vez obtenidos todos los parámetros necesarios, se determinó con la ayuda del software MATLAB (Zbiciak et al., 2017), el cálculo de las pérdidas por inserción mediante un modelo teórico, partiendo de un modelo mecánico del sistema.

Dónde: M_m es la impedancia correspondiente a la masa del sistema; M_{pad} es la impedancia correspondiente a la placa de asiento del carril; M_{block} es la impedancia correspondiente al bloque de hormigón; M_{elt} es la impedancia correspondiente con el elastómero a base de ELT; M_{slab} es la impedancia correspondiente a la solera de hormigón; y M_{ground} es la impedancia correspondiente con la elasticidad del suelo atravesado.

Este modelo mecánico se puede traducir en el modelo eléctrico representado en la Figura 1.

En este modelo eléctrico las impedancias se definen de acuerdo a las Ecuaciones 4 a 10:

-Impedancia de la masa del sistema:

$$M_m = \frac{1}{j\omega_n m_m} \quad (4)$$

-Impedancia de la placa de asiento de carril:

$$M_{pad} = \frac{j\omega_n}{K_{pad}(1+j\eta_{pad})} \quad (5)$$

siendo K_{pad} la rigidez dinámica y η_{pad} el factor de pérdidas de la placa de asiento.

-Impedancia del bloque de hormigón:

$$M_{block} = \frac{1}{j\omega_n m_{block}} \quad (6)$$

siendo m_{block} la masa del bloque de hormigón.

-Impedancia elastómero ELT:

$$M_{elt} = \frac{j\omega_n}{K_{elt}(1+j\eta_{elt})} \quad (7)$$

siendo K_{elt} la rigidez dinámica y η_{elt} el factor de pérdidas del elastómero.

-Impedancia de la solera de hormigón:

$$M_{slab} = \frac{1}{j\omega_n m_{slab}} \quad (8)$$

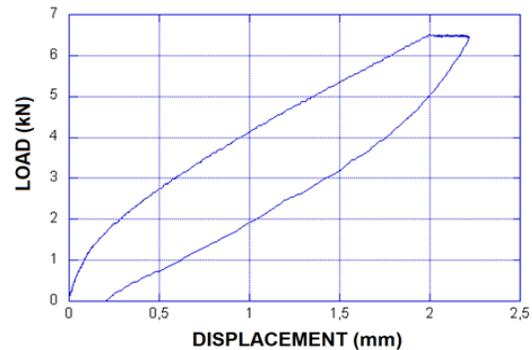


Fig. 2. Resultado de ensayos de adherencia.

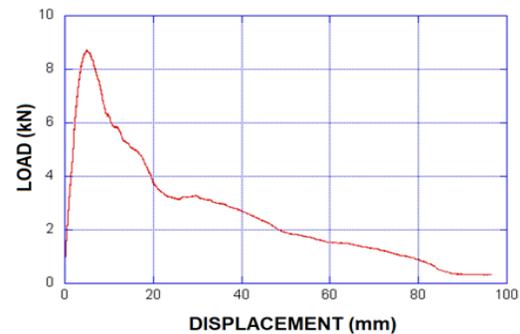


Fig. 3. Ensayos de carga vertical de arranque.

siendo m_{slab} la masa de la solera de hormigón obtenida a partir del área de influencia sobre la que se reparte la carga aplicada al bloque de hormigón.

-Impedancia del suelo:

$$M_{rground} = \frac{1}{j\omega_n m_{ground}} \quad (9)$$

siendo m_{ground} la masa del área de influencia del suelo y

$$M_{eground} = \frac{j\omega_n}{K_{ground}(1+j\eta_{ground})} \quad (10)$$

siendo K_{ground} la rigidez dinámica y η_{ground} el factor de pérdidas del suelo.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Resultado de la validación mecánica del laboratorio.

Tras la realización de la batería completa de ensayos sobre el prototipo analizado se procedió a comprobar que las variaciones adquiridas por el sistema tras el efecto del ensayo

TABLA III
RESULTADOS DE RIGIDEZ DINÁMICA Y FACTOR DE PÉRDIDAS

	Frecuencia (Hz)	0,1	1	2	5	10	15	18	20	25
30 kN	Ciclos promedio	5	15	15	20	30	40	40	40	40
	Rigidez (kN/mm)	31,4	34,1	35,3	37,0	41,9	41,2	41,2	40,9	40,7
	Factor de pérdida	0,12	0,10	0,11	0,11	0,09	0,11	0,09	0,06	0,07
40 kN	Ciclos promedio	5	15	15	20	30	40	40	40	40
	Rigidez (kN/mm)	38,5	41,2	41,6	43,7	44,7	47,7	48,7	54,6	51,8
	Factor de pérdida	0,09	0,09	0,09	0,09	0,10	0,09	0,09	0,07	0,07

de cargas repetidas fueran menores que el requisito establecido.

A continuación, en la Tabla 3, se presentan los resultados previos y posteriores al ensayo de fatiga con sus respectivas

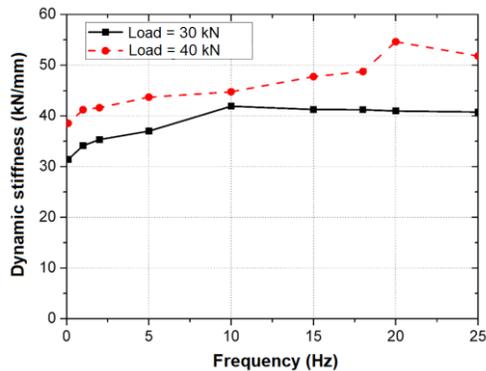


Fig. 4. Rigidez para unas cargas de 30 y 40 kn.

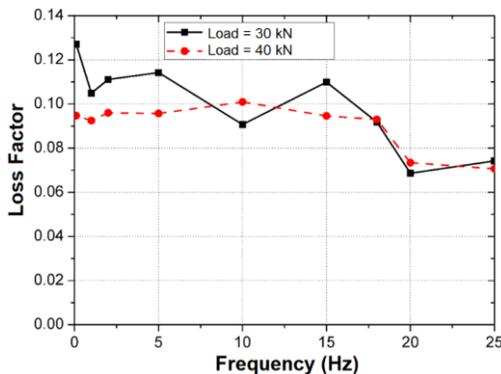


Fig. 5. Factor de perdidas para unas cargas de 30 y 40 kn.

variaciones y exigencias sobre el prototipo ensayado.

Como se puede comprobar las variaciones quedan por debajo de las exigencias especificadas en las normas de aplicación.

No obstante, un aspecto a tener en cuenta es la flexibilización de la rigidez del sistema con la fatiga, en contraposición con los habituales cauchos sintéticos. Este

fenómeno de flexibilización puede ser debido a una degradación del material, previsiblemente un deterioro en la interfaz caucho-resina (Gómez et al., 2019).

Además, se produce un desplazamiento horizontal de 4,24 mm. En la Normativa Europea no se hace referencia a ningún valor concreto, pero, en cualquier caso, el valor obtenido es del mismo orden que el de otros sistemas existentes en el mercado, de acuerdo a la experiencia de INECO.

Finalmente, en la Figura 2 se muestra el resultado del ensayo de prueba de adherencia sobre el bloque de hormigón del prototipo y en la Figura 3, el ensayo de arranque posterior del mismo.

TABLA IV
RESUMEN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LA BATERIA DE ENSAYOS BAJO ACREDITACION ENAC

ENSAYO	PREV	POSTERIOR	VARIACION (%)
Rigidez dinámica a baja frecuencia (kN/mm)	31,58	-	-
Resistencia longitudinal (kN)	10,00	10,13	1,3
Fuerza de apriete (kN)	16,07	15,10	-6,04
Rigidez vertical a 85 kN (kN/mm)	27,00	22,50	-16,67

B. Resultado de la caracterización vibro acústica.

La Tabla 4 representa el valor medio entre todos los ciclos de la rigidez obtenida en cada uno. Debido a ruido en la señal o interferencia de otras máquinas, la señal no fue totalmente limpia y aparecen ondulaciones. Sin embargo, la desviación típica expresada en tanto por ciento del valor de rigidez está, salvo a frecuencias altas, entorno al 2%, lo cual proporciona confianza en los valores obtenidos.

Al igual que con la rigidez, el factor de pérdida se ha calculado para cada ciclo registrado y el valor mostrado en la Tabla 4 es el valor medio entre todos los ciclos. La desviación típica del factor de pérdida expresado en tanto por ciento es menor del 10%, salvo a frecuencias altas, para la carga de 30 kN y por debajo del 4% para la carga de 40 kN.

Las Figuras 4 y 5 muestran los valores obtenidos para la rigidez y el factor de pérdidas en función de la frecuencia y la carga.

Una vez obtenidas en laboratorio la rigidez dinámica y el factor de pérdidas, para la obtención de la curva de pérdidas por inserción, se analizó el circuito eléctrico definido y fue obtenida la fuerza (intensidad) que atraviesa la impedancia Mrsuelo (teniendo en cuenta la impedancia del elemento elástico y la fuerza que atraviesa esta misma impedancia igualando a cero la impedancia del elemento elástico). Relacionando estas dos fuerzas con el tipo de vehículo que indica la normativa de Metro de Madrid, el tipo de carril y las características intrínsecas de cada uno de los materiales elásticos, se obtiene a partir del software MATLAB la curva que se puede observar en la Figura 6.

IV. CONCLUSIONES

Los neumáticos fuera de uso se están convirtiendo en un grave problema medioambiental, y numerosos países de la Unión Europea. Conscientes de su impacto en la sociedad están promoviendo el reciclado y valoración de este tipo de residuos. Este estudio está enfocado en la validación de un nuevo material elastómero, fabricado a partir de neumáticos fuera de uso, para reducir las vibraciones derivadas del tráfico ferroviario en líneas de metro. Este nuevo material se empleará en sistemas de vía en placa con bloques de hormigón prefabricados embebidos en elastómero, una de las tipologías características para la construcción de vías férreas de las redes de metro urbano. Las propiedades mecánicas de este nuevo material, así como su eficiencia frente a vibraciones han sido validadas experimental y teóricamente.

Se han caracterizado, a través de la obtención de su módulo de Young, diferentes mezclas de partículas de caucho y contenidos de resina. De esta caracterización, se ha obtenido una variación del módulo de Young de las probetas fabricadas entre 1 y 7,5 MPa, en función de la mezcla seleccionada.

Una vez caracterizadas las mezclas, mediante un procedimiento de prueba y error a nivel de prototipo en laboratorio, se ajustó la rigidez buscada ($K = 20 \text{ kN/mm}$) para su posterior validación mecánica. Esta validación mecánica se realizó siguiendo indicaciones de diferentes normas europeas y constaba de ensayos de rigidez dinámica a baja frecuencia, fuerza de apriete, deslizamiento longitudinal, resistencia eléctrica, adherencia del elastómero al bloque de hormigón y prueba de fatiga (hasta 3 millones de ciclos). En este sentido, se pudo observar que uno de los efectos derivados de la fatiga, es que el material sufre un proceso de flexibilización en lugar del habitual proceso de rigidización en cauchos sintéticos. A la vista de los resultados obtenidos en la batería de ensayos, se determina que, desde el punto de vista mecánico, las variaciones quedaban por debajo de las exigencias establecidas en la norma y que el sistema desarrollado puede ser utilizado en condiciones reales de servicio.

Respecto a la caracterización vibroacústica, se obtuvieron experimentalmente los valores de rigidez dinámica y factor de

pérdidas para diferentes frecuencias. Una vez obtenidos estos parámetros, se definió un modelo teórico para el cálculo de las pérdidas por inserción del sistema. Los resultados dieron una frecuencia de resonancia de 15 Hz, un valor máximo de

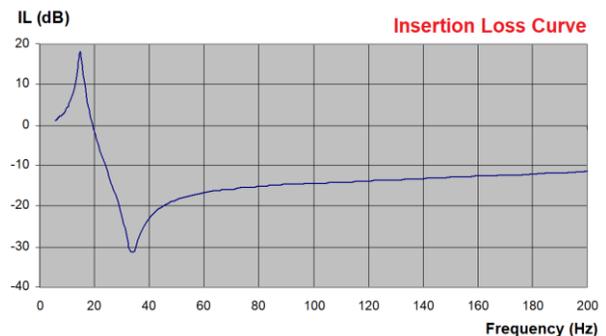


Fig. 6. Curvas de pérdida de inserción en función de la frecuencia.

atenuación de 31,5 dB a 34 Hz y un valor de atenuación de 15 dB por encima de 45 Hz.

Los valores anteriormente expresados prueban la viabilidad de este nuevo eco-material para ser empleado como atenuador de vibraciones en líneas ferroviarias. El conocimiento las propiedades de este material, fruto de esta investigación, permitirá el desarrollo de nuevas aplicaciones en el campo de la ingeniería.

AGRADECIMIENTOS

Alguno de los trabajos descritos en este documento fueron desarrollados en el marco del proyecto NEUVIA (diseño de un sistema de vía en placa con una mezcla de neumáticos fuera de uso y resina), junto con el personal del Centro Tecnológico de Acciona Construcción, gracias a todos y cada uno de ellos por su supervisión técnica a lo largo de las pruebas de validación y por su interés y predisposición al desarrollo de nuevas tecnologías.

REFERENCIAS

- Diego, S.; Casado, J.A.; Carrascal, I.A.; Polanco, J.A.; Gutiérrez-Solana, F. (2010) "Experimental Validation of an Adjustable Railway Fastening for Slab Track," *J Test Eval* 38 no. 5 (September 2010): 598-608, <https://doi.org/10.1520/JTE102763>.
- Diego, S.; Casado, J.A.; Carrascal, I.; Ferreño, D.; Cardona, J.; Arcos, R. (2017). "Numerical and experimental characterization of the mechanical behavior of a new recycled elastomer for vibration isolation in railway applications". *Construction and Building Materials* 134 18-31. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.115>.
- European (2008). European Parliament and Council. Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain directives. *Off J Eur Union*. 2008:3-30. doi:2008/98/EC.;

- 32008L0098, <https://perma.cc/L28E-BK3L>.
- Fabricación (2005). Fabricación y homologación de vía en placa con tacos prefabricados embebidos en elastómero, MMEV-1-2-01 (2005) (Metro de Madrid, 2005).
- Fonseca, P. (2003) “Contribución a la reducción de los costes de mantenimiento de vías de alta velocidad mediante la optimización de su rigidez vertical” (PhD. Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, 2003).
- Gómez, J.; Casado, J.; Carrasco, I.; Diego, S.; Ferreño, D.; Mondragon, C. (2019) “Experimental validation of a new anti-vibration elastomeric material from end-of-life tires for slab track systems with embedded rail”. *Journal of Testing and Evaluation* 49 (April 2019). <https://doi.org/10.1520/JTE20180804>.
- Gonzalez, F.J.; Fuentes, J. (2019). “Sistemas ferroviarios: planificación, ingeniería y explotación”. Editorial Universidad Nacional de Educación a Distancia (marzo 2019).
- Hussein, M.F.M; Hunt, H.E.M. (2003). “An insertion loss model for evaluating the performance of floating-slab track for underground railway tunnels”. Tenth international Congress of sound and vibration. 7-10 July 2003.
- ISO (2008). Laboratory measurement of vibro-acoustic transfer properties of resilient elements, ISO 10846-1(2008) (Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2008).
- Liu, Y.; Luo, Y.; Yin, H.P. (2014). “Experimental and numerical analysis of nonlinear properties of rail fastening systems”. International conference of computational methods in sciences and engineering 2014 (October 2014). <https://doi.org/10.1063/1.4897668>.
- Pajak, M.; Janiszewski, J.; Kruska, L. (2019). “Laboratory investigation of the influence of high compressive strain rates on the hybrid fibre reinforced self-compacting concrete”. *Construction and Building Materials* 227. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116687>.
- Sol-Sanchez, M.; Moreno-Navarro, F.; Saiz, L.; Rubio-Gamez, M.C. (2020). “Recycling waste rubber particles for the maintenance of different states of railway tracks through a two-step stoneblowing process”. *Journal of Cleaner Production* 244. (January 2020). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118570>.
- UNE (2002a). UNE-EN 13146-5. Railway applications – Track – Test method for fastening systems. Part 5: Determination of the electrical resistance.
- UNE (2002b). UNE-EN 13146-4. Railway applications – Track – Test method for fastening systems. Part 4: Effect of repeated loading. 2002.
- Zbiciak, A.; Kraskiewicz, C.; Oleksiewicz, W.; Pludowska-Zagrajek, M.; Lipko, C. (2017). “Mechanical Modelling and application of vibroacoustic isolators in railway tracks”. *MATEC Web of Conferences* 117. Theoretical Foundation of Civil Engineering. XXVI R-S-P Seminar 2017. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20171170009>.



Reconocimiento – NoComercial (by-nc): Se permite la generación de obras derivadas siempre que no se haga un uso comercial. Tampoco se puede utilizar la obra original con finalidades comerciales.