

NEOBALLAST*: Desarrollando el balasto del futuro

NEOBALLAST: Seeking the ballast of the future

N. Manzo Costanzo¹, A. López Pita¹, V. Fontserè², J.A. Casado³, I. Carrascal³, S. Diego³

¹ E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España

² COMSA S.A., Barcelona, España

³ E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad de Cantabria, Santander, España

RESUMEN

Los costes de mantenimiento en vías en balasto han ido incrementado significativamente en las últimas décadas como producto del aumento de las velocidades comerciales, un ejemplo reciente es la línea de alta velocidad París-Estrasburgo que ha pasado de velocidades de 300 km/h a 320 km/h. Este tipo de avances requieren que la calidad geométrica de la vía sea óptima, a fin de cumplir con los niveles de seguridad necesarios.

En España el coste de mantenimiento de las vías de alta velocidad ronda los 100.000 € por km/año^[1]. Considerando que es el país con mayor longitud de vías de alta velocidad en Europa (más de 3.100 km en servicio), existe un gran interés en encontrar nuevas alternativas que contribuyan a reducir los costes asociados a la infraestructura ferroviaria.

La alta frecuencia de mantenimiento que requiere el balasto, la dificultad de disponer de áridos de alta calidad dependiendo de la zona de actuación y las problemáticas asociadas a las vibraciones inducidas por el paso de trenes, ponen de manifiesto que las innovaciones relacionadas a la capa de balasto son de vital importancia para acompañar los avances efectuados en la calidad de los servicios ferroviarios.

En este sentido y empleando materiales reciclables, se pueden obtener soluciones reales a los problemas existentes que a su vez contribuyan con una disminución de residuos.

PALABRAS CLAVE

Balasto, neumáticos reciclados, abrasión, ruido y vibraciones, ensayos in-situ.

* NEOBALLAST es una marca registrada

ABSTRACT

Maintenance costs on ballasted tracks have increased significantly in recent decades as a result of increased commercial speeds, a recent example being the high-speed-line (HSL) Paris-Strasbourg went from a speed of 300 km/h to 320 km/h. Such innovations require that the geometric track quality be optimal, so as to meet the necessary safety standards.

In Spain the cost of maintenance for HSL is around € 100,000 per km/year^[1], and taking into consideration that it is the country with the greatest length of high-speed tracks in Europe (more than 3,100 km in service), there is great interest in finding new ways to help reduce the costs associated with the rail infrastructure.

The high frequency maintenance required for the ballast, the difficulty of obtaining high quality aggregates depending on the area of action, and the problems associated with the vibrations induced by passing trains reveal that innovations related to the ballast layer are essentials to accompany the progress made in the quality of rail services.

In this regard and using recyclable materials it is possible to obtain real solutions to the existing problems which in turn contribute to a reduction in waste.

KEY WORDS

Ballast, end-of-life tyres, abrasion, noise and vibrations, in-situ tests.

1. INTRODUCCION

La necesidad de mantener la competitividad con otros medios de transporte, ha obligado al ferrocarril a profundizar en materia de investigación brindando soluciones que lo hagan más eficiente, principalmente reduciendo los costes relacionados al mantenimiento de la infraestructura.

A pesar de su elevado coste inicial^[2], la vía en placa se ha pronunciado como solución para reducir los elevados costes de mantenimiento de las infraestructuras ferroviarias. Contrariamente a lo esperado, la experiencia ha puesto de manifiesto que ésta tipología de vía también presenta dificultades en lo que respecta al mantenimiento y, por tanto, muchas veces termina siendo una alternativa más costosa que la vía en balasto. Existen también, otras alternativas más recientes que recurren al empleo de polímeros^[4] y geotextiles^[5] para reducir las tareas de mantenimiento, aunque éstos se encuentran en fase de investigación aún.

En base a ésta problemática detallada, se está llevando a cabo una investigación que consiste en recubrir los áridos con neumáticos fuera de uso, con el objeto de disminuir el deterioro que éstos experimentan y de reducir las vibraciones que generan los trenes a su paso, aumentando el área y disminuyendo la rigidez del contacto entre partículas. A éste árido recubierto se lo denomina Neoballast. El presente proyecto de investigación tiene origen a través del subprograma INNFACTO 2012 impulsado por el Ministerio de Economía y Competitividad y de los fondos FEDER (Fondo Europeo de Desarrollo Regional), y del cual forman parte: COMSA S.A., Universidad Politécnica de Cataluña, MAPEI S.A. y ADIF.

Con la finalidad de establecer un análisis comparativo entre el comportamiento del balasto natural y el balasto recubierto con polvo de neumático, se han llevado a cabo numerosos ensayos. Como punto de partida se realizaron los típicos ensayos de laboratorio para balasto (Los Ángeles, Micro-Deval, Resistencia al Sulfato Magnésico, etc), continuando con ensayos específicos de resistencia al fuego, y de comportamiento del material a altas temperaturas. A continuación se realizaron ensayos bajo carga constante (Corte Directo de Gran Tamaño) y ensayos de carga cíclica en escala real, como el llevado a cabo en el Laboratorio de la División de Ciencia e Ingeniería de los Materiales (LADICIM) de la ETS de Caminos, Canales y Puertos de Santander. El presente escrito se centrará principalmente en los resultados obtenidos en este ensayo, ya que representa prácticamente las condiciones de carga reales a las que la capa de balasto se encuentra sometida.

Asimismo, con la finalidad de testificar la resistencia del material bajo la acción de la bateadora, se ha realizado un ensayo de bateo el cual se ha llevado a cabo en las vías correspondientes del Puerto de Gijón.

2. METODOLOGIA DE EVALUACION DEL NUEVO MATERIAL

Con la intención de realizar un análisis completo del material se ha dividido la investigación en dos etapas. La etapa inicial de estudio tiene por objetivo caracterizar el comportamiento del árido como partículas aisladas, mientras que la segunda etapa estudia el comportamiento del material en su conjunto y la interacción entre las partículas que componen la capa de balasto.

Los resultados al ensayar los materiales como partículas aisladas nos brindan indicios de como se comportarán los mismos en la vía, sin embargo, la información obtenida al realizar ensayos como conjunto en escala real, nos permite estudiar el comportamiento prácticamente idéntico al que se encuentra sometido el balasto en condiciones reales.

Diversas investigaciones relacionadas con el comportamiento del balasto bajo cargas cíclicas, han puesto de manifiesto la influencia de la generación de finos en la menor durabilidad de la capa de balasto^[6]. Debido a esto algunas administraciones han decidido renovar la capa de balasto cuando ésta alcanza un 30% de finos generados (Paul Godart, INFRABEL, RTSE Paris, Diciembre 2013).

Ensayos de laboratorio.

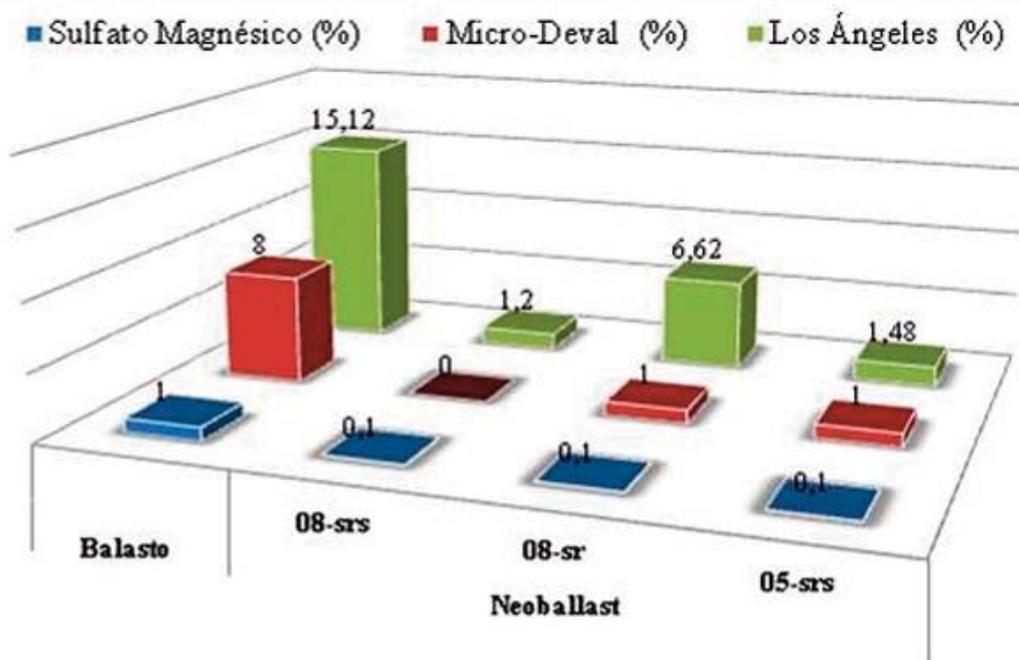
La primera etapa está compuesta por los ensayos de laboratorio clásicos para balasto definidos en la Normativa Europea UNE EN 13450, los cuales son:

- Ensayo de densidad de partícula y absorción de agua
- Resistencia a la Fragmentación por el método de Los Ángeles
- Ensayo Micro - Deval
- Ensayo de Resistencia al Sulfato Magnésico

Dada la muy baja porosidad de los áridos para balasto, en los ensayos de densidad de partícula y absorción de agua, no se han apreciado variaciones del árido recubierto respecto del natural. De todos modos, basándonos en los trabajos realizados Oldecop y Alonso^[7], se ha de destacar que al recubrir el árido se evita la formación de meniscos de agua en las fisuras, los cuales incrementan la velocidad de fragmentación de los mismos.

Respecto a los restantes ensayos realizados, los resultados obtenidos en el comportamiento del árido recubierto presentan mejoras significativas. La figura 1 resume los ensayos llevados a cabo para el árido natural y para tres muestras de árido recubierto a las cuales se les ha aplicado diferentes granulometrías de caucho y diversas metodologías de recubrimiento.

Figura 1. Ensayos de laboratorio realizados sobre balasto natural y Neoballast



Fuente: Elaboración propia.

Se han realizado tres tipologías de recubrimiento diferentes, con el objeto de definir cuál de ellos presentaba mejor comportamiento. Los resultados registrados para el ensayo más común sobre balasto (Ensayo de los Ángeles), han reflejado una reducción de hasta trece veces la fragmentación obtenida por el balasto recubierto respecto del balasto natural. Una tendencia similar también se aprecia en el ensayo Micro-Deval y en el ensayo de Resistencia al Sulfato Magnésico.

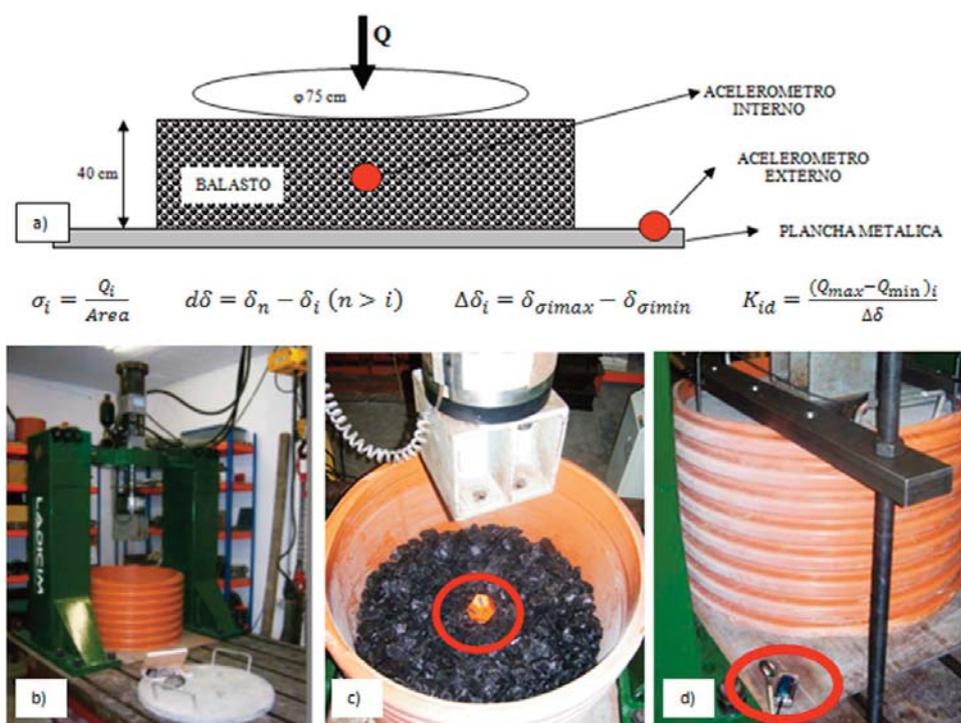
Ensayo cíclico a escala real (LADICIM).

Una vez superada la etapa de los ensayos clásicos, se aborda el estudio del material en su conjunto. Para llevar adelante esta etapa se trabaja conjuntamente con el Departamento de Materiales de la Universidad de Cantabria, el cual posee una amplia experiencia en ensayos ferroviarios en escala real.

El ensayo de carga cíclica está conformado por una capa de balasto de 40 cm de espesor sobre el cual se dispone una placa circular de 75 cm de diámetro en la que se aplican las cargas (Figs. 2.a y 2.b). Se realizan un total de cuatro ensayos a fatiga, dos sobre balasto natural y dos sobre el balasto recubierto, variando la frecuencia de aplicación de carga. Cada uno de ellos se compone de un millón de ciclos de carga. Tomando como referencia un vehículo ligero típico español con una separación entre ejes de 22m, se ha definido una tensión vertical (σ) de ensayo igual a 1,5 kg/cm² y frecuencias de aplicación de carga 2 Hz (160 km/h) y 5 Hz (396 km/h).

Otra importante problemática asociada al paso de vehículos ferroviarios por zonas urbanas es la generación de ruido y vibraciones^[8]. Con el fin de cuantificar esta variable mediante el empleo de dos acelerómetros (Figs. 2.c y 2.d), uno interno (MSR 145, 0-50 Hz) y otro externo (MSR 165, 0-200 Hz), se han registrado las vibraciones propagadas al momento de la aplicación de los ciclos de carga.

Figura 2. Equipo empleado para llevar a cabo los ensayos cíclicos



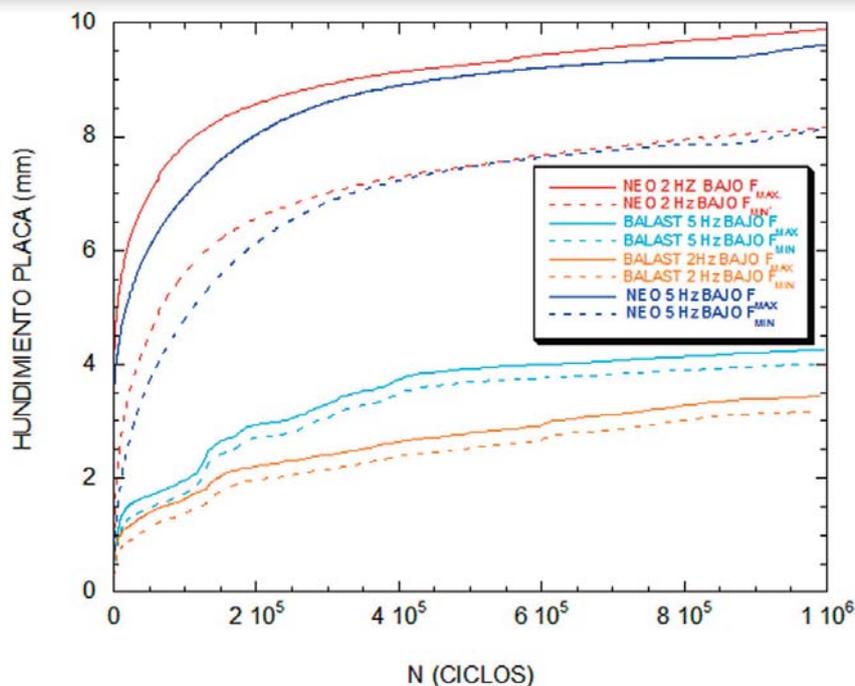
Fuente: Elaboración propia.

Para una mejor interpretación de los resultados obtenidos a lo largo de los ensayos, se analizan los siguientes aspectos: el hundimiento y asiento diferencial, la amplitud carga-descarga y rigidez dinámica, y las vibraciones registradas.

Hundimiento (δ) y asiento diferencial ($d\delta$).

El hundimiento bajo cargas experimentado por el balasto recubierto (9,5 a 10 mm) es del orden de más del doble del observado sobre el balasto natural (3,5 a 4,2 mm). En la figura 3 se puede apreciar como en los primeros 250.000 ciclos se produce alrededor del 80 por ciento del hundimiento total para el balasto recubierto y el 65 en el balasto natural, éste fenómeno tiene explicación en la baja compactación inicial de la muestra dada su ejecución en el laboratorio y en la consecuente variación del comportamiento por encima de los 250.000 ciclos al estabilizarse el material.

Figura 3. Asiento acumulado de las muestras ensayadas a fatiga

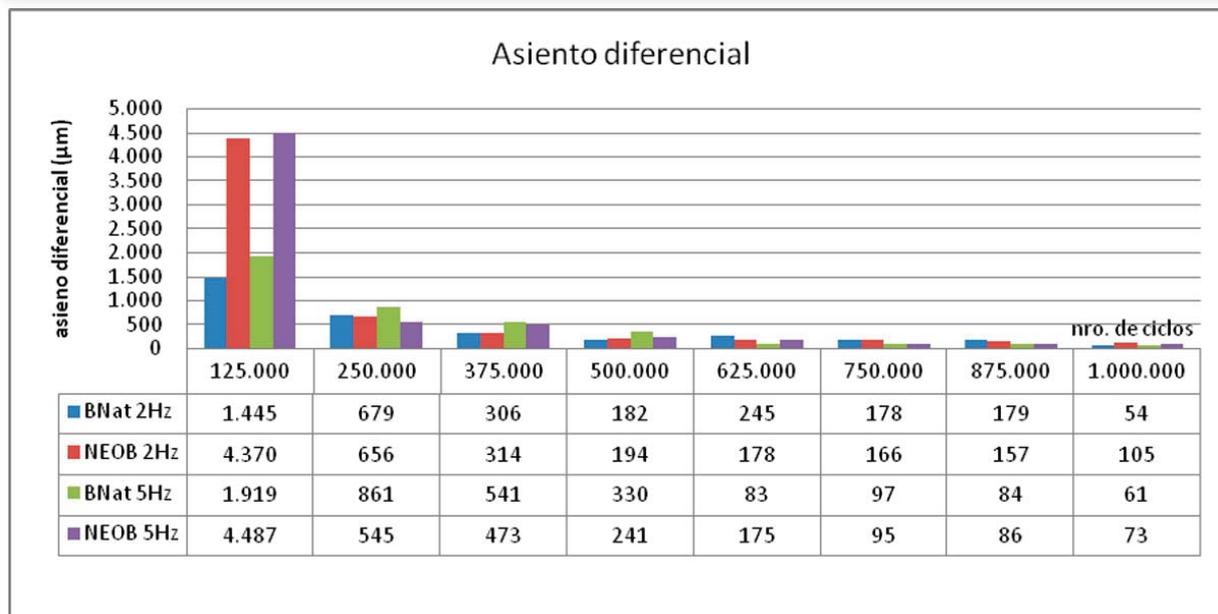


Fuente: Elaboración propia.

Otro factor a tener en cuenta que se deduce de la figura 3, es la evolución gradual de las curvas que corresponden al balasto recubierto respecto de las del balasto natural a medida que incrementa el número de ciclos. Las irregularidades de las curvas se corresponden con la rotura de partículas, lo cual produce un reajuste instantáneo del material y por consiguiente un asiento brusco en el conjunto.

Superado el umbral de los 250.000 ciclos, el cual se podría considerar como la fase de compactación, los asientos diferenciales que experimentan tanto el balasto natural como el recubierto se equilibran (Fig. 4), siendo del orden de 150-200 μ m cada 125.000 ciclos. Un ejemplo de la irregularidad en los asientos que experimenta el balasto natural por rotura de partículas es el incremento que se produce entre los 500 y 625 mil ciclos en el balasto natural a 2 Hz, mientras que el balasto recubierto decrece gradualmente.

Figura 4. Asiento diferencial de las muestras ensayadas a fatiga



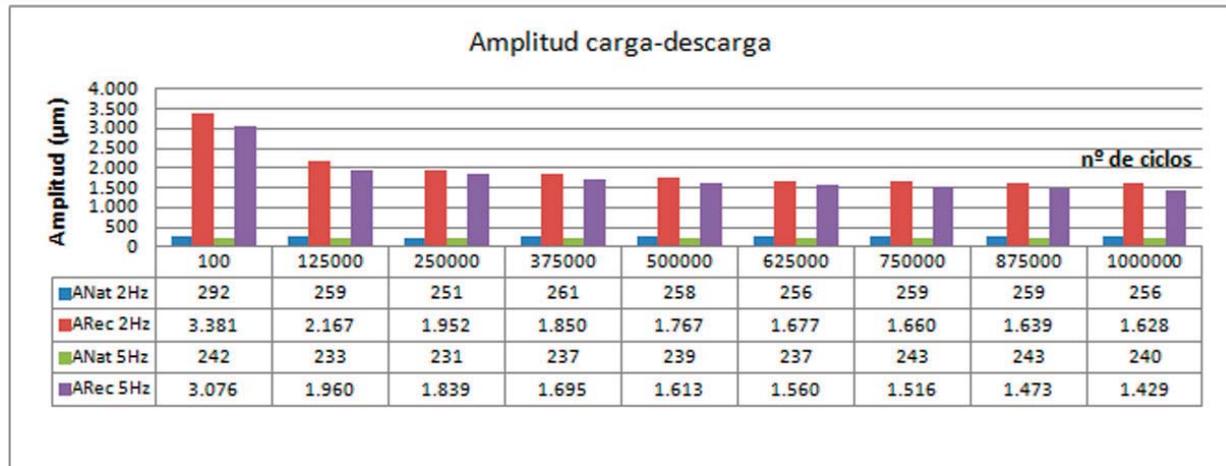
Fuente: Elaboración propia.

Amplitud carga-descarga ($\Delta\delta$) y rigidez dinámica (K_{id}).

Una variable de gran interés en el conjunto carril-sujeción-travesía-balasto es la rigidez dinámica y las deformaciones que se producen entre ciclos de carga y descarga las cuales son determinantes en temas de seguridad relacionados al descarrilamiento. Se han realizado numerosos estudios respecto a la rigidez del conjunto^[9], y con el fin de disminuir la rigidez global de la vía se han incorporado diversos materiales como placas de asiento y mantas elastoméricas.

En nuestro caso nos hemos centrado en las deformaciones experimentadas por la capa de balasto. El espesor de la muestra ensayada ha sido de 400 mm, el cual se encuentra por encima de los 300 mm de balasto bajo travesía que se suele emplear en las infraestructuras ferroviarias. Tal y como se puede apreciar en la figura 5, una vez alcanzada la compactación del material, la amplitud entre carga y descarga para el balasto recubierto es del orden de siete veces mayor que la del balasto natural, disminuyendo esta relación a medida que aumenta en número de ciclos.

Figura 5. Deformación experimentada entre carga y descarga de las muestras ensayadas a fatiga



Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar este mismo fenómeno desde la óptica de las rigideces dinámicas (tabla 1), las cuales para el balasto natural rondan los 230 a 250 kN/mm mientras que las correspondientes al balasto recubierto se sitúan en torno a los 30 a 35 kN/mm.

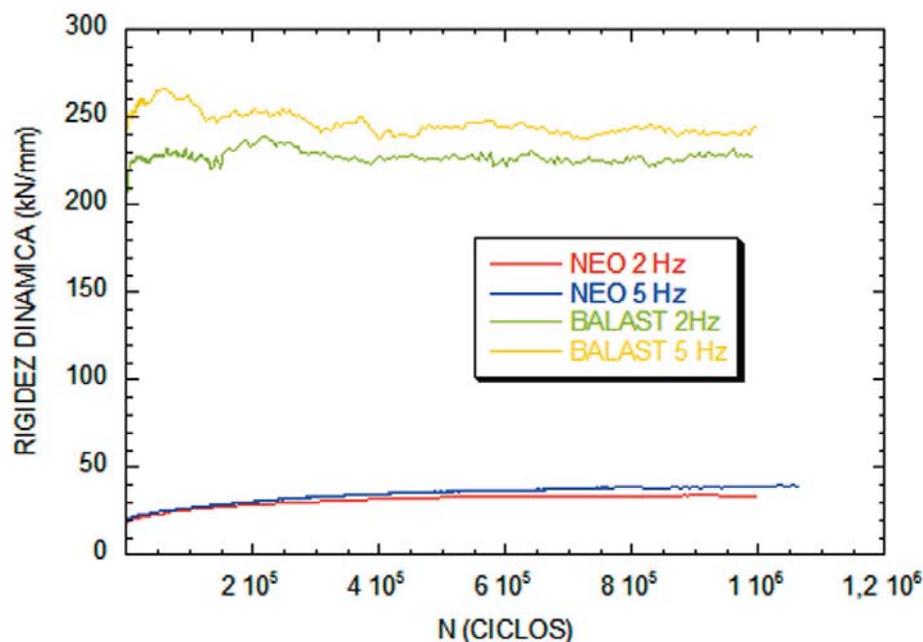
Tabla 1. Rigideces estáticas y dinámicas, previas y posteriores a los ensayos de fatiga

Ensayo	Rigidez Inicial	Estático			Dinámico		
		Previo	Posterior	Variación	Previo	Posterior	Variación
NeoB (2 Hz)	6,31	7,36	14,66	99,2%	17,51	31,27	78,6%
NeoB (5 Hz)	6,84	7,69	14,73	91,5%	19,43	34,11	75,6%
Balast (2 Hz)	64,85	150,38	173,07	15,1%	207,44	239,75	15,6%
Balast (5 Hz)	70,12	162,36	192,49	18,6%	230,4	250,75	8,8%

Fuente: Elaboración propia.

Asimismo, en la irregularidad de las curvas de rigidez correspondientes al balasto natural de la figura 6, se puede apreciar el efecto de la rotura y acomodamiento de partículas descrito anteriormente.

Figura 6. Rigideces dinámicas de las muestras ensayadas a fatiga



Fuente: Elaboración propia.

El dotar de una mayor elasticidad a la capa de balasto ofrece una nueva posibilidad en lo que refiere al diseño de la infraestructura ferroviaria como, por ejemplo, poder prescindir de elementos adicionales que disminuyan la rigidez del conjunto carril-sujeción-traviesa-balasto.

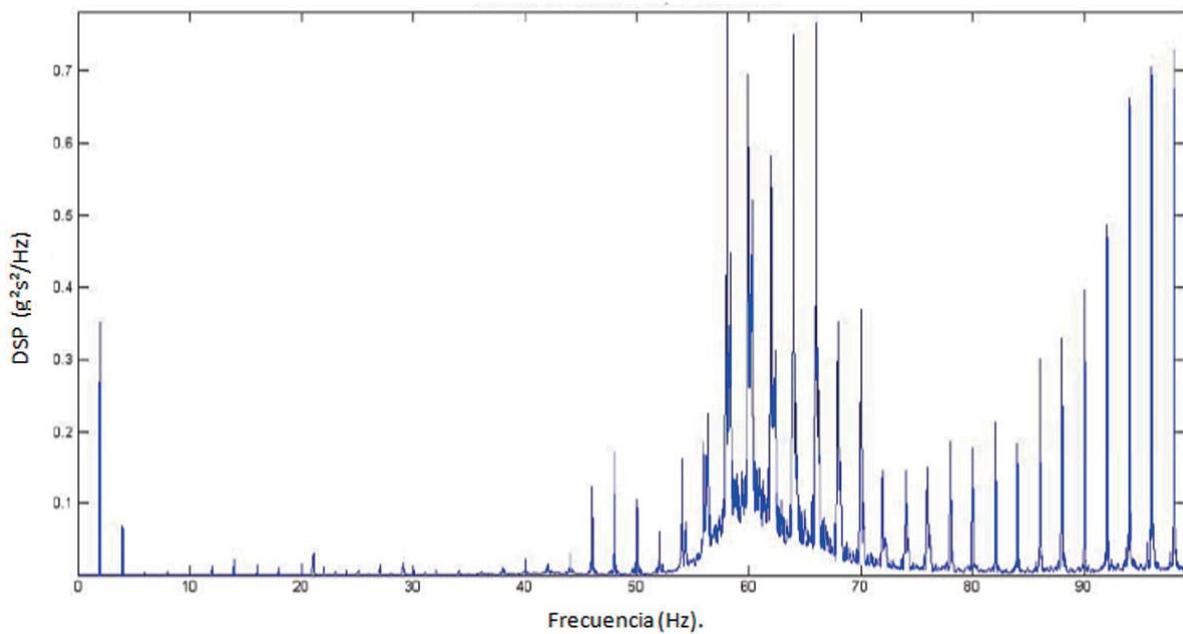
De este modo, considerando que la rigidez de la vía se encuentra determinada por todos los elementos que componen la infraestructura y, pudiendo variar el espesor de capa de balasto empleada, se podrían imponer rangos de rigidez deseados.

Vibraciones.

Respecto del comportamiento del material frente a vibraciones, el amortiguamiento que produce el recubrimiento es sustancial. Los resultados más interesantes se han registrado en los ensayos realizados a 2 Hz y en las mediciones realizadas con el acelerómetro exterior, el cual posee un rango de medición de 0 a 200 Hz.

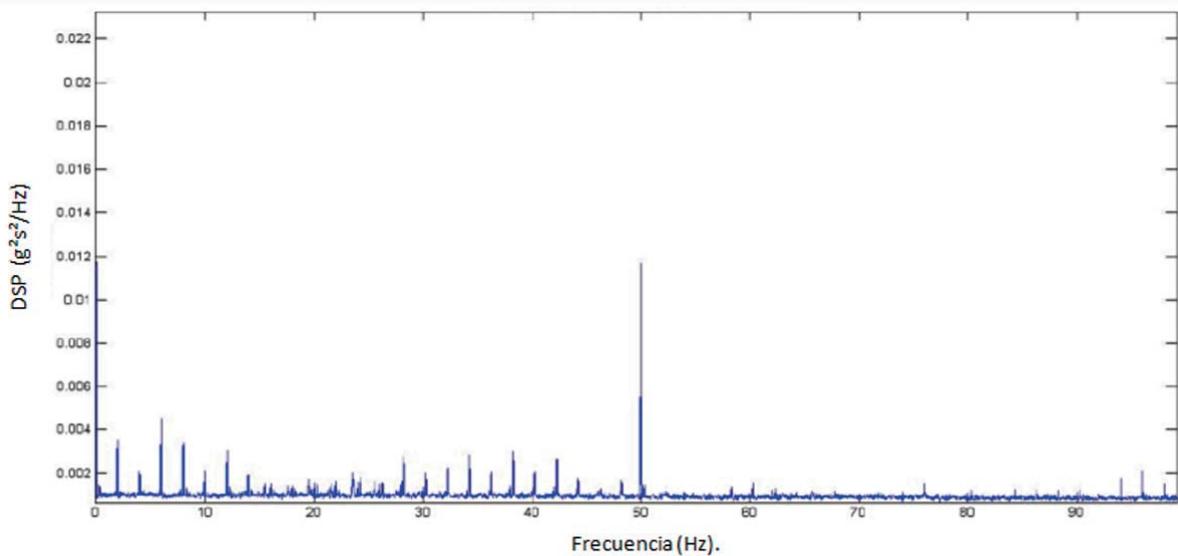
Como se puede apreciar de la comparativa de las figuras 7 y 8, la atenuación de las vibraciones que se encuentran en el rango de 50 a 100 Hz al emplear el balasto recubierto es prácticamente total en comparación a lo observado con el balasto natural, el cual alcanza valores máximos de $0,7 \text{ g}^2\text{s}^2/\text{Hz}$.

Figura 7. DSP de la señal en el eje z (Balasto natural a 2 Hz)



Fuente: Elaboración propia.

Figura 8. DSP de la señal en el eje z (Balasto recubierto a 2 Hz)



Fuente: Elaboración propia.

De estudios realizados sobre propagación de vibraciones en la estación de Sants^[10], se deduce que las mayores intensidades de propagación se sitúan en rangos de 40 a 100 Hz, por tanto la correspondencia existente entre los resultados obtenidos del ensayo con los obtenidos en la situación real, nos permiten prever el efecto de amortiguación que la inclusión de el nuevo material tendrá al momento de implantarse en vía.

Ensayo de bateo en el puerto de Gijón.

Con la intención de caracterizar el comportamiento del balasto recubierto bajo la acción de una maquina de bateo, se ha diseñado ensayo in situ mediante el cual se obtienen parámetros significativos del comportamiento del material y su comparación correspondiente con el balasto natural^[11]. En la figura 9 se observa el grupo de bateo en funcionamiento durante la realización del ensayo, el cual estuvo compuesto por quince ciclos de bateo a 50 Hz para cada una de las muestras.

Figura 9. Grupo de bateo Vaiacar V704 F+ en funcionamiento (50 Hz)



Fuente: Elaboración propia.

A lo largo del ensayo se efectuaron dos registros de vibraciones en cada ensayo: uno interno y otro externo, empleado los mismos equipos que en los ensayos realizados en el LADICIM. La tabla 2 detalla las atenuaciones obtenidas al recubrir los áridos.

Tabla 2. Registro de vibraciones durante el ensayo de bateo en el Puerto de Gijón

	Balasto natural (sensor externo)	Neoballast® (sensor externo)	Balasto natural (sensor interno)	Neoballast® (sensor interno)	Atenuación (sensor externo)	Atenuación (sensor internos)
Eje X	0.042 g ² s ² /Hz	0.021 g ² s ² /Hz	27 g ² s ² /Hz	8.9 g ² s ² /Hz	-6 dB	-9.6 dB
Eje Y	0.0111 g ² s ² /Hz	0.0109 g ² s ² /Hz	47 g ² s ² /Hz	14.2 g ² s ² /Hz	-0.16 dB	-10 dB
Eje Z	0.041 g ² s ² /Hz	0.027 g ² s ² /Hz	20 g ² s ² /Hz	5.5 g ² s ² /Hz	-3.6 dB	-11 dB

Fuente: Elaboración propia.

Luego de finalizados los ciclos de bateo se tamizaron ambas muestras y se cuantificó el porcentaje de finos generados. Para el balasto natural se produjo un 1,06% de material fino (por debajo del tamiz 31,5mm), mientras que para el balasto recubierto no hubo generación de finos ni rotura de partículas.

En lo que respecta al deterioro de los áridos que componen la capa de balasto y su relación con la resistencia lateral de vía, Tutumler^[12] ha realizado investigaciones en las que destaca que conservar la geometría inicial de los áridos a medida que bateamos favorece a mantener la resistencia lateral de la vía después del bateo.

3. CONCLUSIONES

Como se ha ido describiendo a lo largo del presente artículo, los resultados obtenidos a lo largo de los diversos ensayos son prometedores de cara a la obtención de soluciones para los presentes problemas en la vía en balasto. Los incrementos en la resistencia a la fragmentación en los niveles observados, prevén un incremento en la durabilidad de la capa de balasto significativa y por tanto, como describe Sadeghi, una sustancial repercusión en la calidad de la infraestructura.

Otra contribución positiva que la investigación introduce, es la referida a la propagación del ruido y las vibraciones en la infraestructura. El añadir un material elástico en el contacto entre partículas genera un amortiguamiento significativo en la transmisión de vibraciones y a la vez una reducción en el ruido generado por el golpeo entre partículas de balasto.

En materia medioambiental, la implementación del nuevo material tiene una repercusión de relevancia elocuente: una mayor durabilidad de la capa de balasto se traduce en una menor extracción de áridos de cantera, la reutilización de neumáticos fuera de uso evita que los mismos vayan a vertederos o incluso a plantas incineradoras que generan grandes cantidades de CO₂, la impermeabilización de los áridos permite utilizar nuevamente áridos calcáreos como balasto, y la disminución del ruido favorece a una menor contaminación acústica.

El próximo y último paso que resta para la implementación de éste nuevo material en las infraestructuras ferroviarias, es el de la realización de un tramo de prueba de cien metros, en el cual nos encontramos trabajando en la actualidad.

REFERENCIAS

[1] Ubalde Claver, L., “La auscultación y los trabajos de vía en la línea del Ave Madrid - Sevilla: Análisis de la experiencia y deducción de nuevos criterios de mantenimiento” Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, 2005.

[2] CENIT, “Estudio del comportamiento a medio y largo plazo de las estructuras ferroviarios de balasto y placa” Barcelona, España, 2006.

[3] <http://www.vialibre-ffe.com/noticias.asp?not=15895&cs=inte>.

[4] Woodward, P.K., Kennedy J. and Medero G., “Three-Dimensional Track Reinforcement using Polymer Geocomposites” Heriot-Watt University, Riccarton, Edinburgh, UK, 2009.

[5] Fischer, Sz. and Horvat, F., “Superstructure Stabilization of Ballast Bedded Railway Tracks with Geogrids” Szechenyi Istvan University, Hungary, 2011.

[6] Indraratna, B., Nimbalkar, S. and Christie, D., “The performance of rail track incorporating the effects of ballast breakage, confining pressure and geosynthetic reinforcement” University of Wollongong, Australia, 2009.

[7] Oldecop, L. A. and Alonso E. E., “Suction effects on rockfill compressibility”, *Géotechnique* Vol 53, No. 2, 289-292, 2003.

[8] López Pita, A., “Infraestructuras Ferroviarias”, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, 2006.

[9] Fonseca Teixeira, P., “Contribución a la reducción de los costes de mantenimiento de vías de alta velocidad mediante la optimización de su rigidez vertical” Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, 2005.

[10] Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica, Universidad Politécnica de Cataluña “Determinación de las vibraciones en las vías próximas al futuro hotel Sants originadas por la circulación del ferrocarril”., Barcelona, España, 2005.

[11] Paderno, C., “Comportement du ballast sous l’action du bourrage et du trafic ferroviaire” These N°4697, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Suisse, 2010.

[12] Tutumluer, E., Huang, H., Hashash, Y. and Ghaboussi J., “Aggregate Shape Effects on Ballast Tamping and Railroad Track Lateral Stability”, University of Illinois at Urbana Champaign , Illinois, 2006.

[13] Sadeghi, J. and Askarinejad, H., ”Influences of track structure, geometry and traffic parameters on Railway Deterioration”Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran, 2007.

