

NUEVOS MATERIALES SOSTENIBLES PARA BALASTO, SUBBALASTO Y CAPA DE FORMA EN INFRAESTRUCTURAS FERROVIARIAS

New sustainable materials for ballast, subballast and form layer in railway infrastructures

Miquel Morata Royes^a, Joan Peset Iribarren^a, Valentí Fontserè Pujol^a

^a Área Técnica e Innovación, COMSA, España

RESUMEN – En este artículo se presentan tres soluciones innovadoras y sostenibles para mejorar las infraestructuras ferroviarias europeas. En primer lugar, se presenta Neoballast, nueva solución para balasto que ofrece mayor durabilidad, menor impacto ambiental y una reducción de ruido y vibraciones, entre otras muchas prestaciones. En segundo lugar, se presenta el árido siderúrgico desarrollado en el proyecto Gain para uso como subbalasto y capa de forma ferroviaria, el cual ofrece mayores prestaciones mecánicas a la vez que se valoriza un residuo de la producción de acero. En tercer lugar, se presenta el árido siderúrgico desarrollado en el proyecto Birbalas para su uso como balasto y subbalasto ferroviario, del cual se está a la espera de obtener resultados definitivos, si bien los resultados provisionales son muy positivos.

ABSTRACT – This article presents three innovative and sustainable solutions to improve European railway infrastructures. Firstly, Neoballast is presented, a new solution for ballast that offers greater durability, less environmental impact and a reduction in noise and vibrations, among many other benefits. Secondly, the steel slag aggregates developed in the Gain project for use as railway sub-ballast and subgrade, which offers greater mechanical performance than conventional aggregates while making the most of a waste product from steel production, will be presented. Thirdly, the steel slag aggregates developed in the Birbalas project for use as railway ballast and sub-ballast is presented, for which definitive results are still being gathered, although the preliminary results are very positive.

Palabras Clave – Balasto, subbalasto, árido siderúrgico.

Keywords – Ballast, subballast, slag.

1 – INTRODUCCIÓN

Desde la invención del ferrocarril, diversas han sido las mejoras introducidas tanto en el material rodante como en la superestructura necesaria para el óptimo funcionamiento de los servicios ofrecidos. Aparte de la evolución de las locomotoras de tracción a vapor a las de motor eléctrico, y su posterior refinamiento hasta poder alcanzar los 560 km/h; la superestructura se ha visto notablemente mejorada por lo que hace a la geometría de los railes, el paso de las fijaciones rígidas a las fijaciones elásticas o la modernización del material usado para las traviesas, pasando a ser de hormigón armado, dejando atrás las tradicionales traviesas de madera. Todas estas mejoras han permitido un notable progreso en la reducción de vibraciones y ruido, permitiendo a la vez un

E-mails: miquel.morata@comsa.com (M. Morata), jpeset@comsa.com (J. Peset), vfontser@comsa.com (V. Fontserè)

menor desgaste y tensión de los materiales, así como una mayor durabilidad, fiabilidad y confort para el usuario.

Sin embargo, el material de la infraestructura (balasto, subbalasto, capa de forma) no ha evolucionado de manera significativa desde la creación del ferrocarril. La degradación de los áridos de origen natural que conforman la infraestructura ferroviaria supone un reto aún por resolver. Las grandes cargas cíclicas debidas al paso de los trenes y los efectos climáticos provocan un deterioro progresivo de los áridos que acaban conduciendo a un descenso de la calidad geométrica de la vía que llevan a una necesidad de mantenimiento periódico y renovación de la vía. Asimismo, considerando las crecientes velocidades de los convoyes, cargas por eje y volumen de tráfico, hay una manifiesta necesidad de mejorar la durabilidad de la infraestructura para poder conseguir una reducción en los costos, disminución del impacto medioambiental y una minimización del entorpecimiento operativo de las obras de mantenimiento y renovación que puedan afectar negativamente a la capacidad de la infraestructura.

En los siguientes apartados se presentan tres soluciones innovadoras y sostenibles desarrolladas en COMSA, conjuntamente con otros socios a nivel nacional e internacional, para la mejora del balasto, subbalasto y capa de forma de las infraestructuras ferroviarias: Neoballast, Gain y Birbalas.

2 – METODOLOGÍA

2.1 – Neoballast

2.1.1 – Contexto

Neoballast es una solución innovadora y sostenible para mejorar radicalmente el rendimiento económico y medioambiental de las vías férreas europeas, aportando importantes beneficios socioeconómicos a toda la sociedad.

Consiste en áridos de balasto cubiertos por un revestimiento conformado por un aglutinante avanzado y polvo de caucho proveniente de neumáticos de vehículos fuera de uso, tal y como se puede observar en la Figura 1, proporcionando una gran mejora mecánica y beneficios medioambientales.

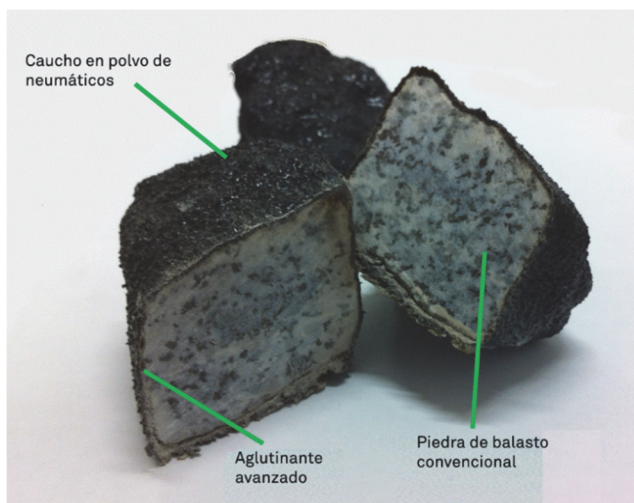


Fig. 1 - Neoballast

Las mejoras mecánicas consisten en una menor necesidad de mantenimiento, aumento de la vida útil, mayor resistencia a la abrasión, mientras que mantiene la misma puesta en obra, permeabilidad y posibilidad de bateo de la misma forma que el balasto convencional.

Las ventajas medioambientales de Neoballast, por otro lado, consisten en el reciclaje de neumáticos fuera de uso, una mayor durabilidad, menor extracción de árido de cantera y reducción de ruido y vibraciones.

Gracias a estas ventajas mecánicas y ambientales, Neoballast es una solución idónea para las siguientes aplicaciones:

- Zonas con altos costes de mantenimiento debido al alto tráfico o elevadas cargas. Reducción del mantenimiento y de los costos asociados.
- Zonas en las que no existe balasto de alta calidad (homologado). Posibilidad de aplicar Neoballast con los áridos de baja calidad existentes, así cumpliendo con los requisitos del Administrador de Infraestructuras.
- Zonas de alta densidad de población donde el ruido y las vibraciones suponen un problema importante.
- Zonas donde los tramos presentan alta rigidez y desgaste debido a los altos impactos de carga, como por ejemplo en zonas de aparatos de vía; donde Neoballast puede mejorar la disipación de energía y reducir la rigidez.
- Líneas de tráfico pesado donde el balasto sufre una alta degradación debido a las altas cargas por eje.
- Túneles y puentes, donde las estructuras se encuentran restringidas con alta rigidez y gálibo vertical limitado. Neoballast ofrece una solución para poder reducir el peso y aumentar el gálibo disponible.
- Zonas de transiciones de rigidez, como por ejemplo en zonas entre tramos de balasto y vía en placa, donde Neoballast puede utilizarse para mitigar esta transición.
- Neoballast ha sido desarrollado por COMSA y MAPEI, y en el que también ha participado la UPC y ADIF en el marco del proyecto de I+D+i homónimo de la convocatoria INNPACTO 2011 del Ministerio de Economía y Competitividad del Gobierno de España así como SORIGUÉ, VERDÉS y D2S INTERNATIONAL en el marco del proyecto homónimo de la convocatoria Fast Track to Innovation del programa H2020 de la Comisión Europea.

2.1.2 – Ensayos de laboratorio

Desde la concepción de Neoballast se han realizado diversos ensayos para poder evaluar su rendimiento y viabilidad para poder ser utilizado como balasto ferroviario, tal como se muestra a continuación.

2.1.2.1 – Ensayos mecánicos

Estos ensayos incluyen todas las pruebas relacionadas con los requisitos técnicos del árido indicados en las normas ferroviarias. Estos ensayos también se han realizado para comparar las propiedades de Neoballast con las de los áridos convencionales.

La primera etapa consiste en los ensayos de laboratorio clásicos para balastos definidos en la Norma Europea UNE EN 13450, formados por los siguientes ensayos:

- Ensayo de resistencia a la abrasión y al impacto, conocido como ensayo de Los Ángeles.
- Ensayo de degradación por abrasión, conocido como ensayo de Micro-Deval.
- Ensayo de solidez al sulfato de magnesio.
- Ensayo de densidad y absorción de agua.

2.1.2.2 – Ensayos dinámicos realizados en la Universidad de Granada

Para evaluar el comportamiento de Neoballast en términos de rigidez, asiento y deflexión del carril en condiciones realistas, se ha realizado un ensayo dinámico a escala real en el Laboratorio de Ingeniería de la Construcción de la Universidad de Granada. Estos ensayos incluyen toda la superestructura (carril, traviesa y capa de balasto) y, por tanto, permiten simular el comportamiento a largo plazo del Neoballast en condiciones realistas.

Se ensayaron cuatro secciones, simulando un millón de ciclos de carga para cada sección, tal y como se puede observar en la Figura 2.

- La primera sección representa el diseño de vía estándar utilizado por ADIF en su red ferroviaria, con un espesor de 30 cm.
- La segunda sección tiene una capa de 30 cm de espesor de Neoballast
- La tercera sección consiste en añadir una lámina EPDM de subbalasto de 25 mm de espesor bajo la sección de vía de balasto de origen natural de 30 cm.
- La cuarta sección analiza una capa de 22-25 cm de espesor de Neoballast.

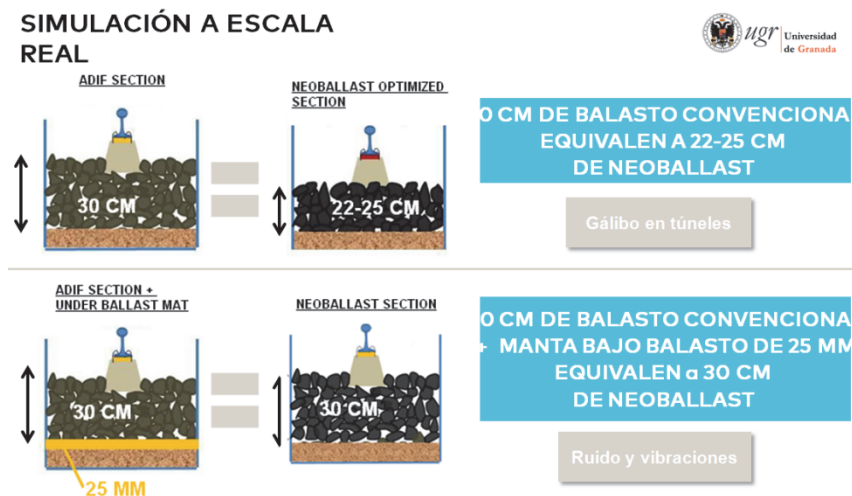


Fig. 2 - Secciones de las simulaciones realizadas.

Las dos primeras secciones se testaron para comparar el rendimiento del Neoballast con la vía de diseño convencional. Las dos últimas secciones se ensayaron para comparar el rendimiento de Neoballast con una sección de balasto convencional provista de una lámina EPDM bajo el balasto.

El ensayo se realizó para conseguir resultados más realistas que en los ensayos anteriores, realizados en la Universidad de Cantabria (LADICIM), en los que solamente se ensayó la capa de balasto en vez de toda la superestructura.

Las conclusiones obtenidas gracias a los ensayos fueron las siguientes:

- 20% de la reducción de la rigidez con relación al balasto de origen natural.
- 70% más de resistencia a la abrasión (menos fragmentación).
- 54% más de energía disipada.
- 25% menos de tensión bajo la capa de balasto, debido a una mayor área de contacto.
- Menor asiento vertical.
- Posibilidad de reducir la capa de balasto en 5-8 cm, especialmente útil en tramos de gálibo limitado como túneles.
- Mismo rendimiento que el balasto de origen natural con láminas EPDM en la capa inferior de la sección.

2.1.3 – Prueba de campo en línea ADIF

2.1.3.1 – Descripción de la prueba

Uno de los experimentos a escala real realizados para este proyecto ha tenido lugar en una línea de tráfico mixto convencional de ADIF en Caldes de Malavella, cerca de Barcelona, España. El objetivo de la prueba es demostrar el comportamiento de Neoballast en condiciones reales y comparar su rendimiento con el balasto convencional de origen natural.

La línea donde se realiza la prueba tiene un tráfico medio de 468 trenes por semana, de los cuales 80% son trenes de pasajeros, un 19% trenes de mercancías y un 1% de vehículos de mantenimiento ferroviario. El tramo seleccionado está situado junto a un paso a nivel con una limitación de velocidad de 120 km/h.

2.1.3.2 – Estrategia de monitorización

Para analizar el rendimiento de Neoballast, se instalaron varios sensores que, conectados a una estación de monitorización, leen el ruido, la velocidad y las vibraciones generadas por los trenes de mercancías o de pasajeros. Se han analizado los resultados obtenidos desde junio de 2019 hasta ahora y se presentan a continuación.

Para este proyecto contamos con dos tramos. El primero está compuesto por balasto convencional y el segundo por Neoballast. Ambos están colocados en la misma vía para que los diferentes materiales sean estudiados en las mismas condiciones.

Teniendo en cuenta que distintos tipos de trenes, incluidos los de mercancías, utilizan esta línea periódicamente, es obligatorio determinar en todos los casos qué tren se aproxima. Por ello se requiere de una estación de monitorización no tripulada, que esté conectada a todos los sensores, para que sea capaz de detectar todos los pasos durante un largo periodo de tiempo.

Se realizan las siguientes mediciones, con los sensores ubicados tal y como se muestra en la Figura 3:

- Medición de ruido: Disposición de dos micrófonos exteriores a los lados de la línea, cada uno de los cuales mide el ruido emitido por sus respectivos materiales. Los dispositivos sólo registran el ruido generado a una frecuencia de muestreo alta (40 kHz), lo que facilita

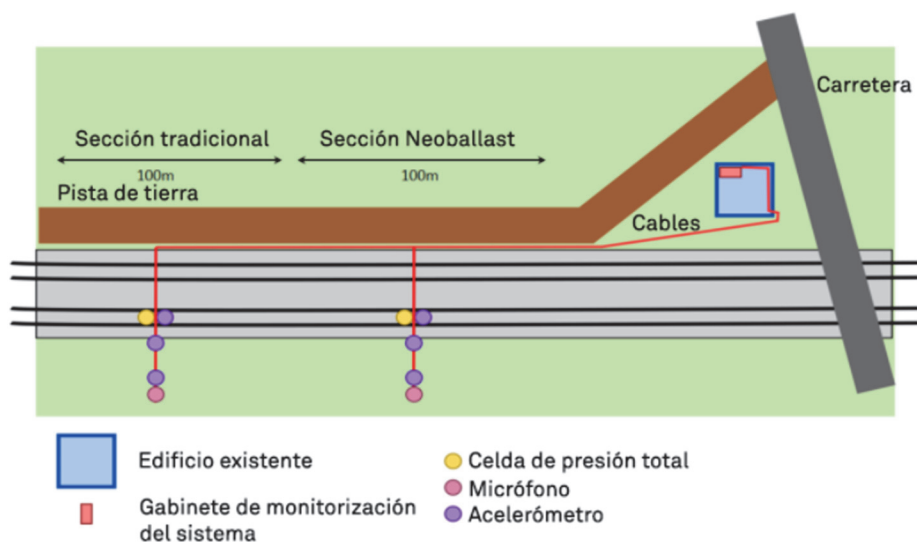


Fig. 3 - Prueba de campo en línea de ADIF. Disposición de sensores.

un análisis detallado del postproceso. A partir de esta señal acústica, se pueden calcular los parámetros relevantes para la comparación (espectro de ruido, nivel global equivalente durante un paso de convoy, nivel global máximo, entre otros). Los resultados de las emisiones de ruido se han estudiado para un periodo más corto.

- Medición de vibraciones: Disposición de seis acelerómetros sísmicos situados en el terreno, tres en cada sección, que miden las emisiones de vibraciones y la deflexión de la vía. Uno de ellos está cerca de la vía, el segundo está unos metros más alejado y el tercero está justo debajo de la vía. Al igual que en el rendimiento del ruido, estos sensores sólo leen a una frecuencia de muestreo (4 kHz para las señales de vibración).
- Degradación de la vía: Disposición de dos celdas de presión situadas bajo las capas de balasto y Neoballast, para controlar la tensión de la vía como indicador indirecto de su degradación.
- Asiento de la vía: mediante levantamientos topográficos periódicos.

Para determinar el paso de los trenes, se registran las señales de vibración y de presión total para cada paso y, por lo tanto, en función de los datos obtenidos es posible determinar qué tipo de tren se aproxima cada vez calculando el número de bogies. Además, una videocámara que genera un pequeño vídeo es instalada en el sistema de monitorización para poder corroborar la identificación del tipo de tren realizada por los sensores.

Los sensores exclusivamente miden y envían datos pertinentes al sistema de monitorización, que los reenvía inmediatamente a una plataforma en línea donde se puede hacer un seguimiento del estado.

El análisis se hizo siguiendo un procedimiento de dos pasos. El primer paso, denominado “análisis de datos” consiste en preprocesar los datos clasificándolos en diferentes tipos de trenes y rangos de velocidad. En el segundo paso, denominado “análisis de mediciones”, se hace una media de todos los pasos individuales de los trenes.

2.1.4 – Prueba de campo en el metro de Barcelona

2.1.4.1 – Descripción de la prueba

Se realizó una segunda prueba a escala real de Neoballast, después del test a escala real realizado en Caldes de Malavella, durante la primera mitad del 2020 en el Metro de Barcelona,

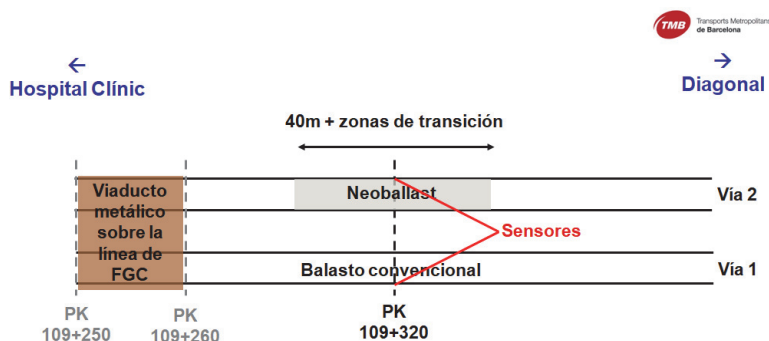


Fig. 4 - Localización de la prueba a escala real en la red del metro de Barcelona.

España. Una sección de 40 m de largo fue instalada en la vía 2 de la línea 5 entre las estaciones de Diagonal y Hospital Clínic, tal y como se aprecia en la Figura 4.

Al igual que se hizo en la prueba a escala real en la línea de ADIF, se dispusieron distintos acelerómetros en el área y alrededores para poder obtener datos numéricos.

El objetivo de estas mediciones es el de determinar el comportamiento vibratorio a largo plazo del segmento de Neoballast dispuesto en la sección PK 109+320 de la vía 2, tal y como se puede observar en la Figura 5, de la línea 5 del metro, en condiciones de explotación comercial de la infraestructura ferroviaria.



* Este tramo del túnel sólo tiene 20 cm de balasto bajo traviesa en ambas vías.

Fig. 5 - Localización de la prueba a escala real en la red del metro de Barcelona.

Se registran los niveles de vibración en las traviesas, vías y del hastial del túnel de ambas vías. Mediciones de las vibraciones de las traviesas y vías se hicieron con un acelerómetro dispuesto verticalmente, debido a la dirección de los mayores valores producidos por las vibraciones; mientras que en el hastial del túnel se usaron tres acelerómetros, posicionados longitudinalmente, transversalmente y verticalmente; definidos por el sistema de coordenadas (x,y,z) respectivamente.

Todas las mediciones se realizaron con la velocidad nominal de la explotación comercial de cada vía, correspondiente a los 40 km/h por la vía 1, con balasto convencional de origen natural; y 45 Km/h para la vía 2, con Neoballast.

Para poder obtener resultados representativos, se analizaron más de cincuenta circulaciones dentro del túnel, mientras que en la calle se analizaron más de veinticinco en cada punto de medida. De esa manera se determina tanto el nivel de paso de cada convoy, así como el global de todos los datos.

2.1.4.2 – Estrategia de monitorización

En el interior del túnel, el anterior balasto tradicional se sustituyó en ambas vías, siendo reemplazado por balasto tradicional en la vía uno, mientras que en la vía dos se sustituye por Neoballast. Además, en ambas vías se instalan nuevas traviesas de madera con fijaciones M3H.

Los parámetros que caracterizan el comportamiento dinámico del sistema de vías son:

- Cómputo temporal de las vibraciones durante el paso de cada convoy.
- Cómputo del tiempo que cada convoy necesita para pasar por el tramo
- Valor efectivo del cómputo de aceleración en un rango de frecuencias comprendido entre 1 Hz y 5000 Hz.
- Valor global de los niveles medios de vibración, L_{aw} .
- Espectro, en bandas de tercios de octava de cada paso de tren, para determinar la media, máximo y mínimo del espectro.

La Figura 6 muestra la posición relativa de los sensores usados en el interior del túnel.

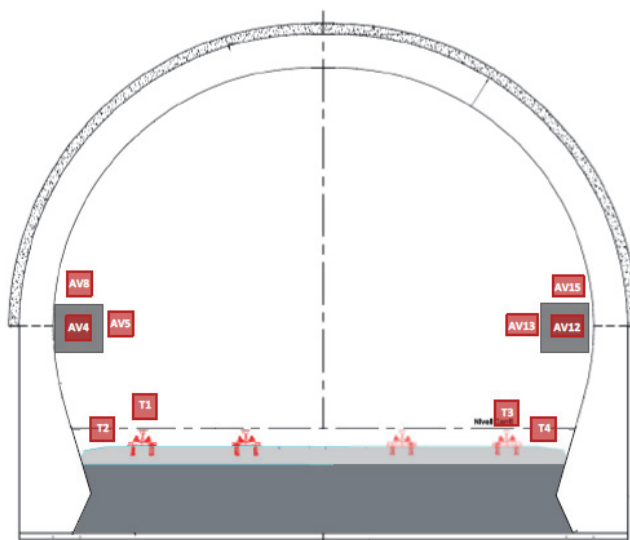


Fig. 6 - Disposición de los acelerómetros y piezómetros en el túnel de la L5, PK 109+320.

Para la caracterización los niveles de vibraciones en la calle, se determinaron los siguientes parámetros.

- Cómputo temporal de las vibraciones durante el paso de cada convoy.
- Cómputo del tiempo necesario en segundos que cada convoy necesita para pasar por el tramo
- Valor efectivo del registro de aceleración examinado en frecuencia, entre las frecuencias de 1 Hz y 80 Hz.
- Máximo nivel de aceleración efectiva, L'_{aw} .
- Nivel residual de los niveles medios de vibración, L_{aw} .
- Nivel de evaluación de los niveles medios de vibración, L_{aw} .

2.2 – Árido siderúrgico en capas de asiento ferroviarias: GAIN

2.2.1 – Contexto

Las capas de asiento, nombre con el que nos referimos a la capa de subbalasto y capa de forma -ésta última siendo la que proporciona las características necesarias a la plataforma-, tienen un papel clave en el comportamiento de la vía en lo que se refiere a la rigidez vertical, el mantenimiento de la geometría y el drenaje, entre otros aspectos. Es una realidad que muchos de los problemas relacionados con la geometría de la vía derivan de un estado deficiente de las capas de asiento. Por lo tanto, si se quiere conseguir una buena resiliencia y estabilidad de la infraestructura ferroviaria, resulta crucial el uso de áridos de alta calidad en estas capas.

Tradicionalmente, los materiales que se utilizan en las capas de asiento y de forma de la vía son áridos naturales extraídos de las canteras. En este sentido, han surgido nuevos desafíos a la hora de obtener áridos de alta calidad como recursos naturales, ya que la disponibilidad de éstos es cada vez menor. Todo ello ocurre en un contexto en el que la Comisión Europea ha aumentado su rigor en los aspectos medioambientales, potenciando las soluciones sostenibles, duraderas y económicas. Por esta razón, la aparición de un nuevo material reciclado con mejores propiedades

mecánicas parece estar totalmente en consonancia con el desarrollo futuro de las infraestructuras ferroviarias, ya que las soluciones con un menor coste de ciclo de vida y menor impacto ambiental prevalecerán sobre el resto.

Dentro del marco del proyecto GAIN (financiado por el programa LIFE+ de la Comisión Europea), y en colaboración con ADEC GLOBAL, se desarrolló un nuevo tipo de árido reciclado, no solo para cumplir con las características técnicas establecidas por la normativa nacional y europea que regula su uso en las capas de asiento, sino también para ir más allá y ofrecer unas excelentes propiedades mecánicas. El árido en cuestión es obtenido por la revalorización de las escorias negras procedentes de los hornos de arco eléctrico, que son un subtipo de escorias de los hornos de acero, como se puede observar en la Figura 7.



Fig. 7 - Proceso de obtención del árido siderúrgico.

Así, se consigue una reducción del uso de áridos naturales en la construcción ferroviaria, que se traduce en la reducción del impacto medioambiental de las canteras; al igual que se reducen las necesidades de transporte asociadas a los agregados ferroviarios, lo que se traduce en ahorro de combustible y reducción de las emisiones de CO₂. Se espera que el árido siderúrgico sea más accesible a los emplazamientos de las obras que los agregados naturales, ya que pocas canteras cumplen con los requisitos técnicos exigidos por la normativa ferroviaria.

La viabilidad técnica del árido siderúrgico queda demostrada por su buen rendimiento en los emplazamientos donde se ha testado. Los procedimientos aplicados para producir árido siderúrgico son fácilmente transferibles a otros países europeos, mientras que la solución de valorización propuesta es replicable en toda Europa.

2.2.2 – Estado del arte

La principal aplicación de las escorias de hornos de acería en Europa es la construcción de carreteras (48%) y solo un 13% son enviadas a vertederos. El uso de escoria en el ámbito ferroviario no es tan común como en la construcción de carreteras y solo Estados Unidos, Brasil, Canadá e India tienen experiencia. De esta manera, el proyecto LIFE GAIN pretende desarrollar un nuevo tipo de árido procedente de las escorias de hornos de arco eléctrico que cumpla con la normativa europea para que pueda ser implementado de manera similar en otros países industrializados.

El árido siderúrgico tiene que cumplir con la normativa existente que regula su uso en las capas de subbalasto y de forma. Actualmente, solo encontramos una normativa ferroviaria, a nivel europeo, referente a los aditivos para balasto (EN13450:2013), pero no hay ninguna para subbalasto y capas de forma. Existe una normativa más general que regula la aplicación de áridos en la ingeniería civil (EN13242:2013), que incluye algunas especificaciones en lo que refiere al uso de escorias de acero como árido para capas de base. La normativa establece que éstos se pueden considerar estables si la expansión (de acuerdo con la E 1744-1) no excede un cierto valor máximo, dependiendo de su aplicación final.

Asimismo, el árido siderúrgico debe cumplir con normativas adicionales en comparación con los obtenidos en la cantera. Dado que en muchos países las escorias aún son tratadas como

residuos, se deben llevar a cabo pruebas específicas con tal de permitir su reciclado y uso como producto final. La clasificación del árido siderúrgico según la normativa UE (deshecho, producto o subproducto) tiene un efecto directo en el rigor de los requerimientos que éstos tienen que cumplir. Afortunadamente, la clasificación de las escorias en la normativa comunitaria ha evolucionado como resultado de 25 años de debate sobre este tema. Así, de acuerdo con la Directiva Marco de Residuos 2008/98/CE, las escorias pueden ser consideradas como subproducto o incluso como producto.

A nivel nacional, existen varios países en Europa, como por ejemplo Alemania, que han desarrollado normativas específicas para la regulación del uso de escorias de acero como subbalasto y otras aplicaciones en la ingeniería civil. Aun así, no encontramos una normativa como ésta en otros países europeos como España o Portugal.

2.2.3 – Desarrollo del árido siderúrgico para subbalasto y capa de forma

El árido siderúrgico es una nueva solución de árido constituido por escorias de horno de arco eléctrico que serán usadas en aplicaciones ferroviarias, principalmente para las capas de subbalasto y de forma.

Una de las principales ventajas que presenta es su alta resistencia a la abrasión, a la vez que ofrece un precio competitivo en comparación con los áridos convencionales. Además, el uso de árido siderúrgico provoca un incremento en la estabilidad lateral de la vía debido principalmente a una óptima trabazón de las partículas como consecuencia de su angulosidad y rugosidad, así como a un mayor peso de los áridos. Como resultado, la vía que utiliza árido siderúrgico es más resistente a movimientos laterales en curvas pronunciadas.

El árido siderúrgico permite un mejor drenaje a causa de su alto porcentaje de huecos, su bajo contenido de finos y su resistencia a la degradación. No contienen materia orgánica y, dado su composición química, se evita la aparición y crecimiento de vegetación no deseada. Finalmente, es altamente resistente a la degradación provocada por los cambios en la climatología, como por ejemplo los ciclos de secado-humedecido, los ciclos de congelación-descongelación, los cambios de temperatura y los ataques químicos.

Todos estos beneficios están respaldados por la extensa campaña de ensayos de laboratorio que se ha llevado a cabo por el Laboratorio de Materiales de Construcción de la UPC, con materiales proporcionados por la empresa Adec Global enmarcado dentro del proyecto ASICAP. En este ámbito, el ensayo de Los Ángeles, que mide la resistencia a la abrasión de los áridos, muestra un valor entre 15-20 para el árido siderúrgico, el cual es comparable al de las rocas duras, cumpliendo por tanto la mayoría de las normativas. Esta conclusión se ha confirmado por el ensayo Micro-Deval, que ha resultado ser inferior a 20, el cual está en consonancia con la normativa española, y por el Coeficiente de Pulimiento Acelerado, en el que se ha obtenido un valor entre 57 y 60, dentro de la categoría de “alto rendimiento”. Por último, se ha alcanzado un índice de caras de fractura superior al 100%, el cual garantiza una buena trabazón entre partículas, una expansividad acelerada del 0,3% tras 168h, de acuerdo con la UNE-EN 1744-1, y un CBR por encima de 100, el cual es considerablemente mayor al obtenido usando áridos convencionales.

La composición química de los áridos de escoria de horno de arco eléctrico también ha sido sometida a ensayos, subrayando el test de lixiviación llevado a cabo para cuantificar la movilidad de las especies químicas (contaminantes o no) contenidas en los áridos de árido siderúrgico.

Se ha evaluado el impacto ambiental del árido siderúrgico mediante un análisis del ciclo de vida. Las categorías consideradas más relevantes han sido el Potencial de Calentamiento Global, el Potencial de Acidificación, el Potencial de Eutrofización y el Potencial de Toxicidad Humana. Los resultados obtenidos muestran que el árido siderúrgico reduce, de media, un 35% el impacto medioambiental respecto al árido convencional.

2.2.4 – Prueba de campo en línea de ADIF

2.2.4.1 – Descripción de la prueba

Se ha llevado a cabo una prueba de campo en una línea de ADIF con tráfico mixto (pasajeros y mercancías) en Castellbisbal (Barcelona), emplazamiento mostrado en las Figuras 8 y 9, con el objetivo de demostrar la viabilidad del árido siderúrgico empleado como subbalasto y capa de forma ferroviaria a escala real.



Fig. 8 - Emplazamiento del tramo de pruebas en Castellbisbal.

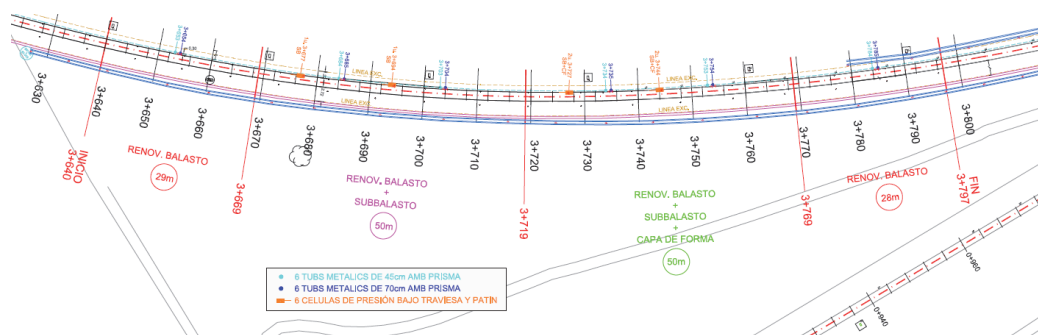


Fig. 9 - Características geométricas del emplazamiento en Castellbisbal.

Se consideraron tres tramos de 50 m cada uno:

- Un tramo de 50 m de longitud con los áridos convencionales existentes (tramo de control), con dos subtramos de 25 m cada uno.
- Un tramo de 50 m de longitud con la capa de subbalasto de árido siderúrgico y la capa de subrasante con los áridos convencionales existentes.
- Un tramo de 50 m de longitud con las capas de subbalasto y de subrasante de árido siderúrgico.

El suelo existente en la zona de Castellbisbal ha sido previamente caracterizado en el proyecto de construcción de la línea Castellbisbal / El Papiol – Mollet / Sant Fost, también ejecutado por COMSA. El proyecto, fechado en octubre de 2006, preveía la ejecución de un tercer carril para la adecuación del tráfico de ancho internacional o ibérico.

2.2.4.2 – Monitorización del tramo de pruebas

Se llevó a cabo una monitorización en cada uno de los tramos con el objetivo de evaluar los beneficios reales de la implementación del árido siderúrgico en las capas de subbalasto y forma. Entre los parámetros monitorizados se incluyen la geometría y el asiento global de la vía, el asiento de las capas de subbalasto y de forma, la tensión en las capas de subbalasto y de forma con y sin paso de trenes, así como la deflexión del carril bajo la circulación de trenes (ver Figura 10).



Fig. 10 – Monitorización del tramo de pruebas.

Los resultados del asiento de vía en cada tramo se muestran en la Figura 19.

2.3 – Árido siderúrgico para balasto y subbalasto ferroviario: BIRBALAS

2.3.1 – Contexto

El proyecto BIRBALAS, financiado por el gobierno vasco en el marco de los proyectos de I+D+i HAZITEK 2019, y desarrollado por SIDENOR, ELINFE, SAITEC y COMSA en colaboración con TECNALIA y con el apoyo de ETS (Administrador Ferroviario del País Vasco), nace con el objetivo de desarrollar nuevos productos de balasto y subbalasto ferroviarios a partir de escorias procedentes de las principales acerías de horno de arco eléctrico en la Comunidad Autónoma del País Vasco, abriendo una nueva vía para la gestión del excedente de estos residuos y garantizado, a su vez, la conformidad con especificaciones que garanticen su funcionalidad, seguridad e inocuidad medioambiental.

Los principales objetivos son los siguientes:

- Comprobación, a partir del material y los prototipos de producto, la adecuación de la escoria negra de diferentes acerías del País Vasco para la fabricación de balasto y subbalasto ferroviarios en base a los requerimientos genéricos que les son exigibles.
- Definición, considerando el uso previsto y las propiedades del nuevo material, de métodos de ensayo y especificaciones particulares para la caracterización físico-química de las escorias en cuanto a su funcionalidad e inocuidad ambiental, teniendo en cuenta la expansividad, cal libre, lixiviación y contaminación del suelo, entre otros.
- Estudio de la necesidad de otras comprobaciones no inicialmente contempladas para garantizar las condiciones de durabilidad del proyecto y otros aspectos funcionales, empleando para ello métodos deductivos y ensayos de laboratorio.
- Una vez superada satisfactoriamente la evaluación previa a nivel de laboratorio, realización de una prueba piloto en un tramo de vía real, utilizando diferentes proporciones de mezcla del material con árido tradicional, e incorporación de un sistema

sensorizado de recogida y análisis de datos que permita monitorizar parámetros críticos de la sección transversal de la vía.

- Identificación de las carencias del material y posibles soluciones tanto en los procesos de valorización, triturado y clasificación, como en los procesos siderúrgicos.
- Reducción sustancial de las más de 150.000 t de escorias que no son capaces de gestionarse en el País Vasco cada año, en línea con las directrices estratégicas para la economía circular recogidas en el nuevo Plan de Prevención y Gestión de residuos del Departamento de Medio Ambiente y Política Territorial del Gobierno Vasco.
- Proporción al mercado de una solución más sostenible que la actual para las infraestructuras ferroviarias, reduciendo el consumo de recursos naturales no renovables.

2.3.2 – *Análisis del estado del arte*

En 2017 la producción total de acero en España se situó en 14,5 millones de toneladas, de las cuales algo más del 20% provino de 11 acerías de horno de arco eléctrico situadas en el País Vasco. Considerando que la generación de escorias negras en las acerías de horno eléctrico supone un 14,5% de la producción de acero, la cantidad total que se genera anualmente en Euskadi es de unas 440.000 t. De éstas, más de 150.000 t no son gestionadas y se depositan en vertedero.

Actualmente, las principales aplicaciones de la escoria negra ya valorizada son las siguientes:

- Como material para bases y subbases de carreteras.
- Utilización en la capa de rodadura de carretera en mezclas bituminosas.
- Empleo en cemento.
- En morteros.
- Como árido para hormigón.

Como se expone más adelante, será la aplicación final del material la que condicione, en gran medida, el procesamiento y valorización al que será sometido.

2.3.3 – *Tramo de pruebas en Derio (Vizcaya)*

2.3.3.1 – *Descripción de la prueba*

El tramo de prueba es un tramo recto entre Derio-Zamudio (vía estrecha del administrador ferroviario ETS, como se puede apreciar en la Figura 11). La prueba se realiza sobre vía única electrificada con ligera pendiente longitudinal.

El tramo tiene una longitud total de 108 metros, dividido en 4 subtramos, teniendo cada uno una dosificación distinta de árido siderúrgico:

- Subtramo 0. Control. Compuesto exclusivamente de árido natural. Tramo de 18m lineales.
- Subtramo 1. Máximo siderúrgico. Tramo de 36m lineales compuesto por 70% de balasto de árido siderúrgico y 30% de balasto de árido natural y subbalasto compuesto por 70% de balasto de árido siderúrgico y 30% de balasto de árido natural.
- Subtramo 2. Siderúrgico medio. Tramo de 36m lineales compuesto por 50% de balasto de árido siderúrgico y 50% de balasto de árido natural, mientras que la capa de subbalasto está compuesta por 45% de balasto de árido siderúrgico y 55% de balasto de árido natural.
- Subtramo 3. Mínimo siderúrgico. Tramo de 18m lineales compuesto por 30% de balasto de árido siderúrgico y 70% de balasto de árido natural, mientras que la capa de subbalasto está compuesto por 15% de balasto de árido siderúrgico y 85% de balasto de árido natural.



Fig. 11 - Vista general del tramo de pruebas en Derio (Vizcaya)

Previo a la ejecución del tramo se han llevado a cabo las mezclas con las distintas dosificaciones de árido siderúrgico para cada subtramo en un acopio intermedio a pocos kilómetros de Derio, tal como se puede ver en la Figura 12.



Fig. 12 - Acopio para las mezclas de las distintas dosificaciones

2.3.3.2 – Monitorización del tramo de pruebas

Una vez construido el tramo de pruebas, se procede a su monitorización, que consiste en:

- Levantamientos topográficos periódicos para medir el asiento de vía en cada subtramo
- Instalación de acelerómetros para medir el comportamiento dinámico de la vía (ver Figura 13).
- Control de lixiviados mediante la recogida del agua de lluvia bajo la capa de balasto y subbalasto de forma periódica.



Fig. 13 - Acelerómetros instalados en el tramo de pruebas en Derio (Vizcaya)

3 – RESULTADOS

3.1 – Neoballast

3.1.1 – Análisis de datos prueba de campo línea ADIF

Una vez afinados y ajustados los datos obtenidos, eliminando posibles valores atípicos provocados por los vehículos encargados del mantenimiento de la vía, por ejemplo, e identificando velocidades de los vehículos y los bogies individuales; se puede obtener información referente a los pasajes y su clasificación, análisis de la presión total de cada bogie individual, análisis de ruido y vibración.

La clasificación del tipo de vehículo y de su velocidad se deduce gracias al número de bogies. Mientras los trenes de mercancías tienen un gran número de bogies, la mayoría de trenes de pasajeros son trenes Renfe 449 acoplados y Renfe 447 acoplados, ambos con doce bogies (6+6). Alrededor de 6000 eventos se clasificaron como trenes de pasajeros, siendo divididos por rangos de velocidad de 10Km/h entre 80 Km/h y 120 Km/h, siendo los convoyes con velocidades superiores clasificados en un solo grupo, o con velocidades inferiores clasificados en otro grupo.

3.1.1.1 – Análisis de mediciones

El número de bogies se calcula a partir del número de picos en el gráfico, donde cada pico representa un bogie. Se observa cómo cada bogie tiene una rueda que alcanza una presión máxima. Este valor máximo será el que se tenga en cuenta al analizar las presiones de los bogies.

3.1.1.2 – Resultados

3.1.1.2.1 – Ruido

La contribución del Neoballast en la reducción de ruido fue de 0.6 dB en promedio en el rango de frecuencias analizado, lo cual se concluyó como una contribución no relevante. Cabía esperar este resultado, ya que los efectos de Neoballast se esperan en la transmisión de vibraciones a través de la infraestructura.

3.1.1.2.2 – Vibraciones

El principal objetivo de este ensayo es calcular la reducción total de vibraciones causada por el Neoballast. La Figura 14 muestra la evolución global de la reducción del nivel de decibelios en función del tiempo. Nótese que entre noviembre y diciembre del 2019, el rango de velocidades

entre 80-90 Km/h fueron desestimadas debido a los datos insuficientes. Los valores negativos muestran la diferencia de vibraciones entre el balasto de origen natural y Neoballast.

En la Figura 15 se muestra la comparación de vibraciones entre Neoballast y el balasto de origen natural.

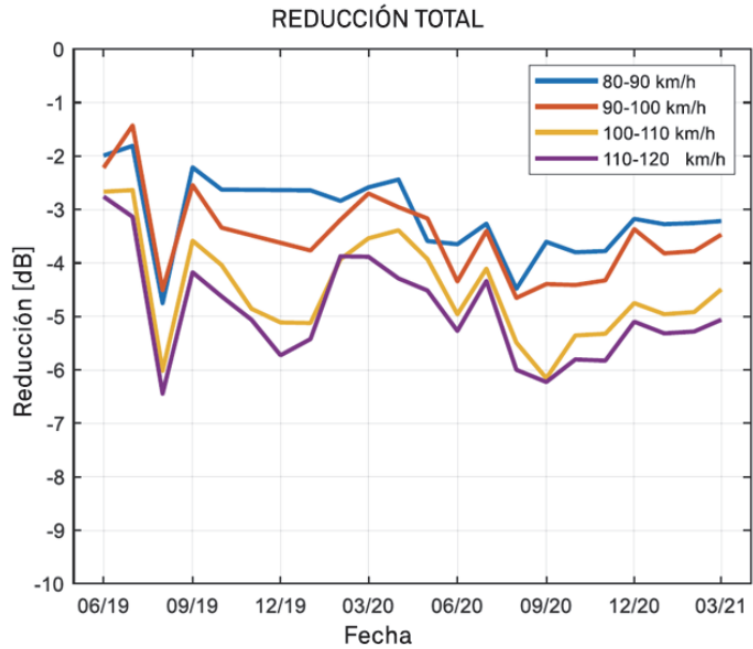


Fig. 14 - Evolución de la reducción global de vibraciones.

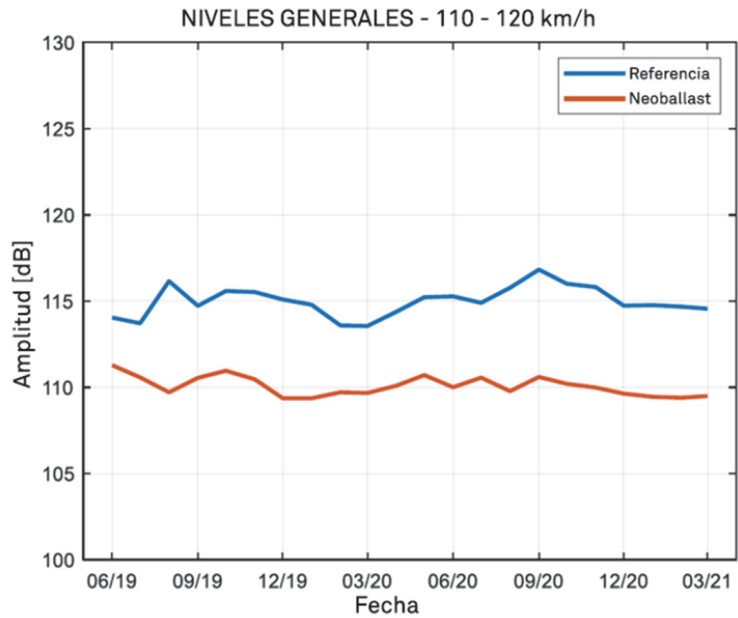


Fig. 15 - Comparación de vibraciones entre Neoballast y balasto convencional.

3.1.1.2.3 – Tensión bajo balasto (degradación)

La Figura 16 muestra la evolución de las mediciones de vibraciones medidas como valor global en el rango de frecuencias de interés en función del tiempo. Nótese que se hicieron trabajos de bateo en la vía que acabaron afectando las mediciones. Los trabajos de mantenimiento correspondientes al bateo en el tramo con Neoballast se realizaron en agosto del 2019, mientras que en el tramo de balasto de origen natural se hicieron en enero del 2020. Los últimos trabajos de bateo se realizaron en mayo de 2020 para ambas secciones.

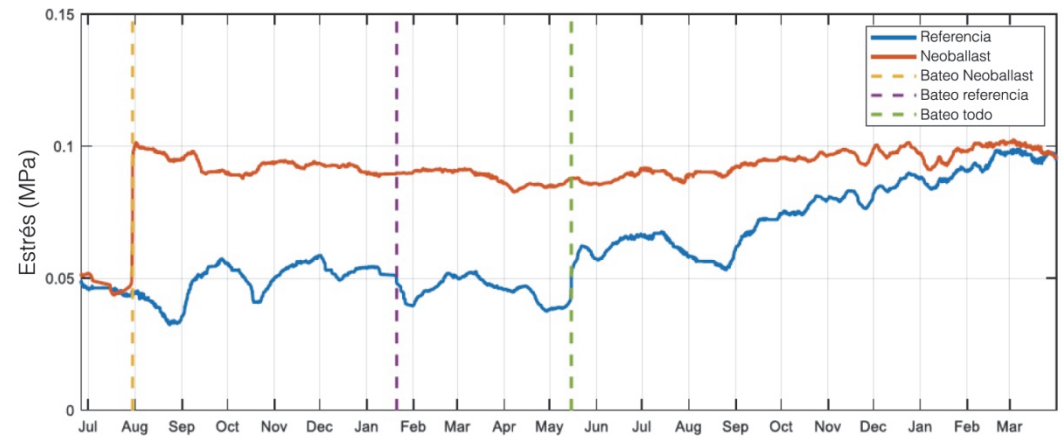


Fig. 16 – Comparación de las tensiones medidas bajo balasto.

3.1.1.2.4 – Asiento de la vía

El asiento de la vía es periódicamente monitorizado por un equipo de supervisión. En la Figura 17 se muestran las mediciones de los asientos, donde se aprecian los trabajos de bateo

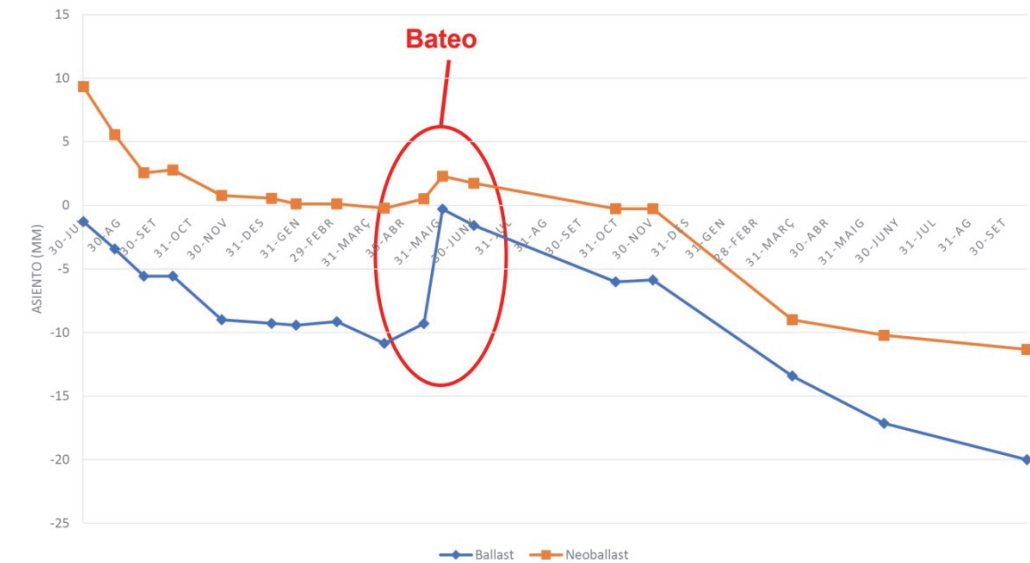


Fig. 17 - Asiento de la vía.

realizados en mayo del 2020 con una perturbación en las mismas. El gráfico muestra la tendencia del asiento a converger, especialmente en la sección ocupada por Neoballast.

3.1.2 – Resultados de la prueba de campo en el metro de Barcelona

Los aspectos más relevantes de los muestreos realizados para evaluar el comportamiento de los impactos del balasto tradicional y el Neoballast son mostrados en la Tabla 1.

Tabla 1 – Evolución de los niveles de vibraciones y eficacia del Neoballast.

	Nivel de vibración en el hastial, Lv (dB)					
	Antes de la renovación	Después de la renovación				
		Inicial	M1-Ago20	M3_Oct20	M5_Nov20	M11_Jun21
Via 1 - Balasto	98.3	85.5	87.4	83.9	85.0	84.5
ΔdB		-12.9	-10.9	-14.4	-13.3	-13.8
Via 2 - Neoballast	105.1	87.3	89.7	87.3	88.4	86.2
ΔdB		-17.8	-15.4	-17.8	-16.7	-18.9
Neoballast vs ballast		-4.9	-4.5	-3.4	-3.4	-5.1

En la Figura 18 se puede observar el nivel de vibración evaluado, L_{aw} , y la media, $L_{aw,mig}$, registrados en los puntos de medición situados en la calle, en la vía 2 con Neoballast y en la vía 1 con balasto tradicional.

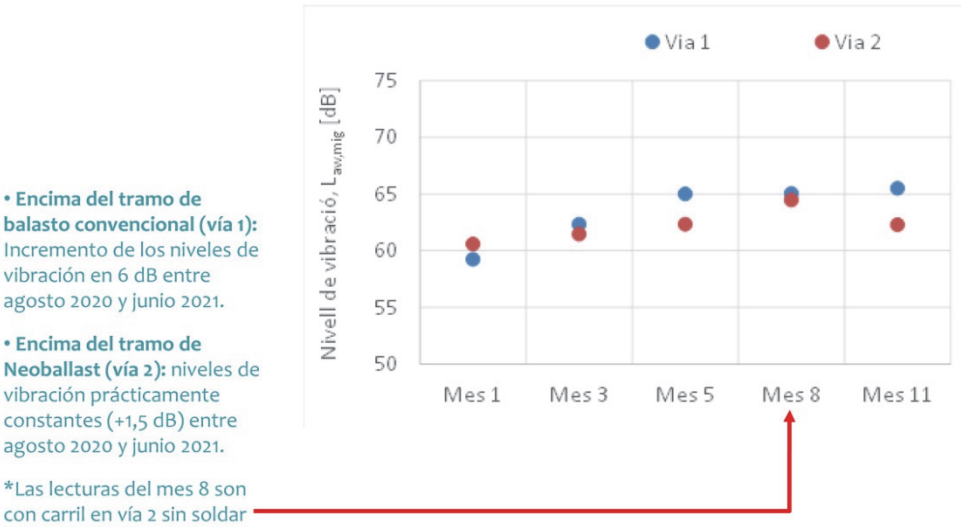


Fig. 18 - Evolución del nivel de vibraciones en la calle.

Las conclusiones que se pueden extraer de los niveles de vibración, tanto en el interior del túnel como en la calle son las siguientes:

- Neoballast reduce vibraciones en el hastial del túnel en 5 dB.
- Niveles de vibración constantes en la calle, encima del tramo de Neoballast, mientras que han aumentado 6 dB sobre el tramo de balasto convencional.
- Asiento muy limitado en ambas secciones.
- Aunque en la vía con Neoballast la velocidad de los trenes es ligeramente superior a la de la vía con balasto de origen natural, los niveles vibratorios medios computados son menores en la vía con Neoballast.

En conclusión, basándonos en los resultados anteriormente mostrados, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- La atenuación global de las vibraciones que Neoballast ofrece es de alrededor 6,2 dB, siendo puntualmente superior en rangos de frecuencia específicos.
- La mayor reducción es más pronunciada en los rangos de velocidad más elevados, donde más mediciones se han realizado debido al número de operaciones en ese tramo.
- La mayor reducción es principalmente causada por el incremento de los niveles de vibraciones en el tramo analizado, mientras que los niveles de vibración en el Neoballast permanecen estables. Este hecho es confirmado con la evaluación de los valores globales en función del tiempo que acaban coincidiendo con la hipótesis de que Neoballast permanece más estable con el paso del tiempo.
- Las curvas de pérdida de inserción muestran la mayor atenuación en las frecuencias más altas, especialmente por encima de los 40 Hz. En este rango de frecuencias, la evolución del efecto positivo (aumento de la pérdida de inserción) es más evidente.
- Respecto al nivel de tensiones medido bajo la capa de balasto / Neoballast, durante los primeros meses de monitorización no había una tendencia clara en la evolución de los valores medidos, ni en la sección de referencia, ni en la sección con Neoballast. Después del último bateo se observa una tendencia más estable, con las tensiones bajo la capa de Neoballast evolucionando más lentamente y de manera más monótona que bajo el balasto convencional.
- Neoballast tiene un asiento más pronunciado al principio, aunque acaba convergiendo antes que el balasto de origen natural.

3.2 – Árido siderúrgico en capas de asiento ferroviarias: GAIN

Tras el periodo de monitorización, se ha comprobado que el árido siderúrgico se comporta satisfactoriamente, manteniéndose estable la geometría de vía y teniendo asientos globales y parciales entre capas dentro de la normalidad, así como tensiones admisibles en las capas de subbalasto y de forma bajo el paso de unidades de cercanías y trenes de mercancías. Por último, la deflexión del carril bajo circulación de trenes también ha resultado satisfactoria, con valores inferiores a los 2 mm, como muestra la Figura 19.

3.3 – Árido siderúrgico para balasto y subbalasto ferroviario: BIRBALAS

Lamentablemente, actualmente COMSA no dispone de más resultados referentes al proyecto BIRBALAS para poder incluir en el artículo.

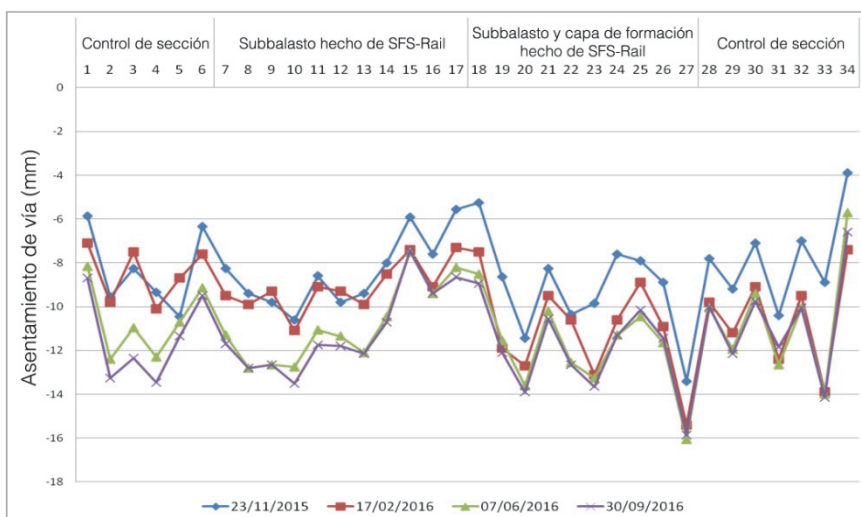


Fig. 19 - Asiento global de la vía.

4 – CONCLUSIONES

Las soluciones mostradas en el presente artículo buscan mejorar las infraestructuras ferroviarias europeas apostando por la sostenibilidad e innovación, alargando la vida útil de la infraestructura a la vez que reduciendo los costes de mantenimiento de la misma.

4.1 – Neoballast

Neoballast es una nueva solución sostenible para el balasto consistente en áridos de balasto convencional recubiertos con un ligante avanzado y polvo de caucho procedente de neumáticos de vehículos al final de su vida útil. Este nuevo material presenta diversos beneficios técnicos, medioambientales y económicos, como una menor degradación, una mejor disipación de la energía y distribución de la carga, un mejor rendimiento en términos acústicos y de vibraciones, la reducción de la extracción de áridos de las canteras, el reciclaje de los neumáticos de vehículos fuera de uso, una menor necesidad de mantenimiento y una reducción global de los costes del ciclo de vida. Además, permite la posibilidad de utilizar áridos reciclados y de baja calidad y es una solución ideal para túneles ferroviarios con gálibo limitado, aparatos de vía, zonas con falta de balasto de alta calidad, entre otras aplicaciones. Se resumen de manera gráfica los beneficios anteriormente mencionados que ofrece Neoballast en la Figura 20.

4.2 – Árido siderúrgico en capas de asiento ferroviarias: GAIN

El árido siderúrgico, además de dar salida a un residuo de la producción de acero, ofrece prestaciones mecánicas compatibles con los requisitos para su uso como balasto, subbalasto y capa de forma ferroviaria. En concreto, el árido siderúrgico emerge como un árido de alta calidad que ofrece una resistencia a la abrasión y una dureza considerablemente mayor a la de la mayoría de áridos naturales comúnmente empleados en las capas de asiento ferroviarias. La idoneidad de su aplicación en capas de asiento ferroviarias ha sido demostrada por las pruebas de campo, poniendo de manifiesto su contribución hacia vías ferroviarias de mejores prestaciones, tales como vías más rígidas, estables y duraderas.

Las mejores prestaciones técnicas anteriormente mencionadas, junto a su coste competitivo, la reducción de las necesidades de mantenimiento y un impacto ambiental mucho menor (reducción

RESUMIENDO...



Fig. 20 - Beneficios Neoballast.

del impacto ambiental en las canteras de árido natural y reciclaje de un residuo industrial abundante), hacen del árido siderúrgico una alternativa rentable y muy atractiva, con un coste de ciclo de vida inferior al árido natural.

4.3 – Árido siderúrgico para balasto y subbalasto ferroviario: BIRBALAS

En este momento se están recabando datos del tramo de pruebas y del comportamiento del árido siderúrgico usado como balasto y subbalasto ferroviario. Aunque no se dispone de resultados definitivos, los resultados preliminares están siendo muy positivos. Por otro lado, se demuestra la no interferencia del árido siderúrgico usado como balasto con los dispositivos de señalización y seguridad, ni con el material móvil, ni con ningún otro elemento de la infraestructura o superestructura que pudiera afectar la explotación ferroviaria.

5 – REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Pujol, V.M. (2021). *16. Construction: acoustic insulation in buildings and railway applications. Tire waste and recycling*. Academic Press, Elsevier Inc.
- Proyecto Neoballast (2021): *Balasto de alto rendimiento y larga duración para infraestructuras ferroviarias sostenibles*. Technical report.
- Proyecto Gain (2016): *Árido siderúrgico en capas de asiento ferroviarias*. Technical report.
- Proyecto Birbalas (2021): *Desarrollo de productos de balasto y subbalasto ferroviario a partir de escoria negra de acería de horno de arco eléctrico*. Technical report.
- Proyecto ASICAP (2013): *Proyecto ASICAP caracterización de áridos siderúrgicos para uso en capa de base y subbalasto en plataformas ferroviarias*. Technical report.