

UTILIZACIÓN DE CAUCHO RECICLADO DEL NEUMÁTICO EN LA OPTIMIZACIÓN DEL MANTENIMIENTO DE VÍAS FERROVIARIAS

Leticia Saiz Rodríguez, Roberto Pérez Aparicio

Departamento de Desarrollo de Mercados y Nuevas Aplicaciones, SIGNUS Ecovalor S.L.

Miguel del Sol Sánchez, Fernando Moreno Navarro, M^a Carmen Rubio Gámez

Laboratorio de Ingeniería de la Construcción, Universidad de Granada

Resumen

El reciclaje de los neumáticos al final de su vida útil (NFVU) es de gran importancia para la aplicación del modelo de Economía Circular y como consecuencia, para contribuir a un crecimiento económico sostenible. En la última década, se han desarrollado proyectos donde se han puesto de manifiesto las buenas propiedades elásticas del caucho que permiten, entre otras ventajas, la atenuación de las vibraciones y del ruido.

El sector ferroviario ha mostrado interés por la utilización de materiales reciclados, no sólo los procedentes de su propia actividad sino también los generados en otros sectores como son los NFVU. Este proyecto se centra en el análisis de la viabilidad técnica del uso de granulado de caucho procedente de NFVU en el proceso de mantenimiento de vías ferroviarias. En particular, dicho granulado de caucho puede reemplazar parte de los áridos empleados en el proceso conocido como “Stoneblowing” con el objetivo de crear una capa elástica bajo la traviesa y optimizar el comportamiento mecánico de la estructura ferroviaria, reduciendo así el número de tareas de mantenimiento. Los resultados obtenidos indican que la utilización de caucho de NFVU en la técnica de Stoneblowing se postula como una adecuada alternativa a los métodos convencionales, ya que se aumenta la capacidad de amortiguación y atenuación de las vibraciones, a la vez que se mejora la calidad y durabilidad de la infraestructura reduciéndose así las intervenciones de mantenimiento. Además, con estos resultados se estima que sería necesaria 1 tonelada de granulado de NFVU por kilómetro de vía, lo que equivale al reciclado de aproximadamente 225 NFVU de turismo por kilómetro.

1.-Introducción

La vía sobre balasto es la tipología de infraestructura ferroviaria más utilizada en nuestro país, así como en el resto del mundo, debido a una serie de ventajas asociadas a la estructura granular de la capa de balasto (geometría fácilmente ajustable, costes de construcción reducidos, amortiguamiento de cargas y vibraciones, etc.). Sin embargo, este carácter granular del balasto supone un punto de debilidad en la infraestructura ferroviaria ante el paso repetido de los trenes, causando su deformación permanente, y por tanto, la pérdida de calidad geométrica de la vía, lo que requiere de continuas intervenciones de mantenimiento. En este sentido, la técnica de bateo de balasto es la más utilizada debido a su generalización y amplia experiencia. Sin embargo, este proceso lleva a una importante degradación de las partículas a la vez que se obtiene, tras la operación de mantenimiento, una capa granular suelta que, a pesar de recuperar capacidad de amortiguamiento, conlleva de nuevo una rápida recompactación de la capa, y por tanto, una pérdida de calidad geométrica entre otros fenómenos.

Ante estos inconvenientes asociados al bateo del balasto, en los años 80 se desarrolló en Inglaterra una técnica de mantenimiento alternativa conocida como “Stoneblowing”, la cual consiste en la incorporación de partículas de menor tamaño que el balasto (entre 14 – 20 mm aproximadamente) para rellenar el hueco existente entre la superficie de la capa de balasto asentada y la base de la traviesa una vez levantada para ubicarla en su posición teórica. La Figura 1 muestra un esquema de la técnica de Stoneblowing, junto a una imagen de la máquina comúnmente utilizada para dicho mantenimiento. Este proceso, a diferencia del bateo, permite recuperar la geometría de la vía sin alterar la ya compactada capa de balasto, y por tanto, presenta mayor capacidad portante y resistencia a futuras deformaciones permanentes. Sin embargo, este proceso de incorporación de áridos sobre la capa de balasto compactada lleva consigo la rigidización de la vía y la pérdida de capacidad para amortiguar cargas, lo cual da lugar al incremento de las cargas transmitidas por los trenes y a una mayor degradación de la infraestructura ferroviaria.

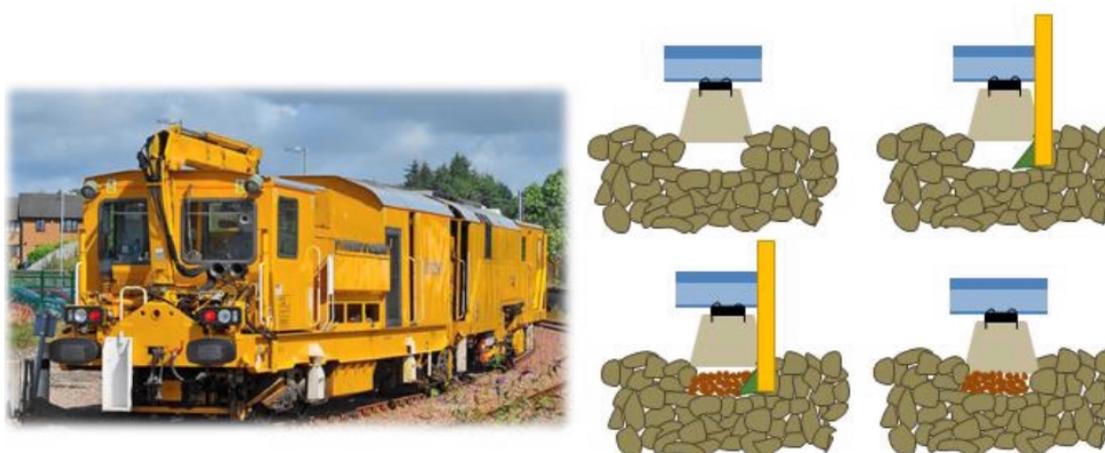


Figura 1: stoneblower y proceso de aplicación de los áridos bajo traviesa.

Para disminuir o minimizar la mencionada rigidización, este proyecto plantea incorporar caucho procedente de NFVU cuyas buenas propiedades elásticas se han puesto de manifiesto en distintos proyectos, permitiendo, entre otras ventajas, la atenuación de las

vibraciones y del ruido, utilizándose de distintas formas ya sea para la construcción de la capa de subbalasto bituminoso, traviesas y suelas bajo traviesa o incluso en técnicas de vía en placa. No obstante, hasta la fecha, no se ha contemplado la utilización de caucho de NFVU en tareas de mantenimiento de las vías sobre balasto que resultan ser las más costosas del sector ferroviario.

Por ello, ante la necesidad de desarrollar técnicas de mantenimiento más duraderas y efectivas, este proyecto propone un proceso alternativo basado en combinar por un lado el proceso conocido como Stoneblowing y por otro, los beneficios derivados de las propiedades elásticas y alta durabilidad del caucho procedente de NFVU. El objetivo es reemplazar parte de los áridos empleados en la técnica de Stoneblowing por granulado de caucho de dimensiones similares con la finalidad de crear una capa elástica bajo la traviesa que permita optimizar el comportamiento de toda la estructura ferroviaria. De igual modo que ocurre cuando se utilizan suelas bajo traviesa (conocidas como Under Sleeper Pads – USP), pero reduciendo los costes asociados a estos materiales y a su instalación, siendo este el principal inconveniente para la generalización de su uso en vías ferroviarias.

Los resultados obtenidos indican que la utilización de caucho de NFVU en la técnica de Stoneblowing se postula como una adecuada alternativa a los métodos convencionales, ya que se aumenta la capacidad de amortiguación y atenuación de las vibraciones, a la vez que se mejora la calidad y durabilidad de la infraestructura reduciéndose así las intervenciones de mantenimiento.

Con el fin de alcanzar el objetivo del proyecto se llevaron a cabo las siguientes tareas:

- Definición del tamaño más apropiado del granulado de caucho.
- Estudio de la metodología de incorporación del granulado de caucho en combinación con el resto de los áridos mediante la técnica de Stoneblowing.
- Cuantificación de la influencia de la cantidad de caucho óptima para el comportamiento de toda la sección ferroviaria.

2.-Metodología

Materiales

Para el desarrollo del proyecto de investigación se utilizó granulado de caucho procedente de la trituración y granulación de NFVU de tres granulometrías diferentes: 4 – 14 mm (en adelante NFVU4), 8 – 16 mm (NFVU8), y 14 – 20 mm (NFVU14).



Figura 2: diferentes granulometrías empleadas.

El material que se utilizó como referencia fueron áridos naturales como los empleados habitualmente en el proceso de Stoneblowing, de naturaleza ofítica con tamaños comprendidos entre 14 y 20 mm (McMichael y McNaughton, 1999; Sol-Sánchez et al., 2016).

Además, se emplearon una serie de componentes que permitieron reproducir en laboratorio la sección de vía ferroviaria comúnmente utilizada por algunos administradores europeos como ADIF. Así, se utilizó balasto procedente de la trituración de rocas ofíticas, con una granulometría uniforme y unas propiedades en consonancia con la norma EN 13450 y con el pliego de prescripciones técnicas generales para materiales ferroviarios (PF-6 Balasto).

Para la subestructura de la sección de vía reproducida en laboratorio (similar a la empleada por ADIF en España), se utilizó subbalasto compuesto por áridos ofíticos cuyas especificaciones técnicas están dentro de los límites establecidos en el pliego de prescripciones técnicas para materiales ferroviarios (PF-7 Subbalasto granular).

Finalmente, con el fin de analizar el efecto de las partículas de caucho como componente flexible bajo traviesa, se utilizaron dos suelas bajo traviesa convencionales como elementos de referencia. Estas suelas bajo traviesa fueron obtenidas a partir de la banda de rodadura de NFVU a través de un proceso de desconstrucción. Se utilizaron dos suelas con diferente espesor con el objetivo de proporcionar componentes con diferente flexibilidad: espesor de 4,5 mm con un módulo de flexión estática igual a 0,10 N/mm³, y otra con 2,5 mm de espesor y 0,25 N/mm³ de módulo estático, pudiendo clasificarse como suela blanda y rígida, respectivamente (Sol-Sánchez et al., 2014a).

Plan de ensayos

Con el fin de evaluar el efecto de la utilización de granulados de caucho procedente de NFVU bajo las traviesas, así como definir los parámetros de diseño y forma de inclusión de dichos elementos elásticos entre la traviesa y la capa de balasto, el plan de trabajo llevado a cabo se dividió en 3 etapas. La Tabla 1 muestra un resumen de dichas fases de estudio, así como las soluciones analizadas y los ensayos realizados en cada una de ellas.

Tabla 1: resumen plan de ensayos.

Etapa	Prototipos	Ensayos	Parámetros
1 – Efecto del tamaño de la partícula de caucho de NFVU	Áridos	- Permeámetro vibratorio - Cajón de ensayos	- Percolación de NFVU entre capa balasto
	Capa NFVU4		
	Capa NFVU 8		
	Capa NFVU 14		
2 – Influencia de la posición de la capa de NFVU	Áridos	- Permeámetro vibratorio	- Percolación de NFVU entre capa balasto
	Áridos+50NFVU14	- Simulación tráfico en cajón de ensayos	- Asiento
	Áridos+50NFVU8		- Rigidez
	50NFVU14+ Áridos		- Energía disipada
50NFVU8+ Áridos	- Multi-ensayo (frecuencia y carga)	- Rigidez - Energía disipada	
3 – Efecto de la cantidad de caucho de NFVU	Áridos	- Simulación tráfico en cajón de ensayos	- Rigidez - Energía disipada
	Áridos+50NFVU		
	Áridos+25NFVU		
	Áridos+USP blanda	- Multi-ensayo (temperatura y carga)	
	Áridos+USP rígida		

ETAPA 1: Efecto del tamaño de las partículas de caucho de NFVU

Se pretende determinar el tamaño del granulados de caucho más apropiado para su uso como árido flexible durante el proceso de Stoneblowing.

Así, se estudiaron las tres granulometrías que se especificaron anteriormente evaluando como principal parámetro su efecto para evitar la percolación de las partículas a través de los huecos de la capa de balasto. Para ello, se utilizaron dos métodos de ensayo diferentes que permiten reproducir los movimientos y tensiones a los que está sometida una capa de balasto después del proceso de Stoneblowing: (i) permeámetro vibratorio y (ii) cajón de balasto con sección acotada.

El ensayo de permeámetro vibratorio (Figura 3) consistió en disponer una capa de

balasto de 30 cm dentro de un permeámetro de sección cuadrada sobre la cual se colocó una capa de 2 cm de espesor con cada uno de los materiales a estudiar (áridos, NFVU4, NFVU8 y NFVU14), reproduciendo así la corrección geométrica de un asiento de 20 mm de la capa de balasto. Posteriormente se retiró el bloque de hormigón y se procedió a recuperar las partículas de la superficie para calcular la cantidad de material que ha percolado rellenando los huecos del balasto.

A continuación, se dispuso de nuevo el bloque de hormigón y se sometió a un estado vibratorio reproduciendo las condiciones en la vía de ferrocarril con el objetivo de evaluar la cantidad de partículas percoladas en la capa de balasto. Para ello, el dispositivo se incorporó a una mesa vibratoria que permite reproducir oscilaciones con un rango de frecuencias entre 50-100 Hz durante 2 minutos.

De igual modo, este proceso se repitió en un cajón de ensayos que permite reproducir los esfuerzos a los que están sometidas las vías ferroviarias. Además, este cajón presenta unas dimensiones que permiten acotar de forma precisa el área bajo la sección de traviesa, y por tanto, cuantificar la cantidad de partículas de caucho que permanecen en superficie tras la aplicación de la carga. El ensayo consiste en aplicar series de 10.000 ciclos de carga con una frecuencia de 5 Hz y un nivel de tensión bajo traviesa próximo a 200 kPa, simulando así el estado tensional generado al paso de trenes a través de la vía.

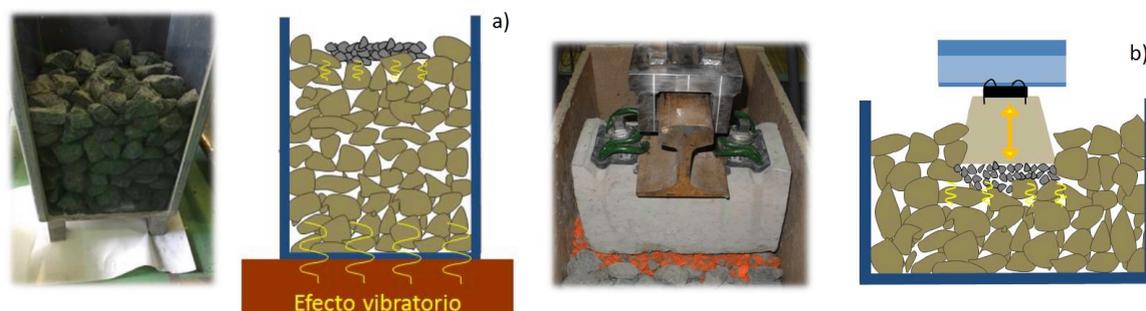


Figura 3: (a) permeámetro vibratorio, (b) cajón de ensayos con sección acotada.

ETAPA 2: Influencia de la posición de la capa de NFVU

Una vez seleccionados los tamaños de caucho más apropiados, se pasó a evaluar la forma de incorporación de este material flexible mediante la técnica de Stoneblowing, actuando como sustitutivo de parte de los áridos naturales habitualmente empleados en este proceso de mantenimiento.

De esta forma, se analizó el efecto de incluir el granulado de caucho como una capa dispuesta sobre los áridos naturales, es decir, en contacto directo con la traviesa, o bajo dichos áridos estando en contacto con las partículas de balasto.

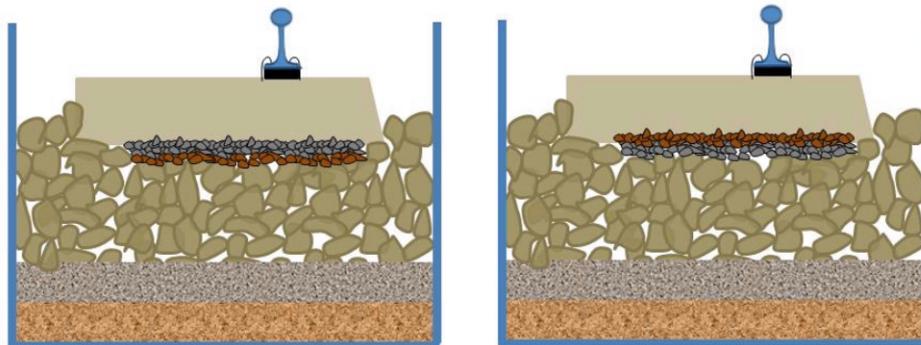


Figura 4: esquema de las soluciones estudiadas en esta etapa.

Para este análisis, de nuevo se llevó a cabo el ensayo de permeámetro vibratorio, anteriormente descrito, pero en este caso incorporando entre el balasto y el bloque de hormigón que simula la traviesa, diferentes prototipos descritos en la Tabla 1 hasta obtener una altura total de 2 cm de la bicapa. El proceso de ensayo fue similar al descrito en la fase anterior, cuantificando así el número de partículas perdidas en cada sistema.

Por otra parte, con el fin de evaluar el efecto de la posición en el comportamiento mecánico de la sección ferroviaria, se llevó a cabo un estudio en un cajón de ensayos compuesto por una capa de balasto, sección de traviesa, carril y sujeción.

El ensayo desarrollado para cada prototipo consistió en aplicar una serie de cargas dinámicas sobre la sección de vía convencional, reproduciendo una tensión bajo traviesa de unos 200 kPa a una frecuencia de 5 Hz durante unos 50.000 ciclos. Una vez conseguido un asiento de balasto de 10 mm, se pasó a incorporar cada capa de los prototipos propuestos mediante la técnica de Stoneblowing, usando para ello un inyector como el mostrado en la figura 5 que permite soplar partículas bajo la traviesa.

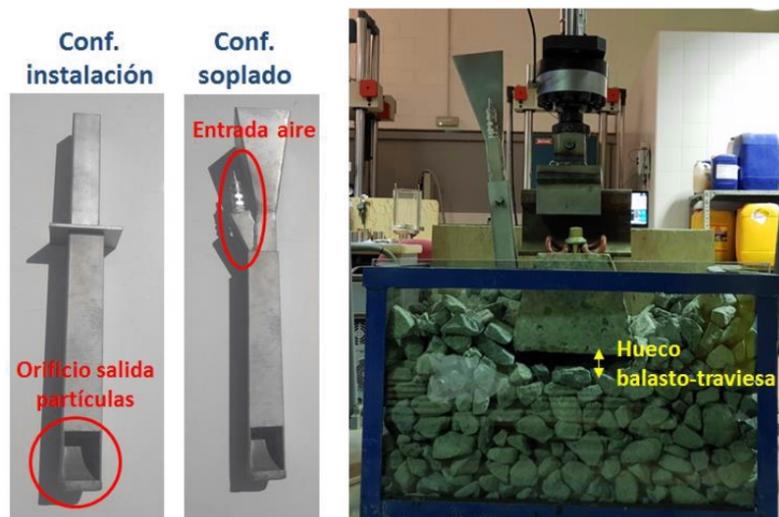


Figura 5: dispositivo utilizado para la inyección de partículas bajo traviesa.

El proceso de inyección de las partículas consistió en primer lugar en elevar el conjunto traviesa-carril e incorporar el volumen de partículas correspondiente a la primera capa que corresponda en cada caso, áridos o uno de los tipos de caucho. Posteriormente, se bajó la traviesa y se aplicaron 50 ciclos con presión de 200 kPa para compactar la primera capa. A continuación, se volvió a elevar el conjunto traviesa-carril hasta la posición inicial, y se inyectó la segunda capa de material. Finalmente, se continuó con el ensayo dinámico hasta completar 200.000 ciclos de carga, midiendo el efecto de las partículas en la rigidez del conjunto, la energía disipada y la tendencia al asiento a corto y largo plazo.

El estudio se completó estudiando el comportamiento bajo diferentes condiciones de carga: esfuerzo aplicado y frecuencia de aplicación. Los parámetros analizados fueron la rigidez del conjunto y su capacidad para disipar energía.

ETAPA 3: Efecto de la cantidad de caucho procedente de NFVU

Tras la determinación del rango de tamaño del granulado de NFVU más apropiado y su posición dentro del sistema bicapa (áridos/caucho), en la tercera fase se evaluó el efecto de la cantidad de partículas elásticas en la respuesta del conjunto de la sección ferroviaria tras la intervención de mantenimiento de vía realizada para recuperar la calidad geométrica. Para esta fase, se evaluaron diferentes soluciones para el mantenimiento de vía mediante la técnica de Stoneblowing descritas en la Tabla 1:

- Empleo de áridos naturales como referencia.
- Adición de un 25% y 50% de caucho NFVU (sobre el volumen total de áridos) junto con los áridos mediante la técnica de Stoneblowing.
- Inclusión de dos tipos de suelas bajo traviesa (una rígida y una blanda) en combinación con los áridos, para su uso como control de soluciones elásticas, definiendo de esta forma las cantidades de caucho de NFVU que representarían una alternativa a la utilización de suelas con distintas propiedades.

El ensayo consistió, de la misma forma que en la etapa anterior, en aplicar una serie de cargas dinámicas sobre la sección de vía convencional, reproduciendo una tensión bajo traviesa de unos 200 kPa a una frecuencia de 5 Hz durante unos 50.000 ciclos, hasta conseguir un asiento de balasto de unos 10 mm. Posteriormente, se procedió al levantamiento de la traviesa y la incorporación, en primer lugar, de la capa de áridos y acto seguido la cantidad de caucho correspondiente. A continuación, se aplicaron hasta los 200.000 ciclos de carga, midiendo el efecto de cada solución (áridos, áridos junto con las distintas cantidades de granulado de NFVU o áridos junto con cada tipo de suela) en el cambio del comportamiento mecánico de la sección: rigidez, amortiguamiento y tendencia al asiento.

Además, se completaron los ensayos evaluando la respuesta del conjunto bajo diferentes niveles de tensión y diferentes condiciones de temperatura exterior. De este modo, se caracterizó el cambio en la rigidez y amortiguamiento de la sección para cada temperatura. Para reproducir estos valores de temperatura se usaron lámparas de infrarrojos a diferentes alturas, controlando la evolución de este parámetro en los diferentes componentes de la sección mediante una cámara termográfica.

3.-Resultados

3.1. Efecto del tamaño de las partículas de caucho de NFVU

En la Figura 6 se presentan los resultados del ensayo del permeámetro vibratorio para cada una de las granulometrías así como los áridos de referencia. Los resultados muestran que la acción vibratoria sobre la capa de balasto lleva a un considerable aumento en el número de partículas percoladas a través de dicha capa granular, siendo este efecto más notorio en el caso de las partículas de caucho con granulometrías comprendidas entre 4 – 14 mm (NFVU4). Las otras dos granulometrías (NFVU8 y NFVU14) dieron lugar a un índice de pérdidas del mismo orden al obtenido con los áridos habitualmente utilizados en el proceso de Stoneblowing, y por tanto, ambos podrían ser apropiados para su utilización como áridos flexibles de acuerdo a los resultados.

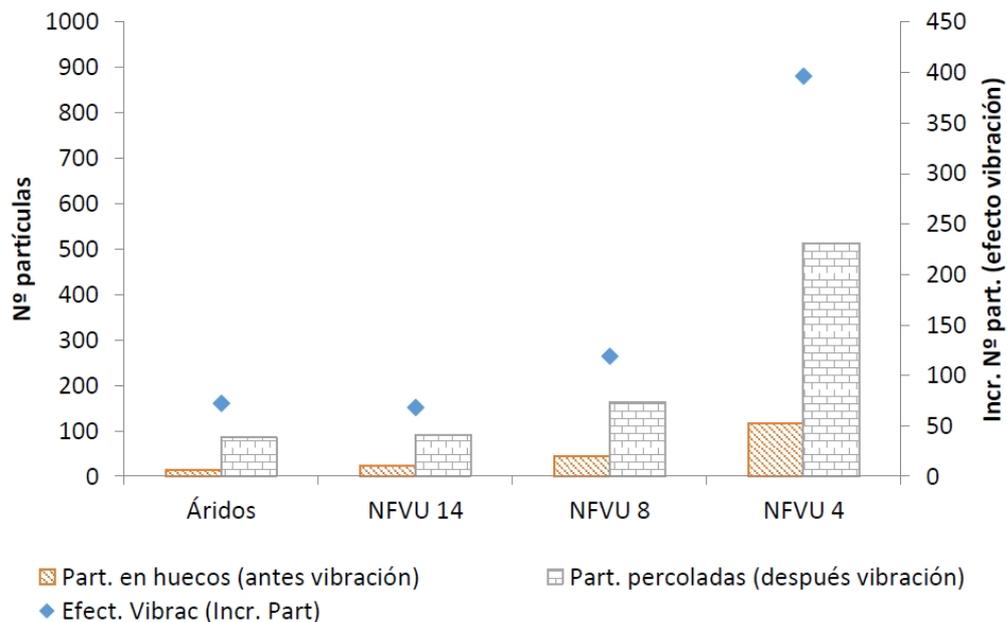


Figura 6: resultados de percolación de partículas en el ensayo del permeámetro vibratorio.

Del mismo modo, la Figura 7 representa los resultados obtenidos en la caja de ensayo con sección acotada donde se simula el paso de trenes por la sección ferroviaria. De nuevo, los resultados confirman que las dos granulometrías de caucho de mayor tamaño dan lugar a pérdidas del mismo orden que en el caso de los áridos naturales, especialmente en el caso del NFVU14. Sin embargo, para la granulometría NFVU4 existe un considerable aumento de partículas percoladas a través del balasto, lo que limita su uso, siendo más recomendable la utilización de los otros (NFVU14, NFVU8).

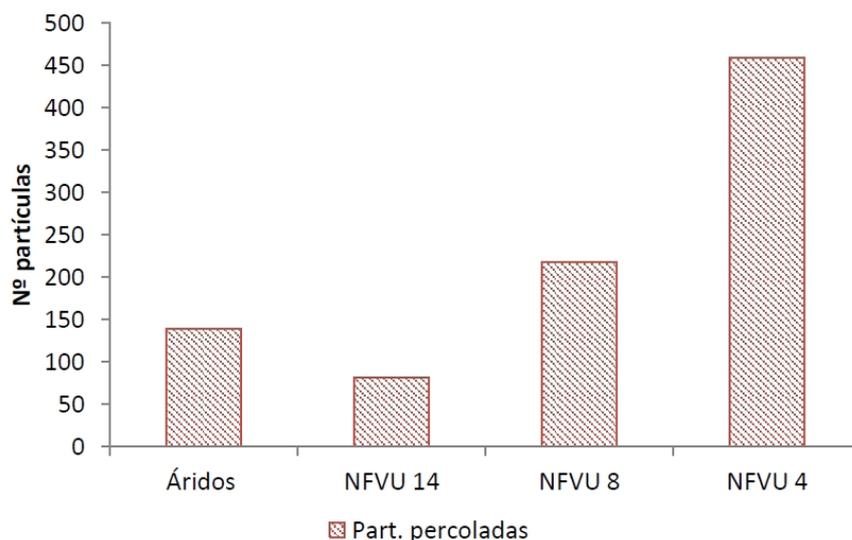


Figura 7: resultados de pérdida de partículas en el ensayo de cajón de balasto.

3.2. Influencia de la posición de la capa de NFVU

Tras los resultados de la etapa anterior, se seleccionaron los tamaños de caucho NFVU14 y NFVU8. Se crearon sistemas bicapa formados por una capa de áridos y otra de granulado de NFVU, ocupando este último material un volumen correspondiente al 50% del de los áridos, con el fin de estudiar la influencia de la disposición de las capas.

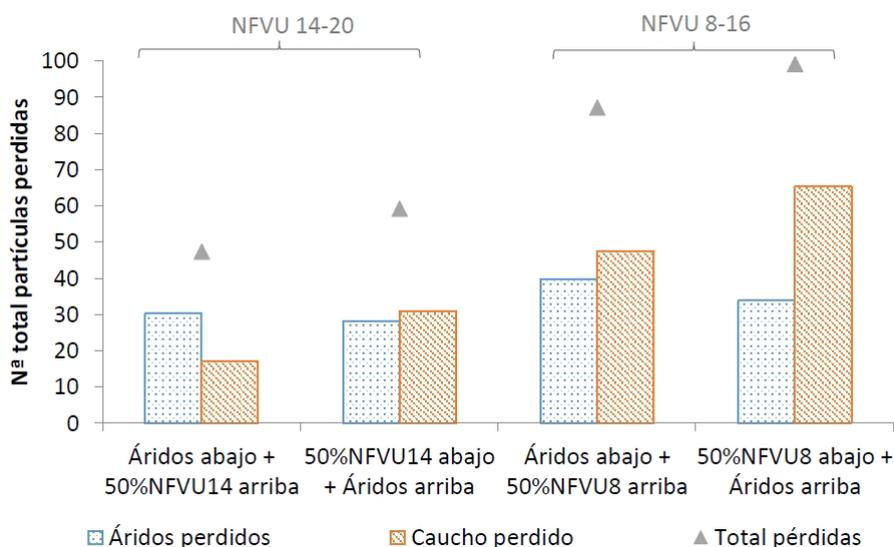


Figura 8: pérdida de partículas de diferentes sistemas bicapa áridos-nfvu.

Los resultados de los ensayos en el permeámetro vibratorio (Figura 8) indican que independientemente del tamaño de caucho, la mejor solución es disponer la capa de áridos primero (abajo) y la capa de caucho después (encima), ya que el número de partículas percoladas o perdidas disminuye en torno a un 15-25% respecto de la

disposición inversa. Por otro lado, la granulometría más adecuada es NFVU14, ya que el total de partículas perdidas es en torno a un 65-85% inferior a la granulometría NFVU8. En cualquier caso, cabe resaltar que la cantidad total de partículas perdidas en todos los casos cuando se introduce caucho se sitúa próxima o inferior a la presentada por la técnica tradicional con sólo áridos, lo que hace posible la utilización del granulado de caucho de NFVU sin incrementar de forma considerable la contaminación del balasto con elementos de menor tamaño.

Además, se evaluó el efecto de la posición de la capa de granulado de NFVU en la respuesta mecánica de la sección de la vía mediante la caja de balasto, estudiando el cambio de la rigidez del conjunto y la energía disipada tras cada una de las intervenciones de mantenimiento para recuperar la geometría de la vía mediante la inclusión de sólo los áridos de referencia o la combinación de áridos y granulado de caucho en distintas posiciones, debajo o encima de los áridos, o lo que es lo mismo, inyectados antes o después de los áridos respectivamente. Los resultados indican (Figura 9) que al incorporar sólo los áridos se produce un ligero aumento en la rigidez del conjunto y disminuye la capacidad para disipar energía como consecuencia de la densificación de la sección. Sin embargo, al incorporar un 50% de granulado de caucho sobre el volumen de los áridos en todos los casos estudiados disminuye la rigidez del conjunto y aumenta su capacidad de amortiguamiento. Esto podría dar lugar a la optimización del comportamiento de la vía a través de la adaptación de la flexibilidad de la sección dependiendo de las características de la línea ferroviaria, mediante el uso de distintas dotaciones de caucho, tal y como se ha determinado en estudios previos centrados en la utilización de granulado de caucho de NFVU como áridos flexibles (Sol-Sánchez et al., 2014b y 2017).

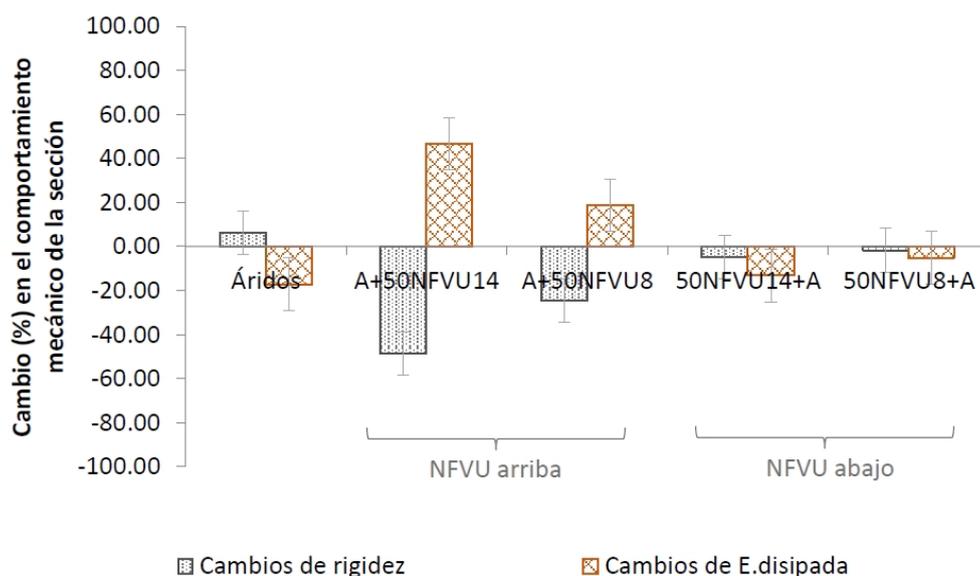


Figura 9: efecto de la posición y tamaño del granulado de caucho de nfvu en la modificación del comportamiento mecánico de la sección de vía.

Como conclusión, los resultados demuestran que, independientemente del tamaño del granulado, la posición de la capa de caucho de NFVU sobre una capa de áridos permite mayores cambios en la respuesta del conjunto, siendo por tanto, más efectiva la

aportación del caucho en esta posición, lo cual es más notable con el empleo de granulado de mayor tamaño (NFVU14). En esta configuración el granulado de caucho actúa como una capa elástica aportando mayor contacto con la base de la traviesa además de un reparto más homogéneo en el hueco. Este comportamiento elástico permitiría graduar el comportamiento de la vía.

Además, se caracterizó la capacidad para reducir el asiento de la vía tras la intervención de mantenimiento y su tendencia a largo plazo, lo cual permite analizar la durabilidad de cada uno de los prototipos para limitar la necesidad de futuras operaciones de conservación de la calidad geométrica.

De acuerdo a los resultados (Figura 10), las soluciones con granulado de caucho de NFVU arriba (inyectados después de la capa de áridos) dan lugar a una menor recompactación a corto plazo (después de 200 ciclos) que el resto. De igual modo, a medio y largo plazo (tras 50.000 ciclos y 150.000 ciclos, respectivamente), la disposición de la capa flexible encima de la capa de áridos permite reducir el asiento del conjunto, así como su tendencia, lo que mejoraría la durabilidad de la calidad de la vía. Este hecho es más acentuado en el caso del granulado de caucho de mayor tamaño (NFVU14).

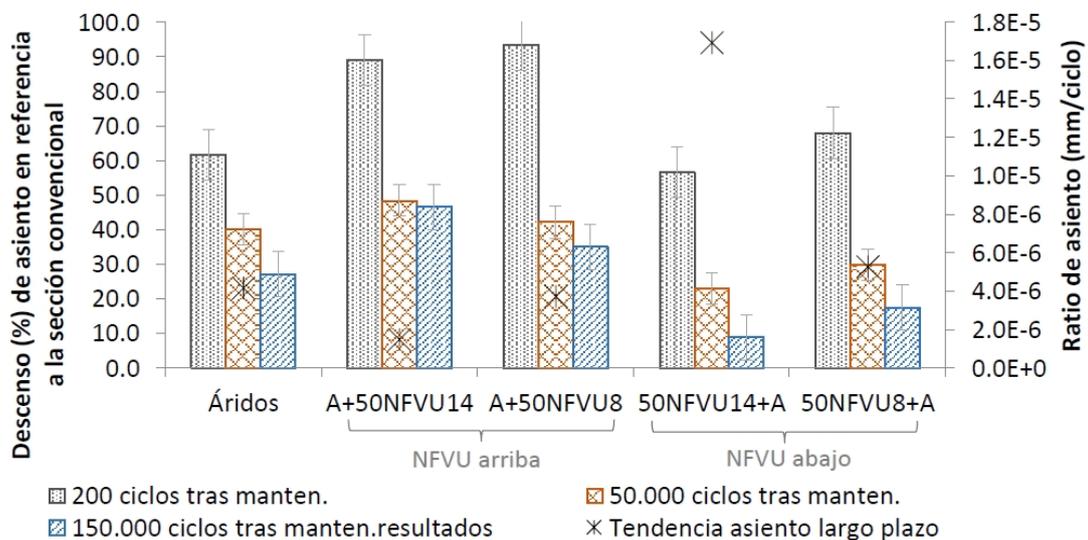


Figura 10: efecto del granulado de caucho de nfvu (posición y tamaño) en la durabilidad de la calidad geométrica de la sección de vía.

Para completar el estudio, se evaluó el módulo de rigidez y la densidad de energía disipada al variar el nivel de tensión bajo traviesa (Figuras 11a y 11b) y el valor de la frecuencia de carga (Figuras 11c y 11d). Los resultados demuestran que, independientemente de la condición de carga, las soluciones con granulado de NFVU encima de los áridos (A+50NFVU14 y A+50NFVU8) conllevan mayores cambios en el comportamiento del conjunto en referencia a la solución que contiene sólo áridos (A), presentando un descenso de rigidez de hasta el 50% frente a un 20% (aproximadamente) cuando el granulado de caucho se ubica bajo la capa de áridos.

Por otro lado, se observa que al incrementar el nivel de tensión se aumenta el valor de rigidez del conjunto (30-50%) y de la energía disipada, independientemente del tamaño

de las partículas de caucho y de su posición, obteniendo tendencias del mismo orden a la presentada por la solución de referencia. De igual modo, los resultados denotan que la variación de la frecuencia de carga tiene menor efecto en los cambios de comportamiento del conjunto, llevando a un ligero descenso de la rigidez al aumentar la velocidad de carga, a la vez que aumenta la energía disipada, obteniendo de nuevo tendencias del mismo orden en las soluciones con caucho que en el caso de referencia.

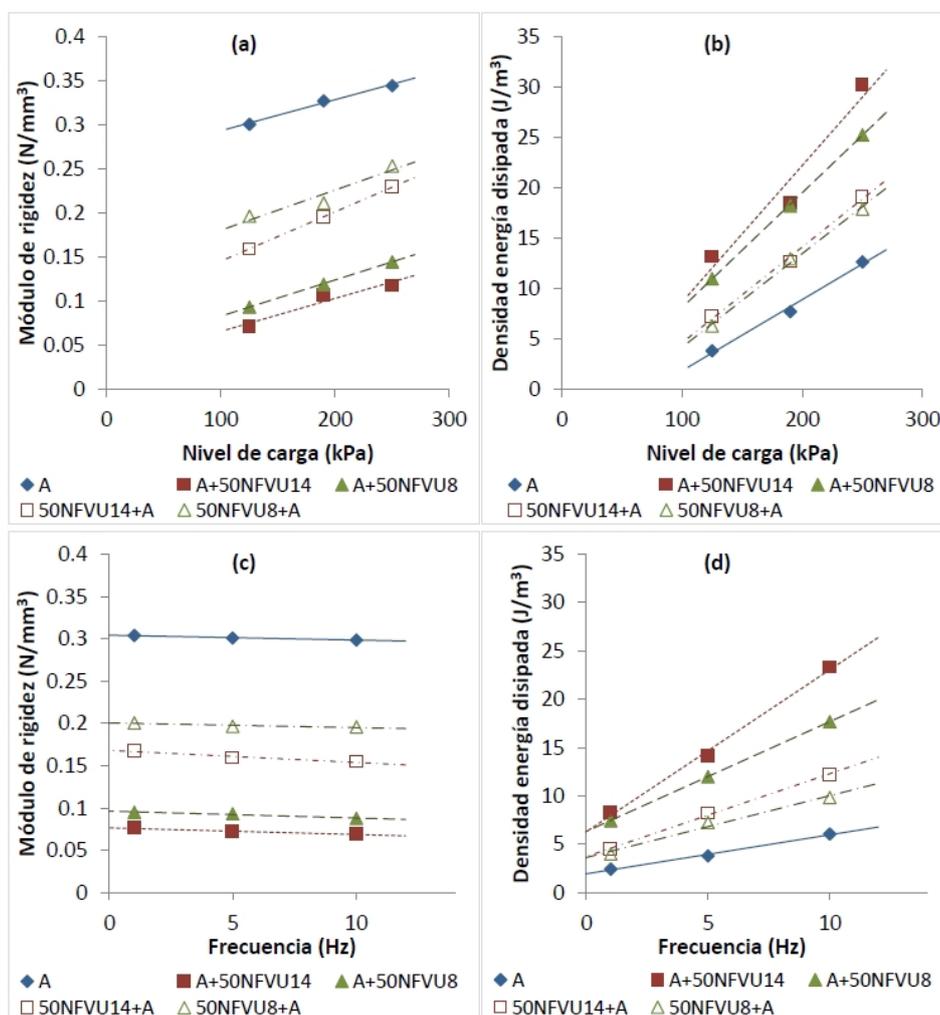


Figura 11: análisis de la influencia de las condiciones de ensayo en la respuesta del conjunto tras diferentes soluciones de mantenimiento de la sección de vía ferroviaria.

3.3. Efecto de la cantidad de caucho de NFVU

Tras los resultados obtenidos en las etapas anteriores, se decidió centrar este estudio en la granulometría NFVU14, la cual resultó ser la más apropiada para su uso como árido flexible. En la figura 12 se presenta el efecto de diferentes cantidades de caucho, 25% y 50% sobre volumen de áridos (A+25NFVU14 y A+50NFVU14), en el comportamiento del conjunto de la vía. Además, se hace una comparación con la utilización de suelas bajo traviesa de distinta flexibilidad (suela blanda y suela rígida).

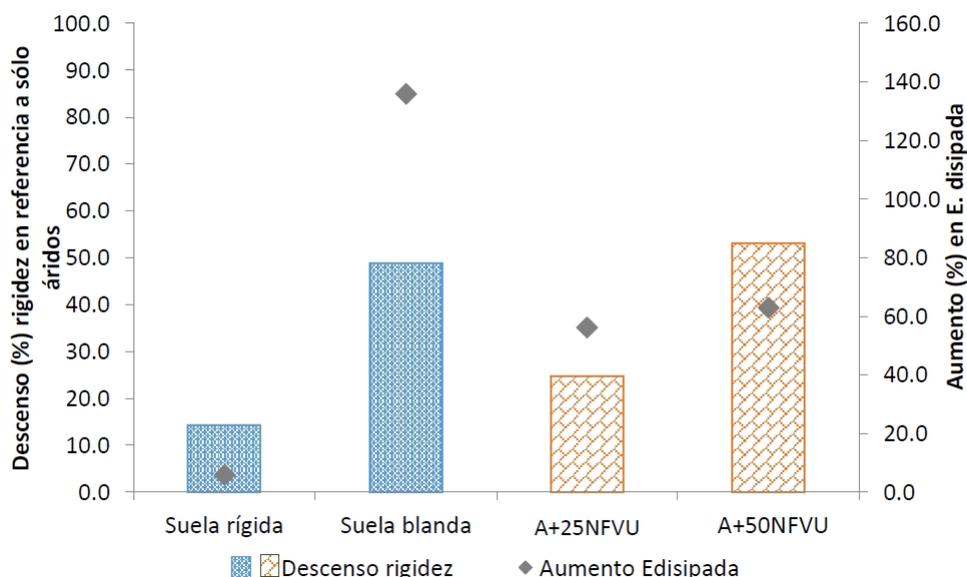


Figura 12: influencia de la cantidad de granulado de caucho de nfvu en el comportamiento de la sección.

En base a los cambios de rigidez y energía disipada, se puede observar que el uso de un 25% de caucho da lugar a un efecto en la rigidez del conjunto del mismo orden al presentado por suelas de tipo rígidas, a la vez que se registraron mayores valores de energía disipada. Por su parte, un 50% de caucho conlleva cambios de rigidez similares a los conseguidos por suelas de tipo blandas, aunque su efecto positivo en el aumento de amortiguamiento fue algo inferior a este último caso. Así, se puede concluir que esta solución permitiría optimizar la respuesta de la vía y modificar gradualmente su comportamiento mediante el uso de distintas cantidades de caucho, lo cual podría ser especialmente interesante en zonas de cambio de transición.

Además, se estudió el módulo de rigidez para la sección de vía con diferentes dotaciones de caucho sobre áridos (0, 25 y 50%, que se representan por A, A+25NFVU14 y A+50NFVU14 respectivamente), a diferentes niveles de tensión (125 y 250 kPa) y diferentes temperaturas (20, 40 y 60 °C). Con respecto a las temperaturas de ensayo, se establecieron los valores anteriores en la superficie de la sección, sin embargo, las medidas realizadas bajo traviesa se correspondieron con aproximadamente 20, 27 y 37 °C, lo que significa que la traviesa protege a las partículas inferiores de los cambios de temperatura. Teniendo en cuenta estas condiciones, en la figura 13 se representa el módulo de rigidez para distintas temperaturas y tensiones.

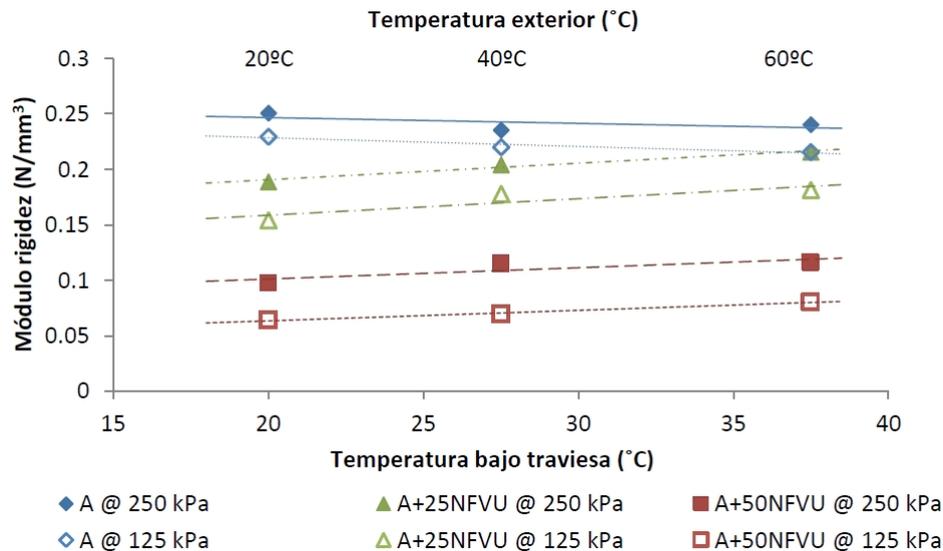


Figura 13: efecto de la temperatura en la rigidez de la sección con distintas dotaciones de caucho de nfvu y a distintos niveles de tensión.

Se observa que, independientemente del nivel de tensión y de la cantidad de caucho, el aumento de temperatura exterior produce una ligera rigidización del sistema asociada a una mayor capacidad de deformación del granulado de caucho al aumentar la temperatura. Así, el propio peso del conjunto traviesa-carril aplica mayor deformación estática del granulado de caucho, disminuyendo su capacidad para aportar flexibilidad a la sección durante las cargas cíclicas, y por tanto, aumentando ligeramente la rigidez global. No obstante, se debe considerar que estas variaciones son menores que las medidas al variar otros parámetros como el nivel de carga, donde pasar de una tensión de 125 a 250 kPa (valores que pueden tener lugar en vías dependiendo de las características de los vehículos) implica cambios del orden del 20% para el caso del 25% de caucho y del 35% para el 50% de caucho, mientras que incrementos de temperatura de 20 a 60 °C provoca una rigidización inferior a 15% – 20%.

Por otro lado, independientemente de la temperatura de ensayo y del nivel de tensión, se puede comprobar (Figura 13) cómo el uso de distintas cantidades de granulado de caucho permite graduar el comportamiento de la vía, llevando a un descenso de la rigidez próxima al 50% al utilizar A+50NFVU14 y próxima al 25% con A+25NFVU14.

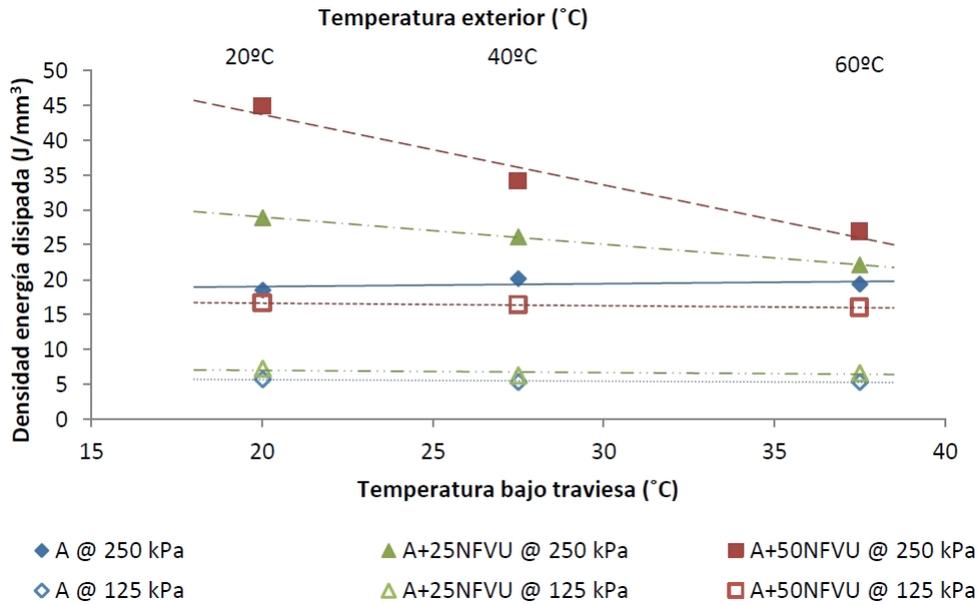


Figura 14: influencia de la temperatura de la sección con granulado de caucho de nfvu en la capacidad para disipar energía.

En cuanto a la capacidad para disipar energía, en la Figura 14 se observa que al aumentar la cantidad de caucho se obtienen mayores valores de amortiguamiento. Sin embargo, se debe tener en cuenta que en el caso del 50% de caucho se experimenta una mayor variación al incrementar la temperatura, ya que da lugar a un notable descenso de los valores de energía disipada, como consecuencia del efecto del peso del conjunto traviesa-carril. En cualquier caso, los valores de energía disipada siguen siendo superiores a los presentados por el sistema convencional utilizando sólo áridos.

4.-Conclusiones

El presente estudio tiene por objetivo analizar la viabilidad técnica del uso de granulado de caucho procedente de NFVU en el proceso de mantenimiento conocido como “Stoneblowing”. La finalidad es crear una capa elástica bajo la traviesa para optimizar el comportamiento mecánico de la estructura ferroviaria, reduciendo además la necesidad de intervenciones de mantenimiento. Para ello, el proyecto se dividió en diferentes etapas con el fin de definir algunos de los principales parámetros de diseño de esta técnica como son el tamaño de partícula del granulado de caucho, su posición en la estructura ferroviaria y la cantidad de granulado a utilizar. En base a los resultados obtenidos en cada una de dichas etapas, pueden extraerse las siguientes conclusiones:

- El uso de caucho de NFVU con granulometría 4 – 14 mm dio lugar a un considerable aumento en la cantidad de partículas percoladas a través de los huecos del balasto, mientras que las granulometrías 8 – 16 mm y 14 – 20 mm resultaron en valores de pérdidas de material del orden, o incluso menores en el caso de 14 – 20 mm, al registrado para el caso de referencia con sólo áridos.
- La disposición del granulado de caucho en una capa superior a la de los áridos habitualmente utilizados, es decir, inyectando primero los áridos y luego el caucho, mostró ser más efectiva para modificar el comportamiento de la sección de la vía, y poder así, optimizar su respuesta dependiendo de las características de la línea ferroviaria y del tráfico, siendo este hecho más acentuado al utilizar el granulado de caucho de mayor tamaño (14 – 20 mm), el cual fue seleccionado para continuar con el resto de etapas del proyecto.
- De igual modo, se pudo comprobar que, a pesar de que en general todas las soluciones con granulado de caucho permitieron disminuir la tendencia al asiento del conjunto, el mayor descenso en la reducción de la susceptibilidad a la deformación se obtuvo al usar el granulado de caucho de 14 – 20 mm dispuesto como una capa elástica sobre los áridos utilizados en el proceso de Stoneblowing.
- Los resultados demostraron que el uso de diferentes cantidades de granulado de caucho permite optimizar el comportamiento del conjunto de la sección, obteniendo un efecto similar al de suelas bajo traviesa rígidas cuando se utiliza un 25% de caucho o blandas con el 50% (sobre el volumen de áridos inyectados).
- Además, se observa que el aumento de temperatura produce una ligera rigidización del sistema cuando se incorpora caucho.
- Por último, se ha demostrado que cuanto mayor es la cantidad de caucho introducida, menor es el módulo de rigidez y mayor la capacidad para disipar energía.

Todos estos resultados plantean tareas futuras complementarias como puede ser la influencia del volumen óptimo de partículas de cada tipo, áridos y granulado de caucho, para diferentes niveles de asiento de toda la estructura ferroviaria, la resistencia lateral de la sección o la aplicación a escala real.

En base a los resultados obtenidos en este proyecto, se puede concluir que la aplicación de granulado de caucho procedente de NFVU como “áridos flexibles” durante el proceso de Stoneblowing se postula como una adecuada alternativa a la utilización de suelas bajo traviesa. El uso de suelas bajo traviesa se limita a tareas de renovación de vía o durante la construcción de nuevas líneas, mientras que el uso de granulado de caucho

de NFVU puede aplicarse durante tareas de mantenimiento habituales, permitiendo así la optimización de la respuesta de la estructura de la vía, a la vez que se mejora la efectividad de la técnica de mantenimiento de Stoneblowing gracias a la reducción de la tendencia al asiento, la tensión en la capa de balasto y el aumento del amortiguamiento de la sección respecto del sistema convencional que utiliza solamente áridos.

Actualmente, en España la extensión de la red ferroviaria es superior a 14.500 km (considerando alta velocidad y convencional), de los cuales entorno al 90% es vía sobre balasto. A nivel internacional hay en torno a 1,4 millones de km de los cuales también un 90% es vía sobre balasto. Las pruebas de laboratorio indican que sería apropiado incorporar unos 600 g de granulado de caucho bajo traviesa, por lo que, teniendo en cuenta que en 1 km de vía hay 1.666 traviesas (espaciadas 60 cm), sería necesario un total de 1 tonelada de granulado de caucho de NFVU. Esta cantidad equivale al reciclado de aproximadamente 225 NFVU de turismo por kilómetro de vía.

Además, a nivel de laboratorio se ha estimado que sería posible extender el periodo entre intervenciones de mantenimiento más de 4 veces con respecto a la solución tradicional de Stoneblowing y de bateo de balasto. En base a esto, sería posible incrementar el periodo entre renovaciones de vía estimado actualmente en 10 – 50 años dependiendo de las características del tráfico y la vía, el cual consume hasta 6.000 m³ de balasto por kilómetro.

Bibliografía

McMichael, P. y McNaughton, A. (2003) The stoneblower – delivering the promise. Development, testing and operation of a new track maintenance system. 82sd Annual Meeting, Transortation Research Board, Washington, U.S.A, CD-ROM

Sol-Sánchez, M.; Moreno-Navarro, F.; Rubio-Gámez, M.C. (2016) Analysis of ballast tamping and Stone-blowing processes on railway track behaviour: the influence of using USPs. Geotechnique, ISSN 0016-8505, DOI: 10.1680/jgeot.15.P.129.

Sol-Sánchez, M.; Moreno-Navarro, F.; Rubio-Gámez, M. C. (2014a) Viability of using end-of-life tire pads as under sleeper pads in railway. Journal of Construction and Building Materials, Vol. 64, pp. 150-165.

Sol-Sánchez, M.; Thom, N.; Moreno-Navarro, F.; Rubio-Gámez, M.C. Airey, G.D. (2014b) A study into the use of crumb rubber in railway ballast. Journal of Construction and Building Materials, Vol. 75, pp. 19-24.

Sol-Sánchez, M.; Moreno-Navarro, F.; Rubio-Gámez, M. C. (2017) An alternative sustainable railway maintenance technique based on the use of rubber particles. Journal of Cleaner Production, Vol. 142, pp. 3850-3858.