

Materiales modificados con el fin de aminorar la génesis y/o propagación de vibraciones y/o ruido en una explotación ferroviaria

Modified materials to mitigate the production and/or propagation of vibrations and/or noise during train passing

Laura Montalbán Domingo

Julia Real Herraiz

Resumen

En el presente artículo se exponen diferentes soluciones para la mitigación de las vibraciones y/o ruido producidos durante las operaciones ferroviarias. Todas estas medidas están basadas en el uso de nuevos materiales modificados que han mostrado su gran capacidad de atenuación de estas externalidades. Entre ellos destaca el uso de material bituminoso modificado con determinados aditivos procedentes de materiales residuales (NFU y plásticos) destinados a la atenuación de la transmisión y propagación de las vibraciones así como el uso de nuevos modificadores de fricción en el contacto rueda-carril cuyo objetivo es atenuar la generación del ruido.

Así pues, con la introducción de estos nuevos materiales en diferentes puntos del diseño de la infraestructura tradicional del ámbito ferroviario para el que han sido diseñados cada uno de ellos, se consigue un aumento de la sostenibilidad y competitividad del sector ferroviario necesario para situar este modo de transporte como uno de los principales en el ámbito urbano.

Palabras clave: Atenuación de vibraciones; nuevos materiales; ferrocarril; nuevos diseños; ruido; ámbito urbano.

Abstract

As a consequence of the train passing, important vibrations and noise appear. This paper presents different new material to attenuate these vibrations and noise. These materials are bituminous mixtures with different additives coming from wastes (NFU and plastics) and a new friction wheel-rail contact modifier material. On one hand, the bituminous mixtures are used to attenuate the vibration transmission and propagation. On the other hand, the friction modifier material is used to mitigate the noise generation.

With the vibration and noise mitigation, railroad transport mode is presented as one of the most competitive and sustainable transport mode in urban area.

keywords: Vibration attenuation; new materials; railroad; new designs; noise; urban area.

1. Introducción y objetivos

El auge y la evolución continuada en la que está inmerso el transporte ferroviario de pasajeros y mercancías, impulsado por su sostenibilidad y competitividad tanto a nivel urbano como interurbano [1], son responsables de que, en la actualidad, el esfuerzo innovador se centre en la búsqueda de nuevos diseños de vías de ferrocarril de altas prestaciones, capaces de permitir el tránsito de vehículos ferroviarios a una mayor velocidad así como material rodante con una carga por eje cada vez más elevada [2]. Esa evolución continuada hacia vías de altas prestaciones debe ir siempre acompañada de la reducción de las externalidades asociadas a este sector de transporte.

En este sentido, las externalidades más importantes del sector ferroviario en el ámbito urbano son las vibraciones y el ruido producidos durante las operaciones del material rodante. La fuerza generada en el contacto rueda-carril, debida a la propia carga así como a la existencia de singularidades tales como cambios de rigidez o posibles defectos de vía, ocasiona la generación de vibraciones mecánicas, tanto en la rueda como en el carril. Estas vibraciones mecánicas, pueden ser transmitidas a través del paquete de vía o transformadas en ruido, que a su vez se propaga por el medio. Ambos fenómenos son considerados como uno de los mayores problemas en el sector ferroviario, ya que, por una parte, generan elevadas necesidades de mantenimiento en la infraestructura y, por otra, importantes afecciones estructurales y sociales en zonas urbanas [3, 4].

A lo largo de las últimas décadas, estas consideraciones han sido el pretexto de desarrollo de numerosas investigaciones [5, 6, 7, 8] enfocadas a la obtención de soluciones que atenúen los efectos perjudiciales de las vibraciones mecánicas producidas por el ferrocarril, considerando las que se propagan tanto por el terreno (vibraciones) como por el aire (ruido). Así pues, teniendo en cuenta las conclusiones aportadas por las investigaciones previas consultadas, el presente estudio pretende mostrar los desarrollos llevados a cabo relativos a la definición de nuevos materiales destinados a mitigar las vibraciones y/o el ruido ferroviario, por medio de la actuación directa sobre la vía o sobre el contacto rueda-carril ya que, sólo actuando sobre el foco emisor y/o sobre la transmisión y propagación será posible conseguir la mitigación de las vibraciones y el ruido, y por lo tanto, el incremento en sostenibilidad que necesita el sector ferroviario para ser uno de los modos de transporte más competitivo en el ámbito urbano.

Con esta finalidad, se desarrollan los proyectos de investigación I+D+i “Subbalasto bituminoso con NFU”, “BITUTRAN” y “OVER RAIL”, cuyo objetivo principal es la obtención de nuevos materiales con características técnicas mejoradas y elevada capacidad atenuadora de vibraciones y/o ruido de rodadura.

Además de este objetivo principal, debe tenerse en cuenta que en algunos de estos proyectos se han utilizado aditivos procedentes de residuos, con el fin de buscar, a partir del uso de materia prima barata, las características deseadas en los nuevos materiales desarrollados. De esta forma, se consigue obtener un material respetuoso con el medio ambiente que a su vez presenta unas altas características técnicas.

En este contexto, el artículo ofrece una visión general del problema derivado de las vibraciones y ruido asociados a las operaciones del ferrocarril, así como el estado actual del conocimiento sobre las soluciones propuestas para la mitigación de las mismas. Tras ello, se presentan los proyectos antes mencionados así como los nuevos materiales obtenidos en cada uno de ellos.

2. Estado del conocimiento actual

Los efectos derivados de la generación de vibraciones mecánicas son un problema presente en las redes ferroviarias, siendo el ruido y las vibraciones dos de las principales externalidades que se producen cuando la infraestructura ferroviaria se encuentra en ámbito urbano [1].

Las vibraciones mecánicas tienen su origen en la fuerza de contacto rueda-carril que se produce al paso del material rodante (Figura 1). En función de la velocidad de circulación, la carga por eje y las características de los defectos presentes en la rueda y/o carril, las vibraciones mecánicas producidas tendrán una frecuencia y amplitud determinada. Por otra parte, dependiendo del medio por el cual se propaguen reciben un nombre distinto: si éstas se transmiten por medio del paquete de vía hacia el terreno, reciben el nombre genérico de *vibraciones*, mientras que si su medio de propagación es el aire, se las designa como *ruido* [4, 5, 6].

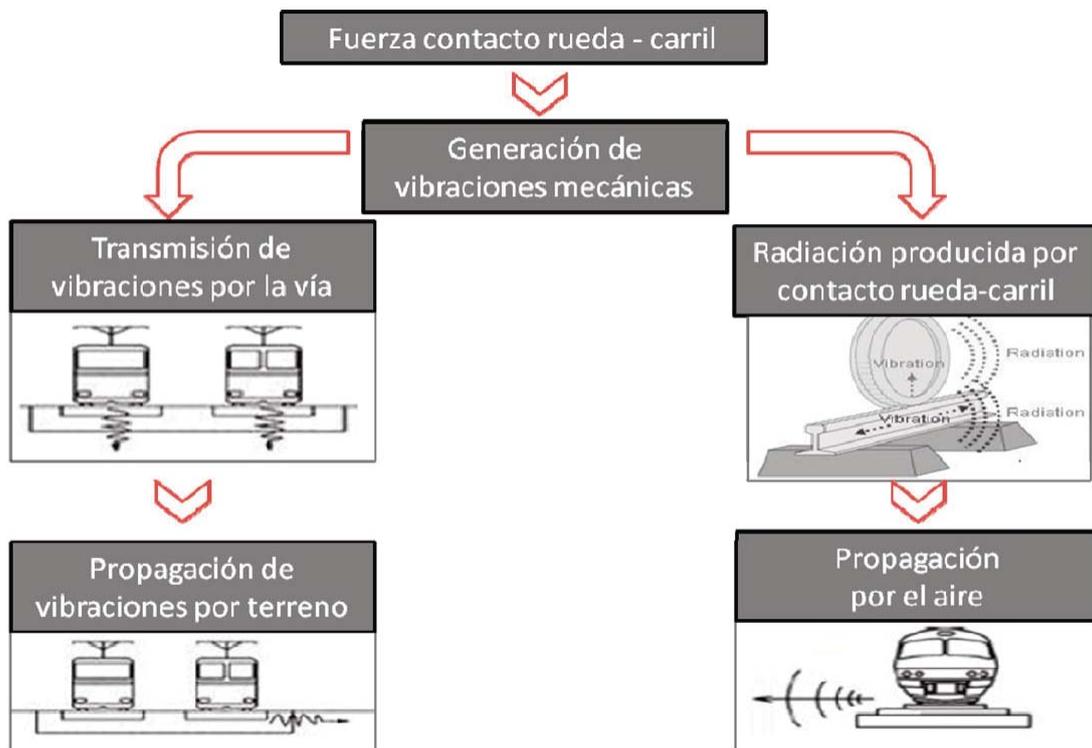


Figura 1 Esquema generación, transmisión y propagación de las vibraciones mecánicas debidas a la circulación ferroviaria.

En los últimos años, los investigadores del sector ferroviario han llevado a cabo numerosos estudios orientados a la mitigación de las vibraciones, centrándose en la obtención y diseño de medidas atenuadoras aplicadas tanto en la fuente de vibración como en el medio de transmisión y/o de propagación [6, 7, 8]. Como ejemplo de estas medidas de atenuación de vibraciones pueden destacarse:

- Mayor mantenimiento de ruedas y carriles.
- Ejecución de vías en placa flotantes.
- Empleo de subbalasto bituminoso.
- Construcción de zanjas de atenuación de propagación de vibraciones.
- Disposición de barreras acústicas.

Atendiendo a la atenuación del ruido de rodadura, también existen algunas medidas destinadas a la reducción del mismo aplicadas sobre el contacto rueda-carril [6, 9]; como son:

- El uso de ruedas elásticas.
- Amolado frecuente de los carriles.
- Uso de lubricantes como grasas y aceites aplicados sobre el carril.

3. Soluciones propuestas

En el ámbito de estudio del presente artículo se proponen distintas soluciones, para ámbitos concretos de explotación, basadas en la implantación de nuevos materiales en diferentes puntos del diseño de vía tradicional con el objetivo de disminuir las vibraciones y/o el ruido producidos por el paso repetido de los vehículos ferroviarios actuando sobre el máximo rango de frecuencias posible, de forma que se convierta en un modo de transporte más competitivo a la vez que sostenible.

De esta forma, los proyectos de investigación de I+D+i “Subbalasto bituminoso con NFU” y “BITUTRAN” buscan el desarrollo de soluciones que actúen mitigando las vibraciones transmitidas y propagadas a través del paquete de vía y “OVER-RAIL” busca el desarrollo de un nuevo modificador de la fricción de modo que, actuando en el contacto rueda-carril, se disminuya la generación del ruido de rodadura.

A continuación, se detalla cada uno de los objetivos perseguidos en cada uno de los proyectos, así como el estudio realizado y la solución final propuesta para el fin perseguido.

3.1. Proyecto Subbalasto Bituminoso con NFU

Objetivo

El proyecto SUBBALASTO BITUMINOSO CON NFU, financiado por el CDTI y desarrollado por las empresas OCIDE, AMINSA, AGLOMERADOS LOS SERRANOS, INTERCONTROL y la UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA, como ente subcontratado, nació con la intención de buscar una alternativa sostenible y económicamente competitiva al subbalasto granular.

Estudio

El subbalasto granular es una capa formada por material granular, procedente de canteras acreditadas, encargada de reducir las tensiones que llegan a la plataforma ferroviaria debido a la carga transmitida por el tráfico ferroviario. Además de esta función fundamental, el subbalasto granular también ha de ofrecer protección frente a las heladas, drenar el agua así como realizar función de filtro para evitar la migración de finos desde la plataforma a la capa de balasto.

Teniendo en cuenta tanto las funciones que debía de satisfacer como las limitaciones que debía superar, en el proyecto se llevó a cabo un estudio exhaustivo de los posibles materiales susceptibles de sustituir esta capa granular. De entre todas las alternativas estudiadas y caracterizadas en laboratorio se concluyó que la mejor opción era una mezcla bituminosa diseñada específicamente para el ámbito ferroviario y en cuya dosificación se incorporó un determinado porcentaje de neumático fuera de uso (NFU) por vía seca.

Obtenido el material a emplear, se realizó un estudio para la obtención del espesor óptimo. Con esta finalidad, se comparó el estado tenso-deformacional obtenido a partir de un análisis numérico para diferentes espesores, seleccionando como óptimo aquel que presenta unos asientos y tensiones en distintas

capas del paquete de vía similares a los obtenidos con el subbalasto granular. Finalmente, se comprobó la resistencia de la solución obtenida frente a fatiga garantizando que la solución seleccionada no presenta problemas de durabilidad frente al tráfico para el que fue diseñada.

Solución

La solución finalmente propuesta por el proyecto subbalasto fue la ejecución de una capa de 9 cm de espesor formada por mezcla bituminosa caliente con NFU por vía seca, de forma que ésta hiciera las funciones de subbalasto [10]. Como ejemplo, se dispone a continuación la Figura 2, en la que se puede observar la ejecución del nuevo subbalasto bituminoso.



Figura 2 Colocación en obra del nuevo subbalasto bituminoso.

Esta nueva mezcla bituminosa presentó un coste más elevado que el subbalasto granular, debido principalmente al elevado coste del ligante bituminoso. Como estimación inicial a fin de concretar más el precio final de comercialización del nuevo material, se estimó que el material extendido presenta un coste 5 veces mayor que el subbalasto granular, siendo el coste de ejecución de una vía doble 1.5 veces el de un subbalasto granular. Finalmente, teniendo en cuenta tanto el coste de ejecución de una vía doble como el coste de transporte, se estimó que el coste de la nueva solución podía ser igual o incluso menor que el ofrecido por la solución del subbalasto granular cuando las distancias de transporte sean superiores a 60 km.

Por otra parte, se descubrió en laboratorio que, debido a la incorporación de este nuevo material a la mezcla bituminosa, se conseguía un incremento de la visco-elasticidad de la mezcla y, por lo tanto, una mejora de la capacidad atenuadora de vibraciones a la vez que se garantizan las exigencias tenso-deformacionales que se le exigen a esta capa.

De esta forma, se consideró que el subbalasto bituminoso con NFU obtenido es una importante solución para la sustitución del subbalasto granular en el diseño de la vía tradicional debido a que con un precio de ejecución similar se obtenía:

Importante reducción de las vibraciones transmitidas por el paquete de vía (Figura 1) mitigando su propagación por el terreno (Figura 3). De este modo, se consiguió disminuir las afecciones sociales y daños a estructuras colindantes en el ámbito urbano al mismo tiempo que se aumentó la vida útil de la infraestructura, con el consiguiente beneficio y reducción de los costes de mantenimiento.

Dado que el espesor del nuevo subbalasto era 2/3 menor que el del subbalasto granular, se necesitó menor cantidad de material y por lo tanto, se produjo un importante beneficio medioambiental.

Valor añadido de la reutilización y revalorización de residuos, en este caso, del polvo de caucho procedente de los neumáticos fuera de uso (NFU).

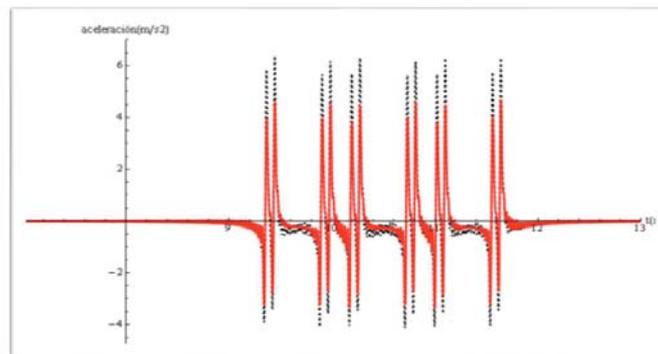


Figura 3 Atenuación de vibraciones conseguida con el nuevo subbalasto bituminoso. En negro vibraciones producidas considerando vía con subbalasto granular y en rojo el caso de subbalasto bituminoso.

3.2. Proyecto BITUTRAN

Objetivo

El objetivo principal del proyecto “BITUTRAN”, financiado por el CDTI, fue el desarrollo de un nuevo concepto de vía en placa para ámbito ferroviario con una elevada capacidad atenuadora de vibraciones. Para ello, el nuevo concepto de vía en placa se diseñó íntegramente con un nuevo material que fuera capaz de sustituir al hormigón de la vía en placa tradicional. De este modo, con la variación del material base a emplear, se obtuvo una importante atenuación de la transmisión de las vibraciones en el paquete de vía con las condiciones de seguridad suficientes para garantizar un correcto funcionamiento estructural de la misma.

Estudio

Las entidades participantes en el proyecto (AGLOMERADOS LOS SERRANOS, PROVER, LAENSA y la UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA, como ente subcontratado), realizaron un completo estudio de caracterización de una amplia gama de materiales susceptibles de ser empleados para el fin propuesto, de forma que de ellos se seleccionó aquel con unas características óptimas tanto para garantizar un buen comportamiento tenso-deformacional de la vía en placa como una elevada capacidad de atenuación de las vibraciones. En este sentido, se propuso una mezcla bituminosa con aditivos capaz de proporcionar

a la vía una capacidad portante suficiente para garantizar el buen comportamiento estructural de la misma y, al mismo tiempo, capaz de obtener una elevada atenuación de los rangos de frecuencias vibratorias características del ámbito tranviario.

Al igual que para la selección del material a emplear, se realizó también un completo estudio de los aditivos disponibles para obtener las características técnicas buscadas. En este caso concreto, se seleccionó un tipo concreto de plastómero por dos motivos esenciales:

Obtener un elevado ángulo de fase para obtener un factor de amortiguamiento óptimo y por lo tanto, aumentar de forma considerable la capacidad de atenuar las vibraciones de la misma.

Mejorar el valor del módulo complejo ofrecido por la mezcla bituminosa y por lo tanto, un comportamiento tenso-deformacional de la vía en placa bituminosa que garantice la seguridad durante las operaciones ferroviarias.

Una vez realizada la selección tanto del material como del aditivo a emplear para conseguir el fin propuesto, se realizó una extensa campaña experimental considerando dos tipos de mezclas bituminosas, mezclas tipo hormigón bituminoso y mezclas tipo Stone Mastic Asphalt (SMA), con distintos porcentajes de plastómeros reciclados cada una de ellas.

Finalmente, a partir de la caracterización física y mecánica de cada una de las mezclas analizadas, se seleccionó como material a utilizar para la ejecución de la vía en placa bituminosa aquel que, con un coste más económico, presentó la máxima atenuación de las vibraciones junto con un comportamiento tenso-deformacional óptimo.

Solución

La solución fue una mezcla bituminosa a la que se le añadió plastómeros por vía seca, de forma que ésta sustituyera al hormigón en el nuevo concepto de vía en placa formada íntegramente por mezcla bituminosa [11, 12]. En la Figura 4 puede verse la nueva vía en placa bituminosa diseñada, la cual, gracias a la colaboración de FGV y EIGE, fue probada en un tramo de vía real de la red tranviaria de Alicante, entre un tramo de vía en placa de hormigón con adoquinado y un tramo de vía en balasto. Gracias a las pruebas realizadas in situ se pudo comprobar el óptimo comportamiento tanto estructural como vibratorio.



Figura 4 Ejemplo banco de pruebas proyecto Bitutran.

Como evaluación económica de la solución obtenida, se compara el coste económico de esta solución con la tradicional losa de hormigón, losa de hormigón con manta en la parte inferior o bien losa de hormigón con adoquín y manta (Tabla 1).

Tabla 1 Valoración económica solución propuesta en comparación con otras vías en placa.

€/m LOSA HORMIGÓN	100
€/m LOSA HORMIGÓN CON MANTA	143
€/m HORMIGÓN CON ADOQUÍN CON MANTA	168
€/m BITUTRAN	144

De esta valoración económica, se deduce que la solución propuesta presenta un coste más elevado que la solución de vía en placa de hormigón tradicional; no obstante, su coste es inferior o igual al que se obtiene cuando se coloca cualquier sistema actual de atenuación de vibraciones en vías en placa. De esta forma, considerando su coste junto con la elevada capacidad de atenuación de vibraciones que presenta la solución propuesta y el valor añadido de la misma al revalorizar los residuos, se tiene que la vía en placa bituminosa es la solución más competitiva a implantar en aquellos puntos de la red tranviaria donde se requiere un sistema de atenuación de las vibraciones.

Así pues, con esta nueva solución se obtuvo la mitigación de las vibraciones transmitidas y propagadas con una frecuencia de onda entre los 2 y los 80 Hz que son las que principalmente afectan al ser humano, obteniendo una reducción importante de las vibraciones transmitidas. Como ejemplo, según los modelos numéricos, se calculó una reducción de las aceleraciones verticales positivas del 42% y una reducción del 47% en las aceleraciones verticales negativas para el caso de una vía en placa bituminosa en comparación con una vía en placa de hormigón tradicional. En cuanto a los ensayos desarrollados in situ en el banco de pruebas, se obtuvo una reducción del 20% en los tiempos empleados en la disipación de las aceleraciones producidas, de la nueva vía en placa bituminosa respecto de la vía en placa de hormigón.

3.3. Proyecto OVER RAIL

Objetivo

La reducción del ruido de rodadura producido por la circulación ferroviaria debido a la rigidez existente en el contacto rueda-carril ha motivado la participación de KRYPTON CHEMICAL, TECSA, ADIF, AIDICO y la UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA en el desarrollo del proyecto Over-Rail, financiado por el MINECO, cuyo objetivo está siendo la obtención de un nuevo producto capaz de minimizar el ruido de rodadura gracias a la búsqueda del coeficiente de fricción óptimo en el contacto rueda-carril.

Estudio

Para llevar a cabo el desarrollo del mencionado producto, se realizó una profunda investigación del mecanismo de generación del ruido de rodadura para poder obtener la caracterización del mismo, así como de los materiales susceptibles de ser utilizados para su paliación.

En lo que se refiere a los mecanismos de generación de ruido, debe distinguirse entre dos fenómenos. Por un lado, el denominado rolling noise es el que se produce predominantemente en recta, debido a la rugosidad y a las imperfecciones en el contacto rueda carril. Por otro lado, el denominado squealing noise (o chirrido) se produce en curvas, y se debe al deslizamiento de la rueda sobre el carril. Por lo tanto, la actuación sobre la superficie del carril de forma que se reduzcan las imperfecciones en recta y se regule el coeficiente de fricción en curva, constituye la solución para la mitigación del ruido de rodadura en la propia fuente y para ello debe buscarse el material más adecuado capaz de cumplir estos objetivos, entre otros.

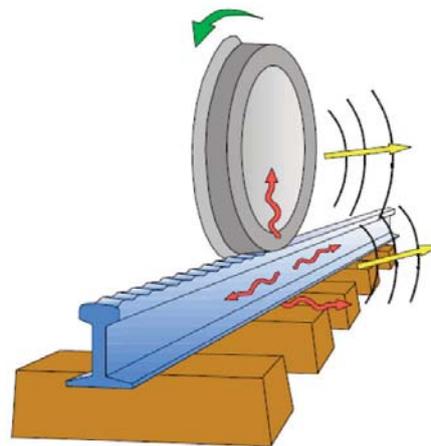


Figura 5 *Generación y radiación del ruido debido al contacto rueda-carril.*

Así pues, de todos los materiales estudiados, se está seleccionando para el diseño del material aquel que admita unas tensiones normales y tangenciales adecuadas para la elevada fuerza de contacto rueda-carril así como una buena resistencia a los cambios de temperatura. Por otra parte, el material seleccionado debe cumplir con las exigencias químicas particulares de modo que se obtenga un material resistente a UV, a aceites, grasas, agua y fuego, manteniendo la característica básica de conducción de electricidad, para permitir el cierre del circuito de vía. Otras variables tenidas en cuenta serán la velocidad de aplicación y secado del material, de forma que éste pueda ser dispuesto sobre los carriles con un sistema mecánico móvil.

Solución

La solución del proyecto Over-Rail será un innovador producto que garantice un óptimo comportamiento frente a las acciones mecánicas, químicas y eléctricas, al mismo tiempo que, aplicando el producto sobre la banda de rodadura, consiga regular la fricción, dentro de los límites de seguridad, en el contacto rueda-carril. De esta manera, se conseguirá una disminución de las vibraciones mecánicas producidas durante las operaciones ferroviarias y, por lo tanto, la emisión acústica asociada.

Además de la innovación obtenida con este nuevo material, se conseguirá una serie de ventajas adicionales respecto de las soluciones que se han utilizado, hasta hoy, para disminuir el ruido producido durante las operaciones ferroviarias. Así pues, se destacan las siguientes ventajas que se pretende que la nueva solución satisfaga:

- Aplicación y efecto directo sobre el foco generador de ruido.
- Fácil aplicación mediante el uso de sistemas flexibles y transportables.

- Renovación del material en línea de forma sencilla, lo que se traduce en mayor durabilidad.
- Posibilidad de colocación en tramos de carril conflictivos, ya construidos, con sencillas operaciones y aportando condiciones óptimas para una rodadura segura.
- Coste económico más reducido que el derivado de la aplicación de otras medidas atenuadoras del ruido como puede ser el caso del amolado frecuente de carriles.
- Beneficio medioambiental al utilizar productos no contaminantes como en el caso de las grasas o aceites.

4. Conclusión

En este artículo se ha presentado el fenómeno físico de las vibraciones mecánicas producidas durante las operaciones ferroviarias debidas a la fuerzas generadas en el contacto rueda-carril. Estas vibraciones mecánicas son transformadas en las principales externalidades del ferrocarril: vibraciones y ruido, los cuales han sido analizados atendiendo tanto a su generación como a su transmisión y propagación.

Estudiada la mayor externalidad del transporte ferroviario en el ámbito urbano, se ha realizado el estudio del estado del conocimiento actual en dicho ámbito analizando las diferentes soluciones existentes hoy en día para la atenuación de las vibraciones y ruido.

Una vez presentado el estado actual del conocimiento, se describen los proyectos de I+D+i desarrollados con el objetivo de obtener nuevos materiales capaces de mitigar la generación del ruido y/o la transmisión y propagación de las vibraciones cuando éstos son aplicados en distintos puntos del diseño de vía tradicional del ámbito ferroviario para el que han sido diseñados.

Como conclusión final, se tiene que tanto las vibraciones como el ruido generado durante el paso del material rodante en las líneas de ferrocarril, pueden ser disminuidos mediante la adopción de diferentes medidas, aplicadas durante la construcción o explotación de la línea, que pueden ir destinadas a atenuar la generación del ruido o la transmisión y propagación de las vibraciones. En el caso concreto de este artículo, se propone una solución innovadora en cada uno de los proyectos de I+D+i analizados de forma que; la solución Over-Rail actúe en el foco emisor, mientras que los nuevos materiales propuestos en Subbalasto y Bitutran actúen sobre la transmisión y/o propagación de las vibraciones a través del paquete de vía.

De esta forma, mediante la aplicación de cada una de estas soluciones en su ámbito ferroviario de diseño, se conseguirá que este modo de transporte se posicione como uno de los más sostenibles y competitivos dentro del ámbito urbano.

Agradecimientos

Los autores del artículo desean agradecer la financiación recibida por parte del Ministerio de Economía y Competitividad del Gobierno de España así como del Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI) sin la cual no se hubieran podido desarrollar los proyectos de investigación I+D+i descritos en el presente artículo.

Referencias

- [1] Puig, V., Ramos, M., Real, J et al. “Estudio del comportamiento vibratorio de diferentes tipologías de vía en ámbito urbano en la línea 4 del tranvía de Alicante”. *Vía Libre*.
- [2] Gallego I. (2006) “Heterogeneidad resistente de las vías de alta velocidad: transición terraplén-estructura”. Tesis. Universidad de Castilla-La Mancha.
- [3] Pallas, M.A., Lelong, J., and Chatagnon, R. (2011) “Characterization of tram noise emission and contribution of the noise source”. *Applied Acoustics*, Vol. 72, No.7, pp. 437-450.
- [4] Esveld, C. (2001). *Modern Railway Track*. MRT-Productions. Delft. The Netherlands.
- [5] Real, J., Martinez, P., Montalbán, L., and Villanueva, A. (2011). “Modelling vibrations caused by tram movement on slab track line”. *Mathematical and computer modeling*, Vol. 54, No. 1-2, pp. 280-291.
- [6] Lakusic, S., and Ahac, M. (2012). “Rail traffic noise and vibration mitigation measures in urban areas”. *Tehnicki vjesnik-technical gazette*, Vol. 19, No. 2, pp. 427-435
- [7] Li, YL., Ou, YJ., Tan, YQ., and Lu, MY. (2012). “Dynamic Characteristics of Rubber Powder Modified Cement Asphalt Mortar”. *Advances in intelligent transportation system and technology. Advances Engineering Forum*. Vol. 5, pp. 243-246.
- [8] Real, J.I., Zamorano, C., Hernández, C., and Ribes, F. (2014). “Wave barriers for the reduction of railway induced vibrations. Analysis in tracks with geometric restrictions” *Journal of Vibroengineering*. Vol. 16. pp. 2821-2833.
- [9] EPA. (2013) “Rail infrastructure noise guideline”. Environmental Protection Authority. Sydney.
- [10] PCT/ES2011/070351. Material bituminoso y su uso para la construcción de subbalasto.
- [11] ES 2 403 354 B1. Composición bituminosa y su utilización para reducir las vibraciones y el ruido.
- [12] Real, T., Zamorano, C., Hernández, C. et al. (2015) “Optimized design of an asphalt mixture railway track for vibration attenuation”. *Journal of vibroengineering*. Vol. 17. No. 1. Pp. 431-443.