

**PROYECTO RECYTRACK: ELASTOMERIC ECO-FRIENDLY MATERIAL
BASED ON END-OF-LIFE TYRES BLENDED WITH ORGANIC BIND RESIN
FOR RAILWAY APPLICATIONS**

REF. PACS: 43.40.Tm

Autores: Cardona, Joan¹; Arcos, Robert²; Torres, Rafael¹, Subirà, Ada¹

¹ AV Ingenieros, c/ Abat Marçet, 41 baixos. 08173 St. Cugat del Vallés (Barcelona).
Telf: +34 936743191. e-mail: jcg@avingenieros.com

² Laboratorio de Ingeniería Acústica y Mecánica, Universidad Politécnica de Catalunya, LEAM-UPC. c/ Colom, 11. 08222 Terrassa (Barcelona). Telf: +34 937398146.

ABSTRACT

RECYTRACK is a 3.5 year project granted by the European Commission through LIFE+ 2010 program. The overall objective of the project is to demonstrate the environmental benefits and technical and economic feasibility of the implementation of an elastomeric eco-friendly material made of end-of-life tires with resin for railway applications.

Within the consortium, AV Ingenieros jointly with LEAM, carries out the study of the vibration behaviour of the eco-friendly material, which will be applied as a mat for ballasted tracks as well as an isolated block system for slab tracks. In the present article the elastomeric product's vibration design as well as the elastomeric material's high frequency characterization is explained.

RESUMEN

RECYTRACK es un proyecto de investigación subvencionado por la Comisión Europea a través de la convocatoria LIFE+ 2010 cuyo objetivo es demostrar los beneficios medioambientales y técnicos de la implementación de un material elastomérico respetuoso con el medio ambiente desarrollado a partir de neumáticos fuera de uso mezclados con resina para aplicaciones ferroviarias.

AV Ingenieros, junto con el LEAM, lleva a cabo el estudio del comportamiento vibratorio de dicho material, que será aplicado en forma de manta bajo balasto y tacos aislados para superestructura en losa de hormigón. En este artículo se presenta el diseño vibratorio de los productos elastoméricos, realizado mediante un modelo analítico, así como la caracterización del material en laboratorio a alta frecuencia.

1.- INTRODUCCIÓN Y OBJETO

En la actualidad existen grandes acumulaciones de neumáticos fuera de uso en vertederos no controlados, lo que genera un elevado impacto ambiental. Según la Asociación Europea de fabricantes de Neumáticos y Caucho (European Tyre&Rubber manufacturers' Association), ETRMA, en el año 2007 en Europa se generaron más de 3,4 millones de toneladas de

neumáticos usados o fuera de uso, NFU, correspondientes a unos 300 millones de unidades [1].

Por otro lado, la nueva directiva 2008/98/EC sobre residuos [2] establece que los productos derivados de los neumáticos fuera de uso no se consideraran como un residuo si no como un recurso y un material secundario para nuevas aplicaciones. En este sentido, el proyecto RECYTRACK ya aplica esta orientación y desarrolla un nuevo producto a partir de soluciones técnicas que permiten el reciclado de este residuo, que tanto a nivel nacional como a nivel europeo crece día a día.

El objetivo del proyecto es demostrar la viabilidad técnica y económica de la utilización de un material elastomérico respetuoso con el medio ambiente compuesto por una mezcla de neumáticos fuera de uso y resina, para la reducción de las vibraciones generadas por la explotación comercial de infraestructuras ferroviarias. Se estima que el desarrollo de estos productos revalorizará un mínimo de 1,5 millones de neumático fuera de uso en los próximos 10 años, lo que revertirá en un ahorro previsto de más de 5,8 M€.

Este artículo presenta el diseño vibratorio de las soluciones elastoméricas desarrolladas.

2.- PRODUCTOS ELASTOMÉRICOS DESARROLLADOS

Los dos productos elastoméricos desarrollados en el proyecto son la manta bajo balasto y los bloques aislados para superestructura a base de losa de hormigón.

Por un lado, la manta bajo balasto consistente en un elemento continuo introducido bajo la capa de balasto que permite una disminución de los costes de mantenimiento de la vía debido a su aporte de elasticidad y que, paralelamente, actúa como un elemento disipador de la energía vibratoria generada en el contacto rueda-carril.

Por otro lado, los bloques elastoméricos aislados son elementos discretos que se colocan entre un bloque hormigón que hace las funciones de traviesa y la losa de hormigón que sustituye al balasto. La Figura 2.1 muestra un ejemplo de los dos productos comentados. Con esta solución se dota a la superestructura de un nuevo nivel de elasticidad, esta vez emplazado entre el elemento bloque y la losa de hormigón, por lo que los bloques pueden trabajar como si estuvieran articulados. Esta elasticidad proporciona una absorción de energía que, por tanto, se traduce en una atenuación de las vibraciones transmitidas a la losa de hormigón y, consecuentemente, al terreno adyacente, ya que la losa de hormigón no tiene la capacidad atenuadora que sí tiene el balasto.

La innovación de estos nuevos productos radica en la revalorización de un residuo como son los NFU para convertirlo en un elemento que aporta elasticidad a la vía de ferrocarril, con todos los beneficios que ello conlleva, además de aportar resistencia al envejecimiento, aspecto importante en los elementos a colocar debajo de la superestructura ferroviaria ya que su sustitución es costosa. Los dos productos están formados por mezclas homogéneas a presión de NFU triturados a la granulometría adecuada y unidos por una resina polimérica y aditivos que mejoran el comportamiento del producto.

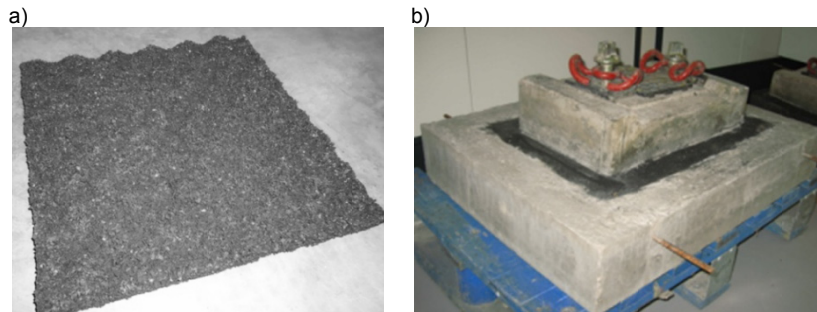


Figura 2.1. a) Vista de la cara ahuecada de la manta elastomérica y b) Vista del bloque elastomérico aislado a utilizar en superestructuras con losa de hormigón.

3.- DISEÑO VIBRATORIO DE LAS SOLUCIONES ELASTOMÉRICAS

La generación de vibraciones en infraestructuras ferroviarias es debida a las cargas generadas en el contacto rueda-carril. La excitación que generan dichas cargas se puede clasificar en dos tipologías [3]: excitación quasi-estática, debida a las componentes estáticas de las cargas de los ejes cuando se desplazan a lo largo de la vía, y la excitación dinámica, debida a la variación espacial de la rigidez del soporte a medida que el tren avanza así como a la rugosidad de rueda y carril. El modelo de superestructura tiene en cuenta estas dos tipologías de excitación para poder determinar los niveles de vibración en el terreno adyacente a la vía.

3.1.- Modelo predictivo de superestructura

La superestructura se modela mediante un modelo de 2 capas soportado de forma continua, donde el carril se considera como una viga de Euler-Bernoulli [4], el acoplamiento dinámico entre carriles no se considera porque las traviesas se consideran completamente rígidas, y la fuerza de contacto entre traviesas y terreno se considera como una función continua en la dirección longitudinal del carril mientras que se considera como una función rectangular en la dirección transversal al carril. La Figura 3.1 representa el modelo de superestructura considerado, donde z_r , z_s y z_g representan los desplazamientos del carril, traviesas y sustrato, respectivamente, k_f , k_b y k_{bm} son las rigideces de las fijaciones, el balasto y de la manta bajo balasto, c_f , c_b y c_{bm} son los amortiguamientos viscosos de las fijaciones, el balasto y de la manta bajo balasto, y m_b es la masa del balasto. Las rigideces, el amortiguamiento y la masa de las traviesas son parámetros distribuidos a lo largo de la vía.

La expresión que gobierna el desplazamiento vertical del carril, z_r , debido a la propagación de las ondas de flexión en él es [5]:

$$EI \frac{\partial^4 z_r}{\partial x^4} + \rho S \frac{\partial^2 z_r}{\partial t^2} + f(x, t) = q(x, t) \quad (1)$$

Donde E es el módulo de Young, I es el segundo momento de área, ρ es la densidad del carril, S es la sección, $f(x, t)$ representa la fuerza distribuida debido a las traviesas y $q(x, t)$ representa la fuerza distribuida debida al tren. Como se puede deducir de la ecuación (1), la fuerza distribuida debido a las traviesas se puede describir mediante la ecuación (2) mientras que la ecuación del movimiento de las traviesas se define según la ecuación (3)

$$f(x, t) = k_F(z_r - z_s) + c_F(\dot{z}_r - \dot{z}_s) \quad (2)$$

$$k_F(z_r - z_s) + c_F(\dot{z}_r - \dot{z}_s) - k_B(z_s - z_g) - c_B(\dot{z}_s - \dot{z}_g) = m_s \ddot{z}_s \quad (3)$$

donde m_s es la masa de la traviesa. Las traviesas ejercen una fuerza sobre el terreno, llamada fuerza de acoplamiento superestructura-terreno, que viene dada por la expresión (4):

$$f_g(x, t) = k_B(z_s - z_g) + c_B(\dot{z}_s - \dot{z}_g) \quad (4)$$

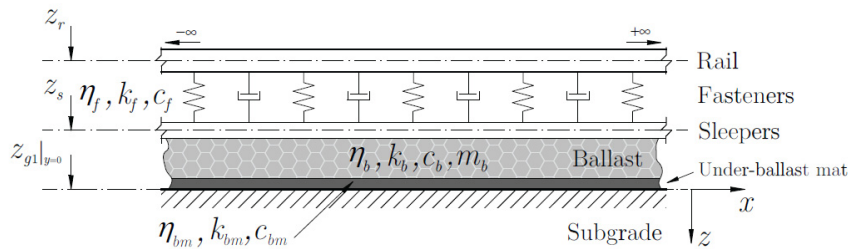


Figura 3.1. Esquema del modelo de superestructura considerado.

Finalmente, el terreno se modela como un semi-espacio homogéneo y viscoelástico definido por las constantes de Lamé, λ y μ , la densidad ρ , el amortiguamiento de las ondas P, D_P , y el de las ondas S, D_S . Tal como demostraron Metrikine y Dieterman [6], la expresión que gobierna el desplazamiento del semi-espacio, según esquema de la Figura 3.2, es:

$$\begin{aligned} (\bar{X}_g, Y_g, Z_g) = & (-ik_{x'} - ik_{y'} - v)Ae^{-vz} + \left(-\frac{k_x k_y}{v'}, \frac{k_x^2 - v'^2}{v'}, ik_y \right) B e^{-v'z} \\ & + \left(-\frac{k_y^2 - v'^2}{v'}, \frac{k_x k_y}{v'}, -ik_x \right) C e^{-v'z} \end{aligned} \quad (5)$$

Donde A, B y C son constantes de integración que pueden calcularse a partir de las condiciones de contorno, k_x y k_y son los números de onda en las direcciones x e y,

respectivamente, y $k_\alpha^2 = \omega^2/\alpha^2$, $k_\beta^2 = \omega^2/\beta^2$, $\alpha^2 = (\lambda + 2\mu)/\rho$, $\beta^2 = \mu/\rho$, $v = \sqrt{k_x^2 + k_y^2 - k_\alpha^2}$, $v' = \sqrt{k_x^2 + k_y^2 - k_\beta^2}$.

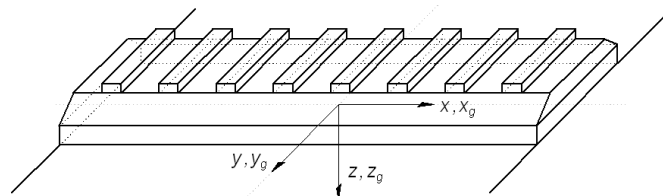


Figura 3.2. Sistema de coordenadas (x,y,z) y desplazamiento del terreno (xg, yg, zg).

3.2.- Caracterización dinámica de los productos elastoméricos

Los productos elastoméricos se ensayan dinámicamente en el rango 1-80 Hz para caracterizar su comportamiento en este rango de interés, datos que van a servir como entrada del modelo predictivo. Estos productos se asimilan a elementos muelle sin masa, con comportamiento lineal, parámetros uniformemente distribuidos y función de la frecuencia.

Los ensayos se llevan a cabo en el LADICIM (Universidad de Cantabria). Tal como muestra la Figura 3.3, los ensayos se llevan a cabo utilizando 8 acelerómetros sísmicos: 4 de ellos dispuestos en el plato superior, donde un actuador hidráulico aplica una fuerza vertical harmónica sobre la muestra, y otros 4 acelerómetros dispuestos sobre el banco de ensayo. La fuerza aplicada por el actuador hidráulico se adquiere mediante célula de carga mientras que las señales temporales de aceleración se integran para obtener los desplazamientos, con el objetivo de construir las curvas de histéresis, tal como se define en el apartado siguiente.



Figura 3.3. Vista frontal y superior de la configuración del ensayo para la caracterización dinámica a alta frecuencia de los productos elastoméricos RECYTRACK.

3.3.- Método de las curvas de histéresis para calcular los parámetros dinámicos

Este método está basado en la extracción de curvas de histéresis experimentales y ajustarlas a las curvas de histéresis teóricas obtenidas de un modelo teórico de un sistema de 1 GDL, tal como muestra la Figura 3.4, donde k_{bm} , c_{bm} y η_{bm} son la rigidez, el amortiguamiento viscoso y el amortiguamiento estructural del producto elastomérico, mientras que m es la masa vibrante.

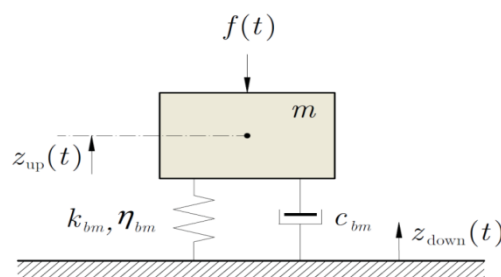


Figura 3.4. Modelo teórico de 1 GDL utilizado para ajustar las curvas de histéresis teóricas que permiten obtener las propiedades dinámicas del material elastomérico.

Considerando que la excitación dinámica es $f(t) = F \cdot \cos(\omega t + \varphi)$, donde F es su amplitud y φ es su fase, el desplazamiento asociado a esta carga dinámica para un sistema de 1 GDL se puede calcular a partir de la expresión siguiente:

$$z_{up}(t) - z_{down}(t) = -\frac{F}{(k_{bm} - m\omega^2)^2 + (\eta_{bm}k_{bm} + \omega c_{bm})^2} \cos(\omega t + \varphi - \frac{\pi}{2} + \theta) \quad (6)$$

donde $\varphi = \tan^{-1}\left(\frac{k_{bm} - m\omega^2}{\eta_{bm}k_{bm} + \omega c_{bm}}\right) + \begin{cases} 0 & \text{if } \eta_{bm}k_{bm} + \omega c_{bm} \geq 0 \\ \pi & \text{if } \eta_{bm}k_{bm} + \omega c_{bm} < 0 \end{cases}$, $z_{up}(t)$ es el desplazamiento de un

acelerómetro del plato superior y $z_{down}(t)$ es el desplazamiento del acelerómetro homólogo del plato inferior. Con el ajuste de las curvas de histéresis experimentales a la expresión (6) se obtienen los parámetros dinámicos equivalentes de los productos elastoméricos: k_{bm} , c_{bm} y η_{bm} . La Figura 3.5 muestra dos ejemplos de ajuste de curvas de histéresis, donde las curvas azules son las experimentales y las verdes son las teóricas.

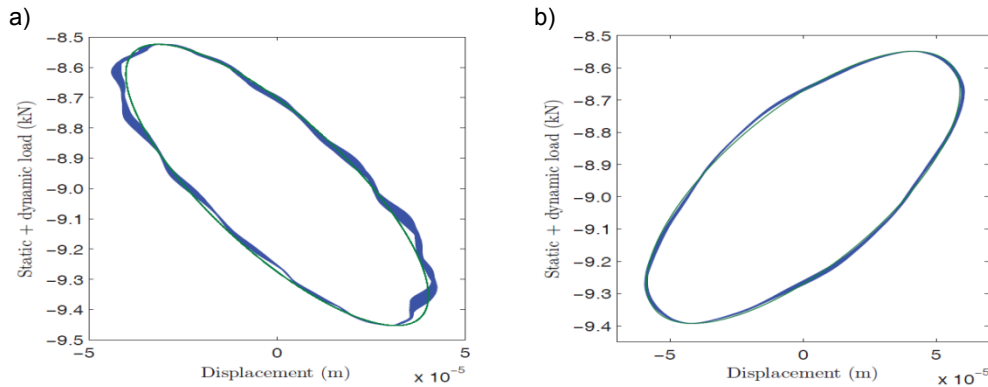


Figura 3.5. Curvas de histéresis teóricas y experimentales para frecuencias de excitación de a) 12,5 Hz y b) 32,5 Hz.

3.4.- Cálculo del *Insertion Loss, IL*

La eficacia de la manta elastomérica en términos de reducción de la vibración se evalúa mediante la pérdida por inserción o *Insertion Loss, IL*, parámetro que define la diferencia de nivel de vibración en un punto determinado del terreno debido a la inserción de la manta bajo balasto (UBM) o los bloques aislados (IBS) en la superestructura ferroviaria.

Para llevar a cabo el cálculo del *IL* tanto de la UBM como de los IBS RECYTRACK, se utiliza el modelo presentado en la Figura 3.1 (modelo con aislamiento) y el mismo pero sin tener en cuenta la capa elastomérica (modelo sin aislamiento). Para cada uno de estos dos modelos se calcula la receptancia en la superficie del terreno en el punto $(x,y) = (0,8)$ m [7] debido a una carga harmónica vertical aplicada a la cabeza del carril en el punto $x = 0$ m.

El valor global de cada una de estas dos receptancias es el que muestran las expresiones siguientes, donde x e y son las coordenadas espaciales según Figura 3.1 y ω es la frecuencia.

$$U_{g1}^{uniso}(x, y, \omega) = \sqrt{|X_{g1}^{uniso}(x, y, \omega)|^2 + |Y_{g1}^{uniso}(x, y, \omega)|^2 + |Z_{g1}^{uniso}(x, y, \omega)|^2} \quad (7)$$

$$U_{g1}^{iso}(x, y, \omega) = \sqrt{|X_{g1}^{iso}(x, y, \omega)|^2 + |Y_{g1}^{iso}(x, y, \omega)|^2 + |Z_{g1}^{iso}(x, y, \omega)|^2} \quad (8)$$

Considerando $x = 0$, el IL se calcula para cualquier distancia a la vía, y , utilizando la siguiente expresión:

$$IL = 20 \log_{10} \left(\frac{U_{g1}^{uniso}(0,y,\omega)}{U_{g1}^{iso}(0,y,\omega)} \right) \quad (9)$$

4.- RESULTADOS

La Figura 4.1 muestra los valores de algunos de los parámetros dinámicos de la UBM RECYTRACK, como son el C_{dyn} y c_{bm} , obtenidos del ajuste de las curvas de histéresis experimentales al modelo de 1 GDL.

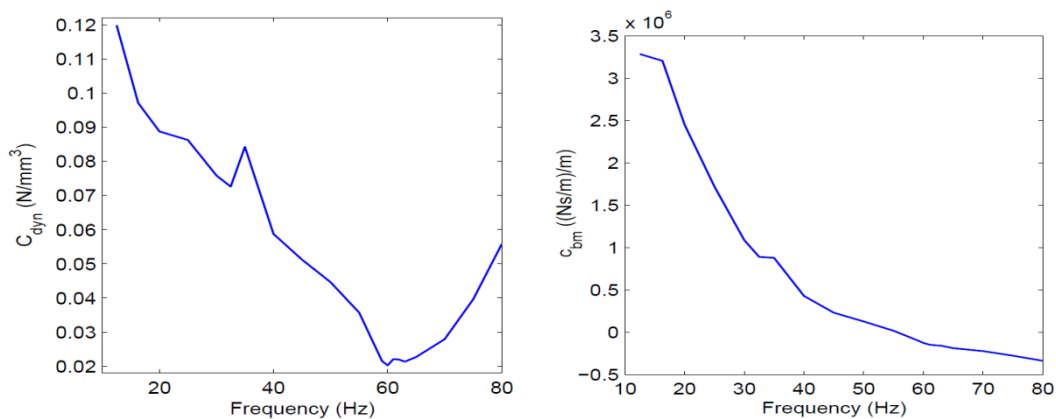


Figura 4.1. Resultados experimentales de a) C_{dyn} y b) c_{bm} .

El *Insertion Loss*, IL , tanto de la UBM como de los IBS RECYTRACK se calcula en función de la frecuencia en el rango 1-80 Hz y a diferentes distancias y del centro de vía utilizando la metodología expuesta anteriormente. Con el objetivo de tener en cuenta un amplio abanico de posibles terrenos, el IL se calcula para dos casuísticas extremas de terreno: un caso que representa un terreno blando (50 MPa) y otro caso que representa un terreno duro (300 MPa). La Figura 4.2 muestra los resultados obtenidos para el caso de la manta bajo balasto (UBM).

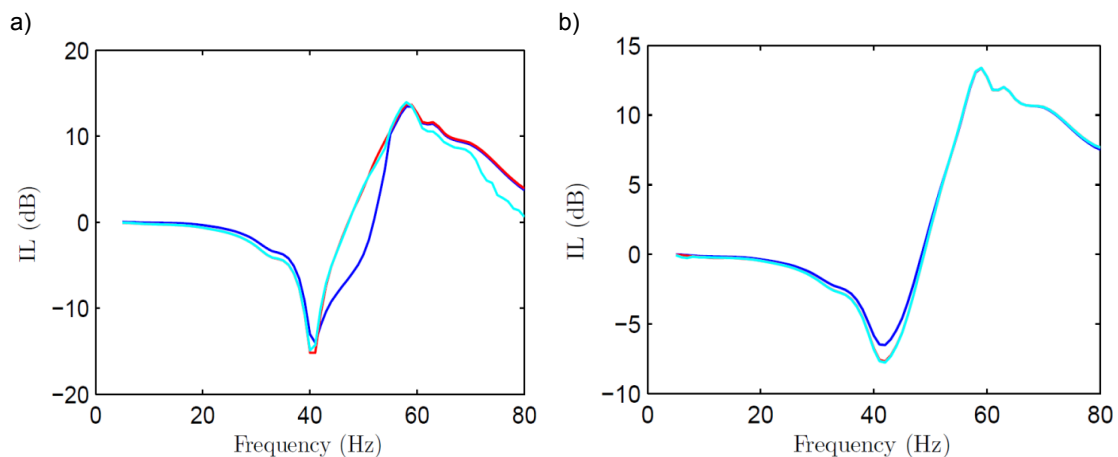


Figura 4.2. Predicción del IL de la manta (UBM) a $y = 2$ m (azul oscuro), $y = 8$ m (rojo) e $y = 15$ m (azul claro) para los casos extremos de a) terreno blando (50 MPa) y b) terreno duro (300 MPa).

5.- CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un modelo predictivo de superestructura para calcular la reducción de las vibraciones debido a la aplicación de soluciones elastoméricas a la superestructura ferroviaria. El parámetro utilizado para dicha valoración ha sido el *Insertion Loss, IL*,

Para alimentar este modelo con valores precisos, se ha desarrollado una metodología para la obtención de los parámetros dinámicos del material elastomérico a alta frecuencia. Esta metodología está basada en el ajuste de las curvas de histéresis experimentales del material a un modelo teórico masa-muelle de 1 GDL.

Finalmente, se calcula la atenuación de vibraciones introducida por las soluciones elastoméricas en función de la frecuencia, de la distancia al centro de vía y del tipo de terreno.

6.- AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha desarrollado en el marco del Proyecto RECYTRACK, con referencia LIFE10 ENV/ES/000514, consorcio formado por Acciona Infraestructuras, Adif, LADICIM (Universidad de Cantabria) y AV Ingenieros, y soporte financiero de la Comisión Europea mediante el instrumento LIFE+.

7.- REFERENCIAS

- [1] ETRMA. *Annual Activity Report*, 2007.
- [2] European Parliament, Council of the European Union. *Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives*. Official Journal of the European Union, 2008.
- [3] Lombaert, G., Degrande, G. *Ground-borne vibration due to static and dynamic axle loads of InterCity and high-speed trains*. Journal of Sound and Vibration, 319(3-5), 2009, pp. 1036-1066.
- [4] Knothe, K.L., Grassie, S.L. *Modelling of railway track and vehicles/track interaction at high frequencies*. Vehicle System Dynamics, 22(3-4), 1993, pp. 209-262.
- [5] Graff, F.G. *Wave Motion in Elastic Solids*. New York, Dover publications Inc., 1975, pp. 309-430.
- [6] Metrikine, A.V., Dieterman, H.A., *The equivalent vertical stiffness of an elastic half-space interacting with a beam, including the shear stresses at the beam – Half-space interface*. European Journal of Mechanics A/Solids, 16(3), 1997, pp. 515-527.
- [7] UIC CODE 719-1. June 2011. Recommendations for the use of Under Ballast Mats. UBM. 1st edition