

PREDICCIÓN DE LA VIBRACIÓN PRODUCIDA POR VEHÍCULOS SOBRE RAÍLES

PACS 43.50.Lj

Cástor Rodríguez Fernández¹

Sound of Numbers S.L., Departamento de acústica numérica. Spain – c/Barcelona 59 1º J – 36211 Vigo – Pontevedra

Alfonso Rodríguez-Molares²

Sonitum, Ingeniería Acústica, Departamento de Teoría de Señal y Comunicaciones, Universidad de Vigo. Spain.

ABSTRACT

Due to the increasing use of renewable energies in cities, the tramway for public transportation is more and more demanded. But this fact derives in a increasing of environmental noise due to vibration transmissions through the railway to the pavement. For solving this problem elastic interlayers, made of several materials, have been inserted to absorb rail vibration. This means that the insertion loss can be easily measured at laboratories but there are no clear paths to predict how the system is going to behave in situ, like the influence of the pavement dimensions. This communication presents some results of a study of the mass-spring system with an elastic rubber interlayer by means of the Finite Element Method. This methodology allows predicting the insertion loss of the whole system.

RESUMEN

El tranvía es cada día más utilizado como medio de transporte urbano. Esto produce un incremento del ruido ambiental por vibraciones. Para solucionar este problema se insertan capas elásticas, compuestas de diversos materiales, para absorber las vibraciones de la vía. Las pérdidas por inserción pueden ser fácilmente medidas en laboratorio pero es complejo predecir cómo se va a comportar el sistema in situ. Esta comunicación presenta resultados, obtenidos por medio del Método de Elementos Finitos, de un sistema de amortiguación de vibraciones. Esto permite predecir las pérdidas de inserción del sistema completo.

1. INTRODUCCIÓN

Cuando hablamos de transmisión de ruido de ferrocarril por el suelo, es obvio que insertando una capa elástica la propagación de las vibraciones se suele reducir. De hecho ha llegado a ser uno de los componentes clave en los estándares de construcción de vías, como en el DIN 45673-1:2000 [1]. Pero el nivel de pérdidas por inserción in situ es raramente presentado como una de las principales características del sistema de aislamiento. Por supuesto, este no es un dato que haya sido sencillamente obviado, sino que las dificultades técnicas de su medición in situ hacen que sea un ensayo excesivamente costoso como para ser emprendido. Por otro lado aunque se llevase a cabo, debe tenerse presente que los resultados in situ dependerán de las específicas condiciones de contorno que variarán de un sitio a otro.

A pesar de las objeciones, el nivel de las pérdidas por inserción supondría un dato muy útil para diseñadores de proyectos de ferrocarril y fabricantes de materiales. La experiencia con

¹ Email address. castor@sonen.es

² Email address. amolares@gts.tsc.uvigo.es

diferentes diseños geométricos y configuración de capas ayudaría a estos diseñadores a alcanzar una mejor adaptación a distintos problemas específicos.

Los recientes desarrollos en el campo de la acústica numérica permiten ahora un estudio más profundo de la transmisión de vibraciones en problemas reales. El comportamiento de modelos hiperelásticos, como neo-Hookean, Mooney-Rivlin o Ogden (ver Treloar [2] para más información), nos permiten comprobar la mejora obtenida por varios materiales elásticos y adaptar sus características a un objetivo dado.

Haciendo uso de tales conocimientos, el comportamiento de distintas gomas como capa elástica se ha evaluado el esquema constructivo de la DIN 45673-1:2000-05. Inicialmente, para un análisis estático previo se han probado dos modelos hiperelásticos: el Neo-Hookean y el Mooney-Rivlin. El material ha sido caracterizado a partir de los datos proporcionados por el fabricante y el comportamiento del modelo ha sido comparado contra datos experimentales. Finalmente, el sistema completo ha sido probado con el esquema de la DIN 45673-1 por medio de una simulación 2D FEM obteniendo las pérdidas de inserción de 1 a 250 Hz.

2. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL

El material elástico usado para este estudio es un compuesto de goma hecho de materiales reciclados. Las propiedades físicas (dinámicas y estáticas) del material fueron obtenidas experimentalmente por la Technical University of Dresden, siguiendo las normas DIN EN 826 [3] y DIN 53513 [4].



Figura 1: Banco de pruebas de dos componentes usado para caracterizar el comportamiento mecánico de las capas elásticas en dirección vertical y horizontal en la Dresden Technical University

Estos datos sirvieron para obtener los parámetros de los modelos hiperelásticos. El modelo Neo-Hookean fue propuesto en 1948 por Ronald Rivlin, y está caracterizado por la ley constitutiva,

$$\mathbf{T} = -p\mathbf{I} + G\mathbf{B} \quad (1)$$

donde \mathbf{T} es el tensor de estrés, p la presión, G es el módulo de rigidez transversal y \mathbf{B} es el tensor de deformaciones de Finger. El modelo Mooney-Rivlin, propuesto independientemente por Melvin Mooney y Ronald Rivlin en 1952, es una generalización del modelo Neo-Hookean donde la tensión es una combinación lineal de dos invariantes del tensor de Finger, dado por la ley,

$$\mathbf{T} = -p\mathbf{I} + 2C_{10}\mathbf{B} + 2C_{01}\mathbf{B}^{-1} \quad (2)$$

Donde C_{10} y C_{01} son constantes que caracterizan el comportamiento hiperelástico del material.

Para testear la validez de la caracterización del material, se ha realizado una simulación para emular las medidas llevadas a cabo en la Dresden Technical University. Se ha realizado una simulación estática de tres capas elásticas de goma. En la figura 2, se comparan los resultados de las simulaciones con los datos experimentales.

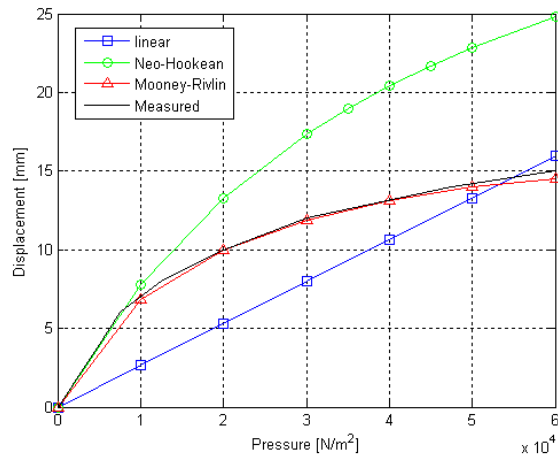


Figura 2: Comparación de el comportamiento estático de los modelos hiperelásticos para el material elástico con los datos experimentales proporcionados.

Como era de esperar, Mooney-Rivlin se adecúa mejor a los datos experimentales que Neo-Hookean, y, para pequeñas compresiones, ambos mejor que la aproximación lineal. Estos modelos son útiles principalmente para análisis estático. Asumiendo pequeñas deformaciones, la aproximación lineal puede ser aplicada directamente a un análisis armónico aproximándolo por el módulo elástico dinámico del material a una presión media dada.

Para un completo análisis dinámico, aceptamos esto basándonos en los resultados proporcionados por el fabricante. La masa del sistema soportado por el material de goma (incluyendo un tren de peso medio que en algunos casos puede tener influencia sobre las resonancias naturales del sistema elástico) ha sido tomada en cuenta para calcular la presión media sobre la capa elástica y caracterizar el módulo dinámico efectivo del material elástico.

2. ENTORNO DE SIMULACIÓN

La norma DIN 45673-1:2000-05 presenta un esquema constructivo para la vía incluyendo una capa elástica para prevenir la transmisión de vibraciones a través del suelo. El esquema general puede verse en la figura 3. Éste esquema puede ser fácilmente simulado por medio de un análisis armónico FEM 2D debido a su simetría a lo largo del eje longitudinal a la vía.

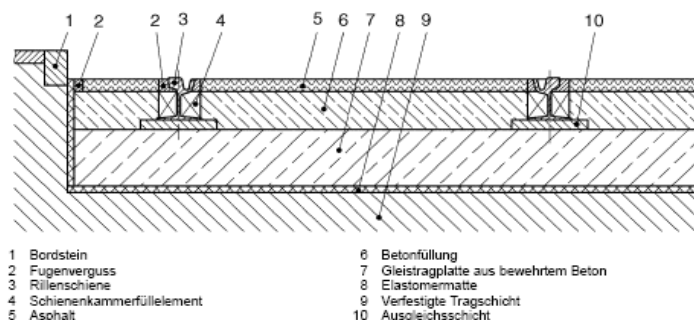


Figura 3: Esquema constructivo de la vía férrea presentado en DIN 45673-1:2000-05.

En la figura 4 se puede ver la extrusión 3D de la mitad del escenario 2D simulado. Para modelar las condiciones de Sommerfeld han sido añadidos dominios Perfect Matched Layer [5] en el contorno del dominio de cálculo. Así, la estimación de las vibraciones será como si la vía estuviese dispuesta en un entorno semi-infinito y homogéneo. La Tierra ha sido tomada como un medio isotrópico con un módulo de Young de $E=1.5$ GPa, módulo Shear $G=210$ MPa, densidad $\rho=1980$ kg/m³ y un coeficiente de amortiguamiento de $\beta=0.042$. Para el asfalto, hormigón y acero se han tomado valores típicos.

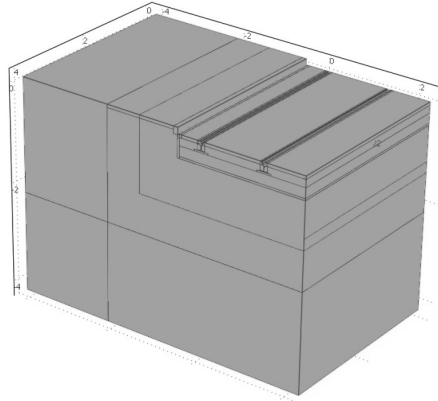


Figura 4: Modelo 3D del esquema de DIN 45673-1:2000-05.

La malla, que puede verse en la figura 5, ha sido diseñada para asegurar una baja polución numérica manteniendo la relación, de Ihlenburg [6],

$$\frac{kh}{2p'} \quad (3)$$

por debajo de 0.5, donde k es el número de onda, h es el tamaño máximo de la malla y p es el orden del elemento.

La excitación se produce armónicamente generada por un modelo de contacto de las superficies de ruedas y raíles, permitiendo que la vibración producida se propague a través de los diferentes dominios dentro del modelo. Para este estudio no se ha considerado estratificación del suelo. Para la obtención del nivel de pérdidas por inserción se integra la velocidad a lo largo de una superficie cerrada a 1 m de la frontera del dominio. La simulación se realiza con y sin capa de goma de diferentes grosores. Así, las pérdidas de inserción pueden ser calculadas y comparadas entre cada configuración.

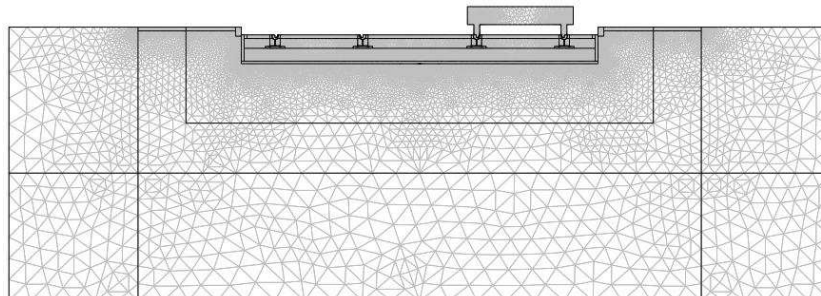


Figura 5: Malla usada para resolver el problema.

En la figura 6, se puede ver el campo de velocidades calculado a 100Hz para el caso de carencia de capa elástica. Se observa que la respuesta del terreno es eminentemente

asimétrica, probando la necesidad de una simulación completa in situ para la obtención del nivel de pérdidas por inserción del sistema.

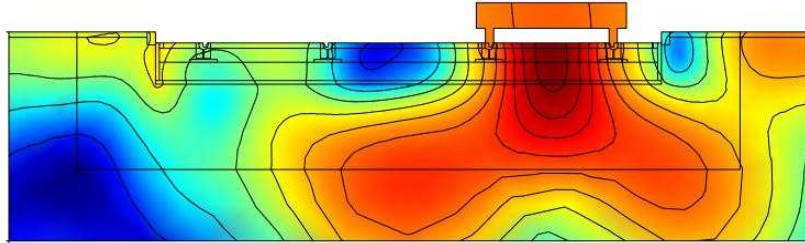


Figura 6: Campo de velocidad para 100Hz

La integración del nivel de velocidad a 1 m de la frontera del dominio se puede ver en la figura 7, de 1 a 250 Hz, para dos grosores de material elástico y sin el. El nivel de velocidad ha sido normalizado al nivel de velocidad de vibración en los raíles.

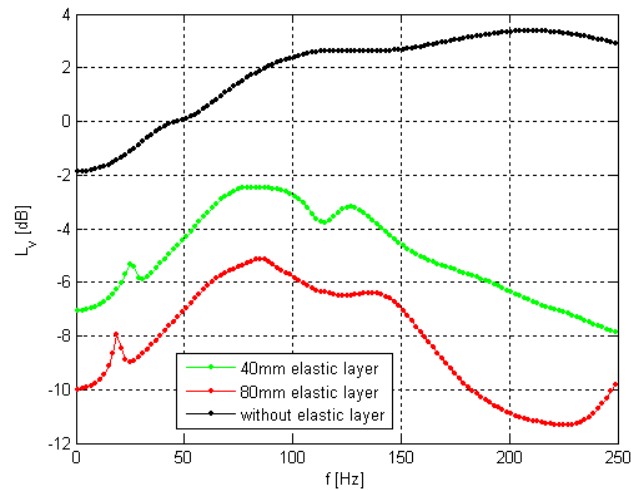


Figura 7: Integración del nivel de velocidad en el contorno de evaluación

El nivel de las pérdidas por inserción, calculado a partir de los datos previamente mostrados, se puede ver en la figura 8, para los dos grosores de la capa elástica estudiada.

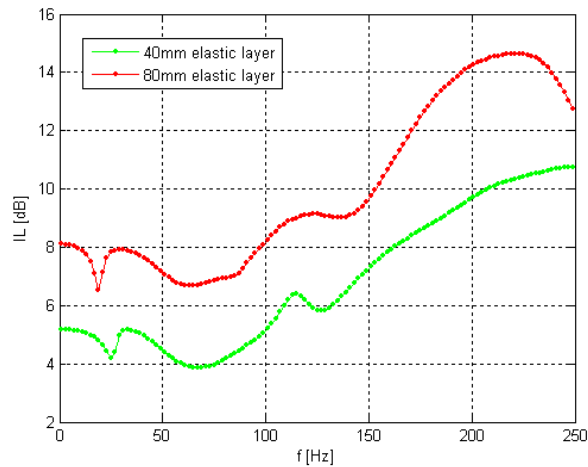


Figura 8: Pérdidas de Inserción para el esquema constructivo DIN testado con material elástico.

La predicción muestra un incremento notable de las pérdidas por inserción con la frecuencia, presentando su valor mínimo alrededor de 60Hz. Como se esperaba, doblando el grosor de la capa elástica, el nivel de las pérdidas por inserción se incrementa en casi 3dB en la práctica totalidad del rango de frecuencias analizado.

3. CONCLUSIONES

Como se ha mostrado por los resultados en la figura 8, el nivel de las pérdidas por inserción pueden ser calculadas “in situ” con una elevada precisión permitiendo probar y evaluar nuevos diseños y materiales que podrían mejorar el comportamiento de los sistemas de aislamiento.

Por medio de los métodos de la acústica numérica, Sound of Numbers S.L. está trabajando en el diseño de nuevos materiales que optimizarán el comportamiento a bajas frecuencias de los sistemas de reducción de las vibraciones. Los resultados del mencionado proceso de diseño serán presentados en un futuro cercano.

Por otra parte, simulaciones como la aquí presentada, ampliadas para un medio no isotrópico pueden servir para predecir la vibración que alcanza a los edificios colindantes desde las vías del ferrocarril y así detectar y prevenir los puntos problemáticos en las nuevas vías proyectadas.

REFERENCIAS

1. DIN 45673-1:2000-05, Mechanical vibration - Resilient elements used in railway tracks - Part 1: Laboratory determination of static and dynamic characteristics.
2. L.R.G. Treloar, *The Physics of Rubber Elasticity*. , Clarendon Press, Oxford (1975).
3. DIN EN 826:1996, Thermal insulating products for building applications - Determination of compression behaviour.
4. DIN 53513:1990, Determination of the viscoelastic properties of elastomers on exposure to forced vibration at non-resonant frequencies.
5. J.P. Berenger, “A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves,” *Jour. Comp. Phys.*, vol.114, Aug. 1994, pp.185-200
6. F. Ihlenburg. *Finite element analysis of acoustic scattering*, Applied mathematical sciences, Springer-Verlag, New York Inc, 1998. v. 132.