

Modelos numéricos para el análisis del comportamiento vibratorio de vías férreas

A. Zougari, J. Martínez Miralles

Dpto. de Ingeniería Mecánica. Universitat Politècnica de Catalunya
jmartinez.miralles@upc.edu

Uno de los aspectos que los últimos años ha cobrado especial importancia en el desarrollo del transporte ferroviario es el estudio de las vibraciones y el ruido de rodadura producidos por el tráfico ferroviario. Las vibraciones producidas por la circulación de un tren se propagan al entorno y pueden originar molestias en las zonas habitadas cercanas al trazado, tanto por la inmisión de vibraciones como por el ruido que éstas generan en el interior de viviendas y espacios públicos. Asimismo, dichas vibraciones influyen negativamente en el deterioro de la superestructura de vía y en el material rodante. Todo ello justifica el interés en el estudio del comportamiento vibratorio de la vía.

Diversos autores se han centrado en el estudio de las vibraciones ocasionadas al paso de un tren, y han desarrollado diversos modelos de generación de vibraciones basados en el contacto rueda-carril. En ellos se utilizan modelos de vía que abarcan desde modelos analíticos que representan solo media vía, hasta modelos complejos basados en métodos de elementos finitos, elementos de contorno, etc. Con el fin de analizar las características de los diversos modelos, se han desarrollado modelos numéricos para describir el comportamiento vibratorio de la superestructura de vía. El objetivo es disponer de modelos que describan de forma más precisa el comportamiento de la superestructura, incluyendo aspectos no reflejados en los modelos analíticos como son la flexibilidad de las traviesas o la rigidez distribuida del balasto.

La presente ponencia recoge los resultados obtenidos con un modelo numérico de vía clásica, con traviesas de madera y balasto, utilizando el cálculo por elementos finitos, en concreto la plataforma ANSYS 13. Dichos resultados se presentan en forma de respuesta frecuencial de la vía en diversas localizaciones, y se contrastan con resultados obtenidos con modelos analíticos de vía y con resultados experimentales obtenidos a partir de mediciones realizadas en el Ferrocarril Metropolitano de Barcelona.

1. INTRODUCCIÓN

En el sector de la explotación del transporte ferroviario preocupa especialmente el impacto ambiental producido por la emisión de ruido y por la transmisión de vibraciones al entorno. Este impacto es especialmente significativo en trazados urbanos, ya sean de superficie, donde el principal problema es la emisión aérea de ruido, o subterráneos, donde la transmisión de vibraciones es la que crea más dificultades [1]. La inmisión de vibraciones en edificaciones cercanas a los trazados ferroviarios produce molestias asociadas a la percepción directa de las vibraciones y también al ruido inducido por las mismas.

La causa principal de las vibraciones generadas por el tráfico ferroviario se encuentra en las irregularidades de perfil de las ruedas y de los carriles. Las irregularidades de perfil generan fluctuaciones de la fuerza de contacto rueda-carril que son las responsables de las vibraciones que se transmiten al entorno, así como de daños por fatiga y por desgaste del material rodante. La vibración generada depende del comportamiento vibratorio de la superestructura de vía y del conjunto eje ferroviario más suspensión primaria, y se intensifica con el aumento de la velocidad del tren, la carga sobre los ejes y, sobre todo, con el estado de deterioro de los perfiles de ruedas y carriles.

Diversos autores se han centrado en el estudio de las vibraciones generadas en una vía ferroviaria al paso de un tren, y han presentado diferentes teorías y modelos analíticos [2-4].

Dichos modelos suelen ser de media vía en recta, considerando un solo carril en contacto con una rueda suspendida del bogie por medio de la suspensión primaria. Existen básicamente dos modelos [2, 3]: el modelo continuo considera los parámetros de vía, rigidez de las fijaciones, amortiguamiento, masa de las traviesas, etc., distribuidos a lo largo de la misma, a modo de capas de rigidez, amortiguamiento o masa según sea el caso; por el contrario el modelo discreto considera el carril soportado por elementos individuales que representan las fijaciones elásticas, las traviesas y el balasto, lo que permite modelizar el efecto de la distancia entre fijaciones o traviesas en el comportamiento de la vía. En ambos casos el carril se modeliza como una viga infinita de Euler o de Timoshenko. Los modelos analíticos de media vía, si bien han sido ampliamente utilizados, presentan el inconveniente de no considerar factores que afectan al mecanismo de generación de vibraciones como son la rigidez de las traviesas, la rigidez distribuida del balasto, o la transmisión de vibraciones entre ambos carriles a través de la superestructura de la vía.

En publicaciones anteriores [5, 6] se han presentado modelos numéricos de vía, basados en elementos finitos, que permiten caracterizar de forma más fiel el comportamiento vibratorio de la misma. Estos modelos se han desarrollado empleando ANSYS 13, y se han aplicado al estudio de distintos tipos de vía: vía clásica con traviesas de hormigón y balasto, vía con fijaciones DFF –Direct Fixation Fastening– y vía tipo bloque con y sin riostra entre bloques de hormigón.

En la presente ponencia se propone un modelo numérico mejorado para vía clásica con traviesas de hormigón o madera sobre balasto. Los resultados obtenidos se presentan en forma de respuesta en frecuencia de la vía y se comparan con la respuesta proporcionada por modelos analíticos presentados en publicaciones anteriores [2, 3]. Asimismo, los resultados obtenidos se comparan satisfactoriamente con los resultados experimentales procedentes de medidas realizadas sobre una vía real.

El trabajo que se presenta forma parte de un trabajo más amplio cuyo propósito es combinar el modelo numérico de vía con un modelo numérico de eje ferroviario y suspensión primaria, y de este modo simular el mecanismo de generación de la fuerza de contacto rueda-carril.

2. MODELO NUMÉRICO DE LA VÍA

Para desarrollar el modelo numérico de vía se ha empleado el programa ANSYS 13. El modelo permite obtener la respuesta dinámica vertical en cualquier nodo de la vía al aplicar fuerzas excitadoras verticales sobre los carriles.

El tipo de vía considerado es el de vía clásica con traviesas de madera sobre balasto; que es el tipo de vía sobre el que se han realizado las pruebas experimentales. La tabla 1 recoge los valores de los parámetros de vía utilizados. Dichos valores se han obtenido a partir de mediciones directas sobre la vía de prueba o a partir de la bibliografía, como en el caso de los parámetros del carril y del balasto.

Los diferentes componentes de la vía se han caracterizado utilizando diversos elementos de la librería que ofrece ANSYS 13 [7]. En la selección del tipo y tamaño de los elementos a usar se ha considerado el rango de frecuencias en el cual se produce la generación de vibraciones por el contacto rueda carril: entre 10 y 400 Hz [8]. La figura 1 muestra la representación ANSYS de un tramo del modelo de vía clásica completa.

La descripción de cada uno de los elementos utilizados es la siguiente:

- El carril se modeliza como una viga compuesta por la unión de elementos tipo viga de Timoshenko, cuya longitud corresponde a la distancia entre traviesas; de este modo se utilizan los nodos de los extremos para asociarlos a las fijaciones del carril.
- Las fijaciones del carril son consideradas como elementos elásticos lineales con amortiguamiento de histéresis que conectan el carril con las traviesas. A efectos de comparación con la vía de pruebas, en la que el carril se fija rigidamente a las traviesas sin elementos elásticos interpuestos, se considera arbitrariamente una rigidez muy elevada, con lo que dicha rigidez no interviene en el modelo.

Ancho de vía internacional	1,435 m
Distancia entre traviesas	0,6 m
Carril UIC 54	
Masa del carril por unidad de longitud	54,4 kg/m
Densidad del acero	7850 kg/m ³
Módulo de elasticidad del acero	210 GPa
Coefficiente de Poisson del acero	0,3
Sección del carril	6,93·10 ⁻³ m ²
Momento de área de segundo orden del carril	2,35·10 ⁻⁵ m ⁴
Factor de pérdidas del carril	0,02
Rigidez de las fijaciones entre carril y traviesas	Rígido
Traviesas	
Longitud de las traviesas de madera	2,4 m
Masa de las traviesas de madera	90 kg
Módulo de elasticidad de la madera	10 GPa
Anchura x altura de las traviesas	0,22 m x 0,12 m
Balasto	
Rigidez del balasto bajo una traviesa	33,8 MN/m
Factor de pérdidas del balasto	0,24

Tabla 1. Parámetros geométricos y de material empleados en el modelo de vía

- Las traviesas se modelizan, como en el caso del carril, mediante elementos tipo viga de Timoshenko. El número de elementos escogido, 70, permite modelizar de forma suficientemente precisa el enlace de cada traviesa con el balasto distribuido bajo la misma.
- Finalmente, el balasto se modeliza por medio de una distribución de elementos elásticos lineales con amortiguamiento de histéresis conectados por un lado a los nodos de las traviesas y por otro a la base rígida de la vía.

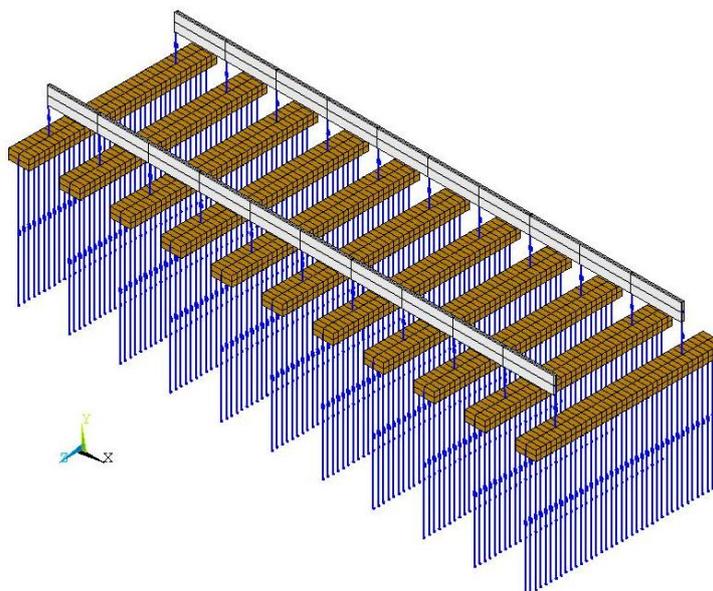


Figura 1. Modelo numérico de un tramo de la vía clásica con balasto y traviesas de madera

Otro aspecto fundamental en la descripción del modelo es la definición de las condiciones de contorno, de las cuales depende directamente el comportamiento dinámico del sistema modelado. Estas son:

- La base de la vía se considera rígida. Si bien se trata de una condición no real, puesto que la vibración se transmite al entorno, se ha comprobado que la rigidez de la base, mayor que la de la propia vía en su conjunto, no influye en el mecanismo de generación de vibraciones por causa de la rodadura [2, 3].
- Al contemplar sólo fuerzas excitadoras verticales sobre los carriles, los grados de libertad de los nodos del modelo se restringen para permitir sólo el movimiento de los elementos de la vía en dirección vertical así como la flexión transversal de los elementos tipo viga.
- La longitud de vía considerada, 60 m, es suficiente para que, debido al amortiguamiento del sistema, las condiciones de contorno en el tramo central de la vía sean similares a las de una vía recta infinitamente larga.

El tipo de análisis empleado para caracterizar el comportamiento de la vía es el análisis armónico. Este análisis permite obtener la variación temporal de desplazamientos, tensiones, deformaciones y fuerzas en una estructura como respuesta a fuerzas excitadoras sinusoidales.

3. COMPARACIÓN ENTRE EL MODELO NUMÉRICO Y EL MODELO ANALÍTICO

Con el fin de comprobar la bondad del modelo numérico, se compara la respuesta dinámica de la vía obtenida con dicho modelo con la respuesta que proporciona el modelo analítico continuo de media vía, de parámetros distribuidos. La comparación se realiza en el dominio de la frecuencia utilizando la receptancia vertical del carril, función que relaciona el desplazamiento vertical de un punto del carril, y_c , con la fuerza excitadora armónica vertical, F , aplicada sobre el mismo punto o un punto distinto, para cada frecuencia f . La receptancia se describe mediante la siguiente expresión:

$$R(f) = \frac{y_c(f)}{F(f)} = \frac{y_c e^{j(2\pi ft + \phi)}}{F e^{j2\pi ft}} \quad (1)$$

Los modelos analíticos de media vía, tanto el modelo continuo como el modelo discreto, han sido desarrollados en trabajos anteriores y presentados en diversas publicaciones [2,3]. En los dos casos el carril se puede considerar como una viga infinita de Euler-Bernoulli o como una viga infinita de Timoshenko; ambas proporcionan resultados prácticamente iguales en el rango de frecuencias de interés, entre 10 y 400 Hz. Los dos modelos también proporcionan resultados equivalentes si las velocidades de circulación de los trenes son bajas, por debajo de 120 km/h [9]. Dicha condición se cumple para el caso de los trazados interurbanos, que son los de interés en el presente estudio.

La figura 2 muestra un esquema del modelo continuo de media vía utilizado en la comparativa. Los parámetros utilizados en este modelo se deducen de los presentados en la tabla 1, transformándolos para convertirlos en parámetros distribuidos: magnitud por unidad de longitud de la coordenada x de la vía.

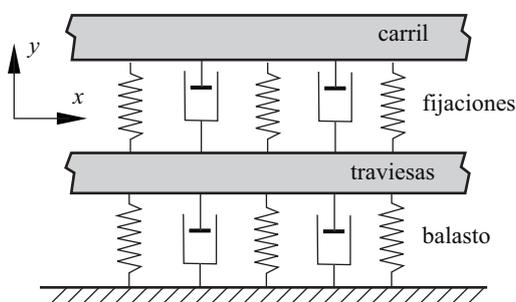


Figura 2. Esquema del modelo continuo de parámetros distribuidos

La figura 3 muestra la comparación de la receptancia de la vía obtenida con el modelo numérico completo y con el modelo analítico. La receptancia considerada es la que relaciona el desplazamiento vertical de un punto del carril situado sobre una traviesa del tramo

central de la vía con la fuerza armónica vertical aplicada en el mismo punto. Para mantener la simetría del movimiento vertical de la vía, se aplica la misma fuerza armónica a los puntos de ambos carriles situados sobre la misma traviesa. De este modo es posible la comparación con el modelo analítico de media vía, que conlleva implícito el movimiento simétrico de ambos carriles.

Las receptancias obtenidas con ambos modelos concuerdan por lo que respecta a la primera frecuencia propia de la vía, y se diferencian en otros aspectos. La receptancia obtenida con el modelo numérico muestra valores superiores a los de la receptancia obtenida con el modelo analítico. Este hecho es debido a que en el modelo numérico se considera la rigidez a flexión de las traviesas, mientras que en el modelo analítico dichas traviesas se modelizan solo como una masa distribuida. La rigidez a flexión de las traviesas reduce la rigidez global de la vía y aumenta la receptancia. En el caso de vías con traviesas de hormigón, más rígidas, esta diferencia es inapreciable [5]. En la receptancia obtenida con el modelo numérico también se observa una resonancia alrededor de 230 Hz. Dicha resonancia proviene de un modo a flexión de las traviesas y se presenta atenuada por efecto del amortiguamiento del balasto. Esta frecuencia propia no aparece en la receptancia obtenida con el modelo analítico al no incluir dicho modelo la flexión de las traviesas.

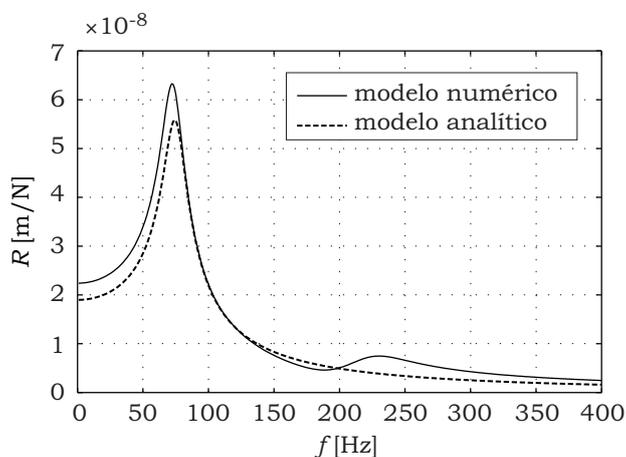


Figura 3. Receptancia de la vía clásica obtenida con el modelo numérico y con el modelo analítico

Una ventaja del modelo numérico de vía completa es que permite comparar la respuesta en ambos carriles. La figura 4 muestra la receptancia definida en el punto del carril donde se aplica la fuerza excitadora, carril 1, y la receptancia definida en el carril opuesto, justo enfrente del punto de excitación, carril 2. Queda patente la baja transmisión de vibración que se produce a través de la superestructura de la vía.

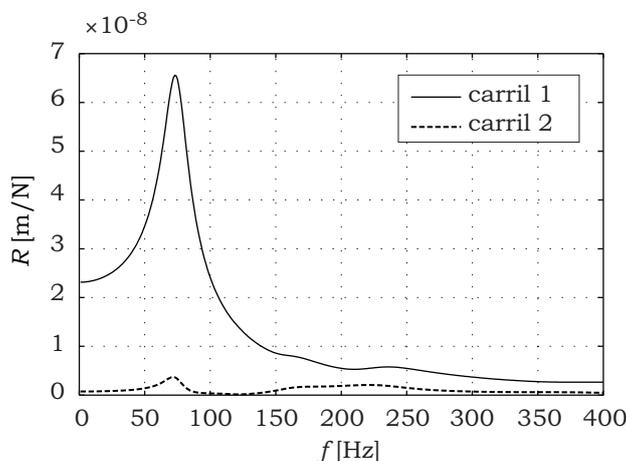


Figura 4. Receptancia en el carril donde se aplica la excitación, carril 1, y en el carril opuesto, carril 2

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Se han realizado medidas experimentales en un tramo de vía clásica con traviesas de madera y balasto con el fin de validar el modelo numérico de vía completa. A partir de dichas medidas se ha determinado la receptancia experimental de la vía, la cual se compara con la receptancia que proporciona el modelo numérico. El tramo de vía disponible, recto y de suficiente longitud, corresponde a una vía de servicio de los talleres del Ferrocarril Metropolitano de Barcelona situados junto a la futura estación del AVE en la zona de La Sagrera.

Para excitar vibración en la vía, se ha empleado un actuador electrodinámico fijado a la cabeza del carril mediante una placa de sujeción con mordazas –ver la figura 5–. El actuador se ha situado encima de una traviesa. Un generador de señal sinusoidal de frecuencia regulable controla el amplificador de potencia que alimenta el actuador. Sobre la base móvil del actuador se ha fijado una masa de 2 kg que, al vibrar, genera la fuerza excitadora armónica que se transmite al carril a través de la placa de sujeción. Mediante acelerómetros situados sobre dicha masa y en diversas localizaciones de la vía, que incluyen ambos carriles, se han registrado las señales de vibración para frecuencias entre 30 y 400 Hz. Para registrar las señales de vibración, se ha empleado un sistema de adquisición multicanal que digitaliza simultáneamente todas las señales y las almacena en el disco duro de un ordenador. Finalmente, la información se ha tratado con aplicaciones propias desarrolladas utilizando MatLab. De este modo se han determinado la receptancia en el punto de aplicación de la fuerza y las receptancias cruzadas entre dicho punto y las diversas localizaciones en la vía. La magnitud de la fuerza excitadora se ha determinado a partir de las señales proporcionadas por acelerómetros fijados en la masa vibrante y en el carril junto al actuador.



Figura 5. Disposición del actuador electrodinámico fijado a la cabeza del carril encima de una traviesa

La figura 6 muestra la comparación de la receptancia definida en el punto de aplicación de la fuerza excitadora calculada numéricamente con la obtenida experimentalmente. La receptancia calculada se representa con una resolución frecuencial de 1 Hz, mientras que la receptancia experimental se ha obtenido para intervalos de frecuencia de 10 Hz.

La concordancia entre ambos resultados es satisfactoria y demuestra la validez del modelo numérico de vía. Cabe decir que los parámetros de la vía de prueba más difíciles de estimar son los del balasto: su rigidez y su factor de pérdidas. Dichos parámetros presentan una gran dispersión en función del estado y las características del balasto, y se han ajustado dentro del margen de valores que se puede encontrar en la bibliografía.

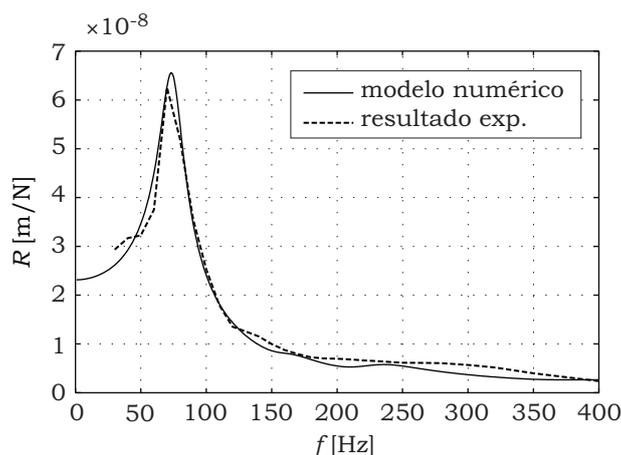


Figura 6. Comparación de la receptancia obtenida por cálculo y la receptancia experimental

Finalmente, la figura 7 muestra la receptancia experimental en el punto del carril donde se aplica la fuerza excitadora, carril 1, y la receptancia definida en el carril opuesto, justo enfrente del punto de excitación, carril 2. De nuevo se comprueba, en este caso experimentalmente, la baja transmisión de vibración que se produce entre ambos carriles.

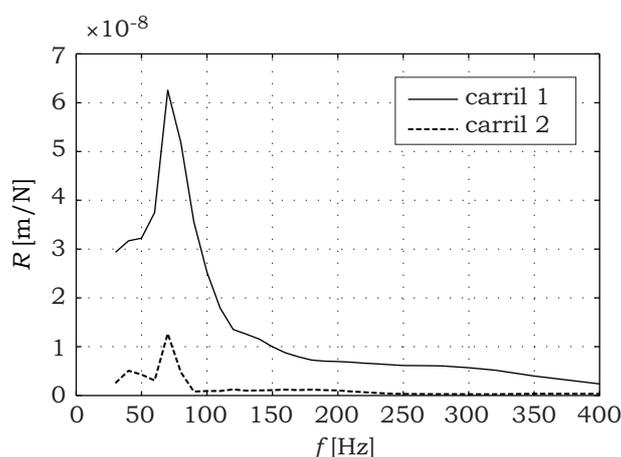


Figura 7. Receptancia experimental en el carril donde se aplica la excitación, 1, y en el carril opuesto, 2

5. CONCLUSIONES Y FUTUROS TRABAJOS

Existe una buena concordancia entre la receptancia de la vía analizada, obtenida con el modelo numérico, con el modelo analítico y la obtenida experimentalmente. Este hecho confirma la validez del modelo numérico empleado.

Se constata que el modelo numérico de vía completa permite estudiar aspectos del comportamiento vibratorio de la vía que el modelo analítico de media vía no contempla. Por ejemplo la influencia de la rigidez a flexión de las traviesas, o la transmisión de la vibración de un carril a otro a través de la superestructura de vía. Para el tipo de vía clásica analizada, y para los parámetros considerados, el modelo numérico ha demostrado que la transmisión a través de la vía es débil y que por lo tanto esta transmisión no influye significativamente en el mecanismo de generación de vibraciones causadas por el contacto rueda-carril. Los resultados experimentales obtenidos confirman también esta conclusión.

Asimismo el modelo numérico facilita el análisis de los principales factores que intervienen en la generación de vibraciones en el contacto rueda-carril y su transmisión al entorno.

En un futuro próximo está previsto realizar nuevas medidas experimentales para validar los modelos numéricos correspondientes a otros tipos de vía. Especialmente el modelo de vía bloque con riostra empleado ampliamente en el Ferrocarril Metropolitano de Barcelona.

Asimismo se están desarrollando modelos numéricos del conjunto eje ferroviario más suspensión primaria para analizar la transmisión de vibraciones entre ambos carriles a través de dicho conjunto. La combinación de los modelos numéricos de vía y de eje ferroviario proporcionará un modelo global que permitirá simular el mecanismo de generación de la fuerza de contacto rueda-carril.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores del presente trabajo agradecen al profesor Salvador Cardona, del Departamento de Ingeniería Mecánica de la UPC, su asesoramiento en la utilización de rutinas de MatLab para el tratamiento de la información experimental. Asimismo agradecen a José Luis Tejedo y Jordi Cervantes, del mismo departamento, su ayuda y soporte en la realización de las mediciones experimentales. Finalmente los autores quieren agradecer especialmente a Jordi Orta, de la empresa TMB explotadora del Ferrocarril Metropolitano de Barcelona, la predisposición y las gestiones que han hecho posible la realización de las pruebas experimentales en las instalaciones de dicha empresa.

7. REFERENCIAS

- [1] Department of Transportation, Federal Transit Administration, *Transit noise and vibration impact assessment*, EEUU, (2006).
- [2] J. Otero, *Contribución al estudio de las vibraciones producidas por el contacto rueda-carril y su transmisión al entorno*, Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, (2009).
- [3] J. Otero, J. Martínez, M. A. De Los Santos, S. Cardona, *A mathematical model to study railway track dynamics for prediction of vibration levels generated by rail vehicles*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit , 226(1), (2012), 62-71.
- [4] T. X. Wu, D. J. Thompson, *A hybrid model for the noise generation due to railway wheel flats*, Journal of Sound and Vibration, 251(1), (2002), 115-139.
- [5] A. Zougari, J. Martínez, *Obtención de la respuesta vibratoria de una vía mediante modelos numéricos basados en el método de elementos finitos*, X Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, Oporto, Portugal, (2011).
- [6] A. Zougari, J. Martínez, S. Cardona, *Vibration response of a railway track obtained using numerical models based on FEM*, International Conference on Structural Nonlinear Dynamics and Diagnosis CSNDD 2012, Marrakech, Marruecos, (2012).
- [7] Ansys Inc., *Ansys Release13 Multiphysics. Ansys Release13 Documentation*, EEUU, (2011).
- [8] S. Iwnicki S, *Handbook of railway vehicle dynamics*, Taylor and Francis Group, (2006).
- [9] M.A. de los Santos, J. Martínez, S. Cardona, *A convolution application to determine the dynamic response of a railway track*, Mechanical Systems and Signal Processing, 9(6), (1995), 707-708.