



OBTENCIÓN DE LA RESPUESTA VIBRATORIA VERTICAL DE VÍAS FÉRREAS MEDIANTE MODELOS NUMÉRICOS

AYOUB ZOUGARI, JORDI MARTÍNEZ MIRALLES, SALVADOR CARDONA FOIX

Universitat Politècnica de Catalunya
Departamento de Ingeniería Mecánica
Av. Diagonal 647, 08028 Barcelona, España

(Recibido 13 de febrero de 2012, para publicación 12 de junio de 2012)

Resumen – En los últimos cuarenta años, diversos investigadores han desarrollado modelos de contacto rueda-carril orientados al estudio de las vibraciones y el ruido de rodadura producidos por el tráfico ferroviario. Dichos modelos abarcan desde los modelos analíticos en los que se considera media vía en contacto con una rueda rígida suspendida del bogie mediante la suspensión primaria, hasta los modelos numéricos basados en métodos de elementos finitos, elementos de contorno, y métodos mixtos. Estos últimos, a diferencia de los modelos analíticos, permiten caracterizar de manera más precisa los distintos componentes de la estructura de vía, así como considerar la interacción entre ambos carriles de la vía con un eje ferroviario completo. El estudio de los diferentes elementos que constituyen todo el sistema, así como el conocimiento de su influencia en la generación y la transmisión de las vibraciones causadas al paso de un tren, son de gran interés cuando se desea evaluar los efectos de las vibraciones que se producen en los trazados ferroviarios. En este trabajo se presenta un modelo numérico de la estructura de vía, basado en el método de los elementos finitos, con el objetivo de estudiar la respuesta dinámica provocada por fuerzas verticales aplicadas en cualquier localización sobre los carriles. Esta caracterización es un primer paso para obtener un modelo numérico de contacto rueda-carril que incluya la vía y un eje suspendido del bogie a través de la suspensión primaria. El modelo numérico permite obtener la respuesta en frecuencia de la vía en diversas localizaciones sobre los carriles. Los resultados obtenidos se comparan con resultados obtenidos de modelos analíticos desarrollados anteriormente y presentes en la bibliografía. Asimismo, se analiza la interacción entre ambos carriles de la vía. Dicha interacción, si es significativa, puede influir apreciablemente en el mecanismo de generación de vibraciones.

Palabras clave – Vibraciones, elementos finitos, ferrocarriles.

1. INTRODUCCIÓN

El transporte ferroviario es uno de los métodos más seguros y eficientes energéticamente para el transporte de viajeros o mercancías entre dos localizaciones conectadas por tierra. Esto es debido a que el coste energético por tonelada transportada es mejor que el de los otros medios de transporte terrestre.

Uno de los aspectos que los últimos años ha cobrado especial importancia en el desarrollo del transporte ferroviario es el impacto ambiental provocado por la construcción de nuevos trazados y por la explotación de los mismos.

Relacionado con la explotación, 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 el ruido, o subterráneos, donde la transmisión de vibraciones es la que crea más dificultades [1].

Las empresas del transporte ferroviario se plantean como objetivos: una mayor durabilidad del material rodante, una creciente reducción de los costes de mantenimiento y un aumento del confort y de la seguridad. Todo ello justifica el interés del estudio del comportamiento dinámico de la vía.

Es bien sabido que las irregularidades de perfil de las ruedas y de los carriles son la causa de las vibraciones producidas en el contacto rueda-carril y también la causa del ruido de rodadura. La irregularidad de perfil de ruedas y carriles genera fuerzas de contacto fluctuantes que son las responsables de la genera-

ción 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 del conjunto vía, eje ferroviario y 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 vías. El deterioro más importante se produce en la banda de rodadura de las ruedas, debido a que éste depende de la distancia recorrida [2].

Diversos autores [3-4] se han centrado en el estudio de las vibraciones generadas en una vía ferroviaria bajo la acción de vehículos móviles, y han presentado diferentes teorías y modelos analíticos. Dichos modelos suelen ser de media vía en recta en contacto con una rueda suspendida del bogie por medio de la suspensión primaria. Utilizan dos modelos básicos [5-7]: un modelo de parámetros de vía distribuidos a lo largo de la misma, modelo continuo, y un modelo de parámetros de vía discretos que permite considerar el efecto de la distancia entre traviesas, modelo discreto. En ambos casos el carril se modeliza como una viga de Euler o de Timoshenko. Los modelos analíticos de media vía, si bien han sido ampliamente utilizados, presentan el inconveniente de no considerar la interacción entre carriles; es decir la influencia de la fuerza fluctuante de contacto generada en un carril sobre la vibración en el otro carril. Esta interacción se produce tanto a través de la estructura de la vía como a través del eje de ambas ruedas.

Con el fin de analizar esta interacción, el trabajo presentado propone un modelo numérico de vía completa basado en el método de los elementos finitos, orientado a la caracterización del mecanismo de generación de vibraciones. Con dicho modelo se determina la respuesta en frecuencia de la vía y se compara con la respuesta proporcionada por modelos analíticos presentados en publicaciones anteriores [3-5]. Finalmente se comprueba si la interacción entre carriles es o no significativa.

El modelo se ha desarrollado empleando ANSYS 13, y se ha aplicado al estudio de tres tipos de vía: una vía clásica con traviesas de hormigón y balasto, una vía con fijaciones DFF –*Direct Fixation Fastening*– y una vía bloque sobre una base de hormigón. En todos los casos, la base de la vía se ha considerado rígida.

2. MODELIZACIÓN DE LA VÍA

Existen diversos tipos de vía con características diferentes por lo que se refiere a su capacidad de carga, a su rigidez vertical y transversal, y a su capacidad de atenuar la transmisión al entorno de las vibraciones generadas por la rodadura.

Una vía convencional está constituida por los carriles, las traviesas, actualmente de hormigón, las fijaciones de los carriles a las traviesas, y por último el balasto (Fig. 1).



Fig. 1. Vía convencional, con balasto y traviesas de hormigón monobloque.

El conjunto de las traviesas con las fijaciones es fundamental para la integridad de la vía y la correcta alineación de ambos carriles. La rigidez de las fijaciones, tanto vertical como transversal, debe ser la adecuada para atenuar la transmisión de vibraciones y al mismo tiempo garantizar la estabilidad dinámica de la circulación de los trenes.

El balasto actúa de soporte de toda la vía; evita el desplazamiento de las traviesas y reparte sobre la base de la vía las cargas originadas por el paso de los trenes lo más uniformemente posible. Asimismo, actúa de drenaje del agua de lluvia en vías al aire libre. La rigidez del balasto también tiene una influencia fundamental en la atenuación de la transmisión de vibraciones.

Para mejorar las propiedades anti-vibratorias de las vías y para reducir el mantenimiento que requiere el balasto de una vía convencional, se han desarrollado diversos tipos de vía sin balasto, en los que los carriles se fijan directamente a la base mediante fijaciones o a través de elementos intermedios que añaden masa vibrante al conjunto: vías con fijaciones DFF –*Direct Fixation Fastening*– vías bibloque, vías con losa flotante y otras. Estos tipos de vía férrea tienen como objetivo obtener una alta calidad, disminuyendo los costes de mantenimiento. Su colocación se realiza sin balasto y consta de una placa de hormigón que transmite a la plataforma tensiones uniformemente distribuidas y de menor valor que con balasto.

En el trabajo presentado, se han modelizado tres tipos de vía: la vía convencional con traviesas de hormigón y balasto, la vía sobre placa con fijaciones DFF (Fig. 2) en la que el carril se fija directamente a la base y la vía bibloque (Fig. 3).



Fig. 2. Vía sobre placa con fijaciones DFF. Línea 3 del Ferrocarril Metropolitano de Barcelona.



Fig. 3. Vía bibloque. Línea 1 del Ferrocarril Metropolitano de Barcelona.

Las fijaciones DFF consisten en una placa metálica fijada a la base de la vía mediante insertos metálicos y uniones roscadas, o bien directamente adherida a la base (DFF adherizada); entre la placa y la base se coloca una suela de elastómero como elemento antivibratorio. El carril se fija a la base mediante clips de diversos tipos. En algunos casos también se interpone una delgada suela de elastómero entre el carril y la placa.

Las vías bibloque es también una vía sobre placa, constituida por bloques de hormigón encajados en alojamientos de la base de la vía. Contienen elementos elastoméricos entre los bloques y la base, y también en la fijación entre el carril y los bloques.

3. MODELOS NUMÉRICOS DE VÍA

Una de las ventajas del cálculo mediante elementos finitos es el hecho de permitir introducir de forma detallada todos los parámetros geométricos y de materiales que intervienen o que se juzgan necesarios en el problema a resolver. Así, por ejemplo, en los modelos numéricos presentados en este trabajo, los parámetros introducidos se refieren a las propiedades de los materiales, las constantes elásticas y factores de amortiguamiento del carril, las sujeciones, las traviesas y el balasto, a parte de la definición geométrica de la vía: distancia entre carriles, distancia entre traviesas y longitud de vía considerada.

Se han desarrollado tres modelos numéricos basados en elementos finitos, utilizando el programa ANSYS 13. Con ellos se pretende caracterizar la respuesta dinámica de la vía al aplicar fuerzas excitadoras verticales sobre los carriles.

Los dos primeros modelos se basan en la simetría de la vía en dirección longitudinal y consideran media vía. El primero describe media vía tipo DFF en la que el carril se fija directamente a la base por medio de las fijaciones y el segundo modelo representa media vía bibloque sobre base de hormigón.

El tercer modelo se utiliza para describir una vía convencional completa. El modelo permite así estudiar otros aspectos del comportamiento dinámico de la vía no contemplados en los modelos de media vía; por ejemplo la interacción entre ambos carriles a través de las traviesas y el balasto.

Los diferentes componentes de la vía se han caracterizado utilizando diversos elementos de la librería que ofrece el ANSYS 13 [8]. 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 [6].

Las Figuras 4, 5 y 6 muestran la representación ANSYS de la media vía tipo DFF, media vía bibloque y de la vía convencional completa respectivamente. Asimismo la Fig. 7 muestra un esquema de los elementos que conforman el modelo de vía convencional completa.

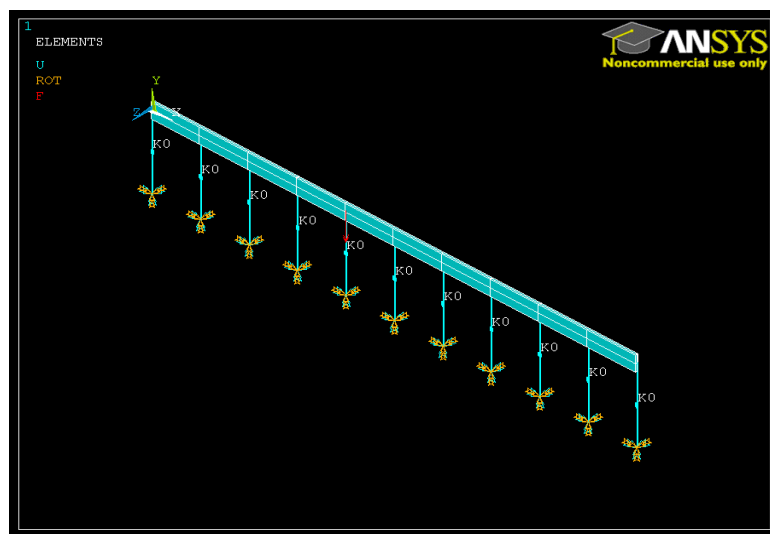


Fig. 4. Modelo numérico de media vía DFF.

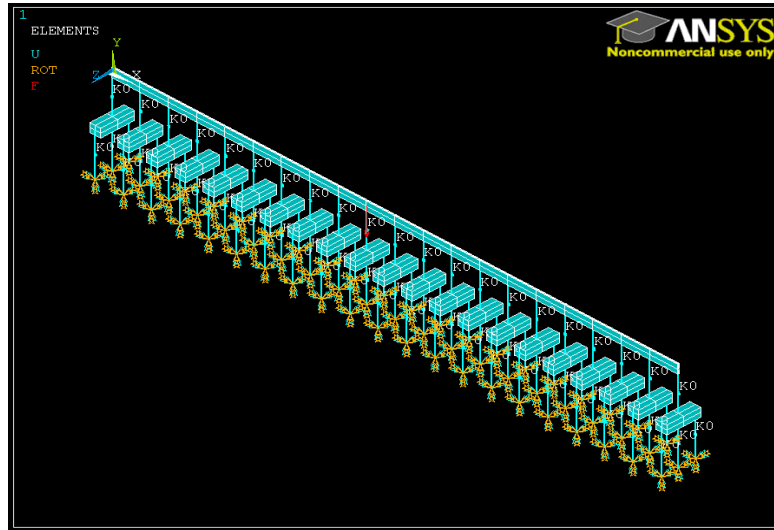


Fig. 5. Modelo numérico de media vía bloque.

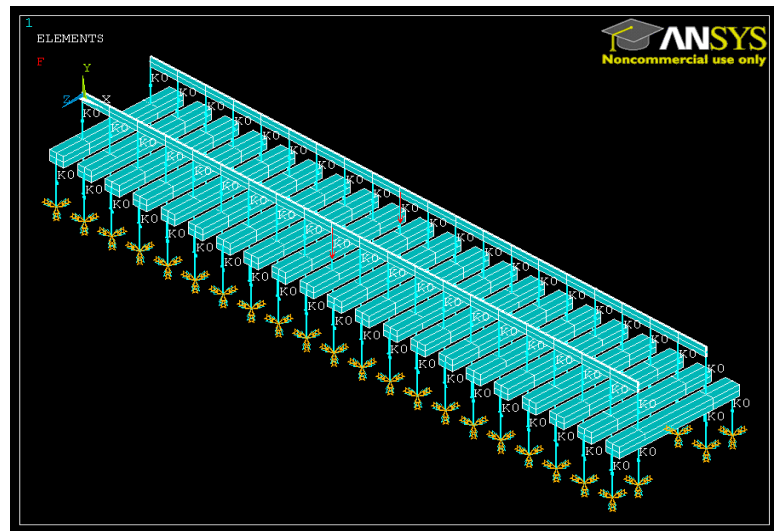


Fig. 6. Modelo numérico de vía convencional completa sobre balasto.

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 (elementos discretos de viga). La longitud de estos elementos corresponde a la distancia entre traviesas o fijaciones; de este modo se utilizan los nodos de los extremos para asociarlos a las fijaciones del carril. El elemento tipo viga es especialmente indicado ya que permite introducir los parámetros reales del carril: densidad, módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson, factor de amortiguamiento estructural y los parámetros geométricos de sección y momento de área de segundo orden.

Las fijaciones del carril son consideradas en los modelos como elementos tipo resorte lineal y amortiguador de histéresis que conectan el carril con las traviesas.

Las traviesas se pueden representar de dos maneras distintas. En algunos modelos de media vía, las traviesas se consideran como masas puntuales de valor igual al de media traviesa. En nuestro trabajo en el modelo de vía convencional completa y de media vía bloque, las traviesas se modelizan, como en el caso del carril, mediante elementos tipo viga de Timoshenko. En el caso del modelo de media vía tipo DFF obviamente no se contemplan las traviesas.

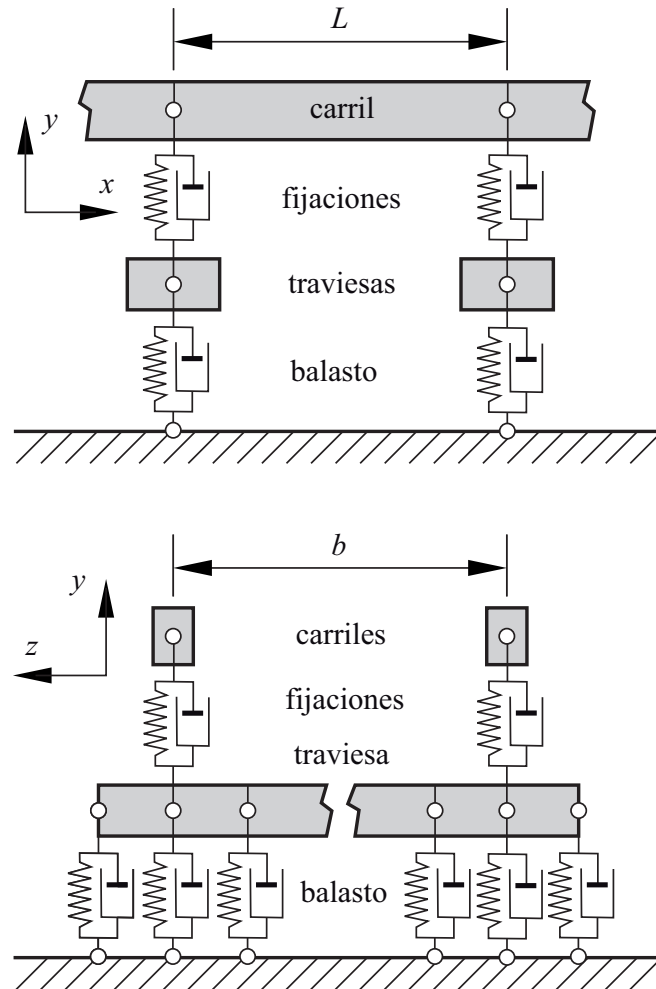


Fig. 7. Modelo numérico de vía convencional completa sobre balasto.

Finalmente, el balasto se modeliza por medio de una distribución de resortes 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. En el caso de los modelos de media vía, se modeliza igualmente como resortes discretos conectados a los nodos de las traviesas. Estas últimas están representadas en algunos modelos como masas puntuales y en otros como elementos tipo vigas de Timoshenko.

Otro aspecto fundamental en la definición de los modelos son sus 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 [3-4]. Cabe resaltar que, según esta hipótesis, no tiene sentido utilizar un modelo numérico de vía DFF completa o de vía bloque completa, ya que este hecho impide la interacción entre ambos carriles.

Al contemplar sólo fuerzas excitadoras verticales sobre los carriles, los grados de libertad de los nodos de los modelos 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 sean similares a las de una vía recta infinitamente larga.

Todos los elementos utilizados en los modelos son de comportamiento lineal. En el caso de elementos que representan la rigidez de elastómeros, se considera su rigidez dinámica. En el caso del balasto, se

utiliza un valor de rigidez medio representativo del comportamiento del balasto consolidado después de un tiempo de servicio prolongado [9-10].

El tipo de análisis empleado para caracterizar el comportamiento de la vía es el análisis dinámico. Este análisis permite obtener la variación temporal de desplazamientos, tensiones, deformaciones y fuerzas en una estructura como respuesta a una combinación de cargas que varíen con el tiempo. En este tipo de análisis los efectos de la inercia y del amortiguamiento son fundamentales. En el caso concreto del trabajo que se presenta, las cargas consideradas son fuerzas verticales armónicas de frecuencia variable, ya que se pretende obtener la respuesta frecuencial de la vía.

La ecuación general a resolver en un análisis dinámico es el siguiente:

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) = F(t) \quad (1)$$

donde M es la matriz de inercia, C es la matriz de amortiguamiento viscoso, K es la matriz de rigidez, \ddot{u} , \dot{u} , u son respectivamente los vectores de aceleración, velocidad y desplazamiento asociados a las coordenadas nodales, y finalmente F es el vector de fuerzas externas dependiente del tiempo. En el caso de amortiguamiento estructural o de histéresis, y siempre para soluciones armónicas del sistema de ecuaciones, la matriz de amortiguamiento viscoso desaparece y se introduce una matriz de rigidez de componentes complejos.

ANSYS 13 utiliza tres métodos diferentes para resolver el conjunto de ecuaciones, utilizándose en todos ellos la discretización e integración temporal.

En este trabajo se ha utilizado el método de integración directa en el tiempo del modelo completo. En este método se definen los N grados de libertad que caracterizan el sistema y se resuelve, para cada instante de la integración, la ecuación dinámica general (1). Se trata del método más fácil de utilizar y el más general, pero es el que requiere más tiempo de cálculo.

Los resultados obtenidos con los modelos numéricos se comparan en el apartado siguiente con los resultados obtenidos a partir de modelos analíticos de media vía desarrollados en trabajos anteriores y presentes en la bibliografía. Se suelen utilizar dos modelos analíticos distintos. Para una vía convencional éstos son:

El modelo continuo, en el que las fijaciones del carril y el balasto se describen como capas elásticas con amortiguamiento, mientras que las traviesas se consideran como una masa uniformemente distribuidas en la dirección del carril.

El modelo discreto, o modelo periódico, en el que las fijaciones y el balasto se consideran como elementos elásticos con amortiguamiento separados la distancia entre fijaciones, y las traviesas se consideran como masas concentradas.

En ambos 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 100 km/h [10].

Para otros tipos de vía se utilizan los mismos modelos adaptados a sus características particulares.

La Fig. 8 muestra un esquema del modelo continuo de media vía convencional, modelo utilizado en la comparación con los resultados de los modelos numéricos presentada en el siguiente apartado.

4. COMPARACIÓN ENTRE LOS MODELOS NUMÉRICOS Y EL MODELO ANALÍTICO

Con el fin de comprobar la bondad de los modelos numéricos presentados, se compara la respuesta dinámica de la vía obtenida con dichos modelos con la respuesta que proporciona el modelo analítico continuo de media vía. La respuesta dinámica se describe en el dominio de la frecuencia por medio de la receptancia vertical del carril, función que relaciona el desplazamiento vertical de un punto del carril con la fuerza armónica vertical aplicada sobre el mismo punto, o un punto distinto, para cada frecuencia f . La receptancia se describe mediante la siguiente expresión:

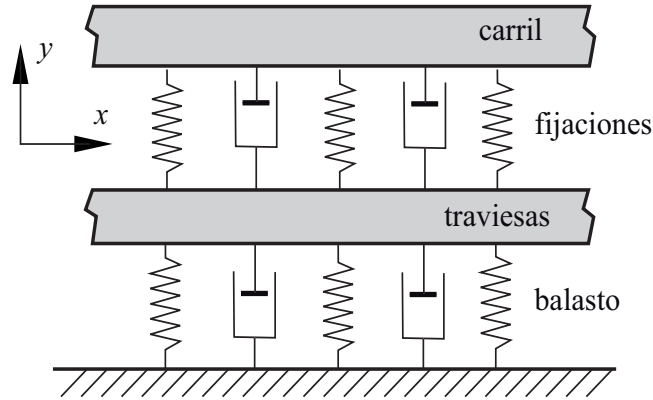


Fig. 8. Modelo analítico continuo de vía convencional con balasto.

$$R(f) = \frac{y_c(f)}{F(f)} \quad (2)$$

con

$$F(f) = F e^{j2\pi ft} \quad ; \quad y_c(f) = y_c e^{j(2\pi ft + \varphi)}$$

donde y_c representa la amplitud del desplazamiento vertical del carril, F representa la amplitud de la fuerza vertical armónica aplicada al carril y φ es la fase de la receptancia.

La comparación se realiza para los tres tipos de vía considerados: vía con fijaciones DFF, vía bloque y por último la vía convencional con balasto y traviesas monobloque de hormigón. La fuerza armónica excitadora se aplica al carril justo encima de una traviesa o una fijación. Los parámetros considerados en la comparación son los que se recogen en la Tabla 1.

En la Fig. 9 se presenta la comparación de la magnitud de la receptancia de la vía DFF en el punto donde se aplica la fuerza armónica excitadora, calculada con el modelo analítico y con el modelo numérico. Ambos modelos son de media vía. Se observa que las diferencias no son significativas para el rango de frecuencias comprendido entre 0 y 600 Hz, el cual comprende el rango de frecuencias de interés mencionado anteriormente. La frecuencia propia que se observa está asociada al modo propio de vibración vertical del carril sobre las fijaciones elásticas.

La Fig. 10 corresponde a la misma comparación para el caso de la vía bloque, también empleando los modelos de media vía. Las dos receptancias son prácticamente idénticas en todo el rango de interés, lo que corrobora la equivalencia del modelo numérico con el analítico. Se observan dos frecuencias propias de vibración de la vía a 58 y 351 Hz respectivamente. La primera corresponde al modo propio en el que el conjunto carril y bloques tienden a vibrar en fase. La segunda corresponde al modo propio en el que el carril y los bloques tienden a vibrar en contrafase. Las características de este segundo modo dependen fundamentalmente de la rigidez y amortiguamiento de las fijaciones elásticas entre carril y bloques.

La Fig. 11 nos muestra la comparación de la receptancia de la vía convencional con balasto, pero en este caso empleando el modelo numérico completo. 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.

El primer modo propio coincide en frecuencia y amplitud para ambos modelos. No así el segundo, en el cual la frecuencia propia obtenida con el modelo completo de vía es ligeramente inferior. Esta diferencia debe atribuirse a la consideración de la rigidez a flexión de las traviesas, no contemplada en el modelo analítico ni en el caso de un modelo numérico de media vía, en los que las traviesas se consideran como masas puntuales. Hay que resaltar que la diferencia es poca a causa de la presencia del balasto bajo las traviesas, el cual, y debido a su rigidez, dificulta el movimiento a flexión de las mismas.

Tabla 1. Valores de los parámetros de vía utilizados.

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
Vía convencional con traviesas monobloque sobre balasto	
Longitud de las traviesas	2,56 m
Masa de las traviesas	324 kg
Densidad del hormigón	1759 kg/m ³
Módulo de elasticidad del hormigón	27,6 GPa
Coefficiente de Poisson del hormigón	0,175
Sección de las traviesas	72 · 10 ⁻³ m ²
Momento de área de segundo orden de las traviesas	34,6 · 10 ⁻⁵ m ⁴
Factor de pérdidas de las traviesas	0,1
Rigidez de las fijaciones	115,2 MN/m
Factor de pérdidas de las fijaciones	0,2
Rigidez del balasto	13,74 MN/m
Factor de pérdidas del balasto	0,2
Vía DFF sin traviesas	
Rigidez de las fijaciones	19,5 MN/m
Factor de pérdidas de las fijaciones	0,4
Vía bibloque	
Rigidez bajo carril	115,2MN/m
Factor de pérdidas bajo carril	0,2
Rigidez bajo bloques	17,58MN/m
Factor de pérdidas bajo bloques	0,2
Masa de un bloque de hormigón	94,8 kg

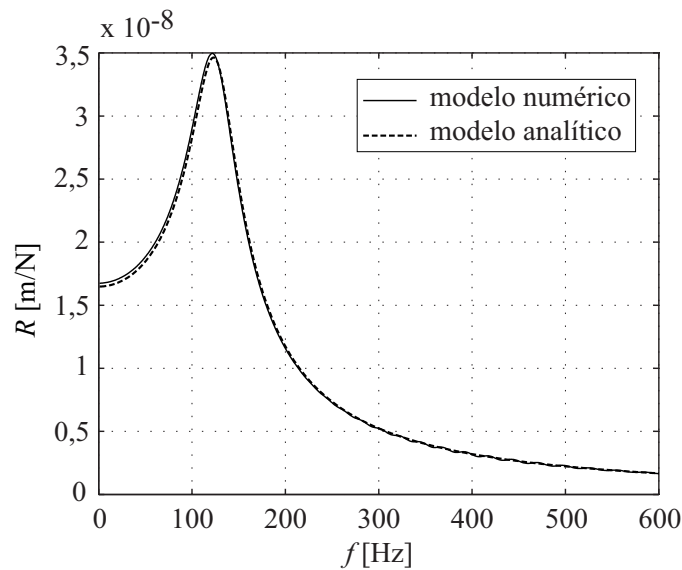


Fig. 9. Comparación de la receptancia vertical de la vía DFF determinada con los modelos numérico y analítico.

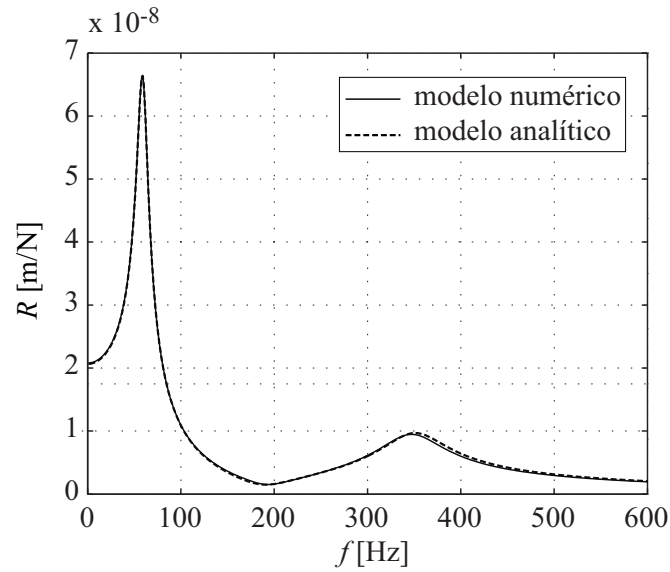


Fig. 10. Comparación de la receptancia vertical de la vía bloque determinada con los modelos numérico y analítico.

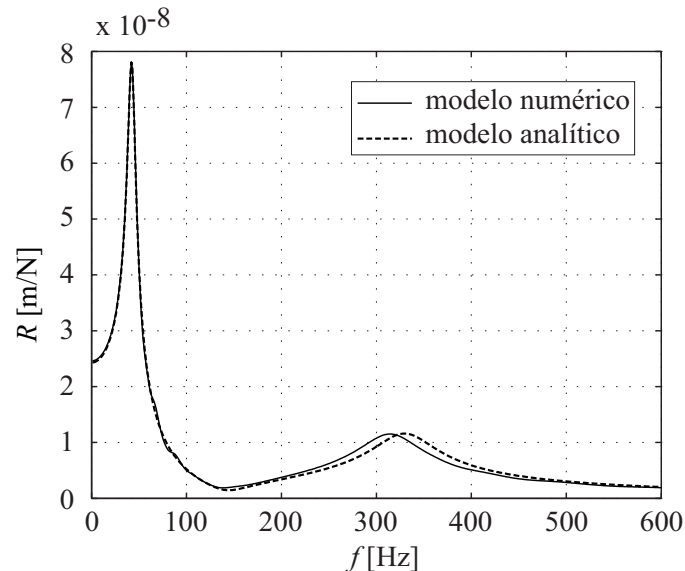


Fig. 11. Comparación de la receptancia vertical de la vía convencional determinada con el modelo numérico completo y el modelo analítico de media vía.

El modelo numérico de vía completa permite comparar la vibración en ambos carriles cuando se aplica una única fuerza excitadora sobre uno de ellos. La Fig. 12 muestra la receptancia del carril sobre el que se aplica la fuerza excitadora armónica –carril 1– y la del carril opuesto –carril 2– obtenidas con el modelo numérico completo de vía convencional. El punto considerado en ambos carriles se sitúa sobre la misma traviesa. La Fig. 13 muestra la amplitud del movimiento vertical de ambos carriles como resultado del análisis harmónico de Ansys para una frecuencia de excitación de 1 Hz.

Es evidente la diferencia entre las amplitudes de las receptancias en ambos carriles en todo el rango de frecuencias presentado. La atenuación de la vibración generada por la fuerza excitadora es importante, con lo que se concluye que la interacción entre carriles es pequeña. Este hecho justifica la utilización de los modelos analíticos de media vía que han empleado y emplean muchos de los investigadores del ámbito de la generación y transmisión de vibraciones producida por el transporte ferroviario.

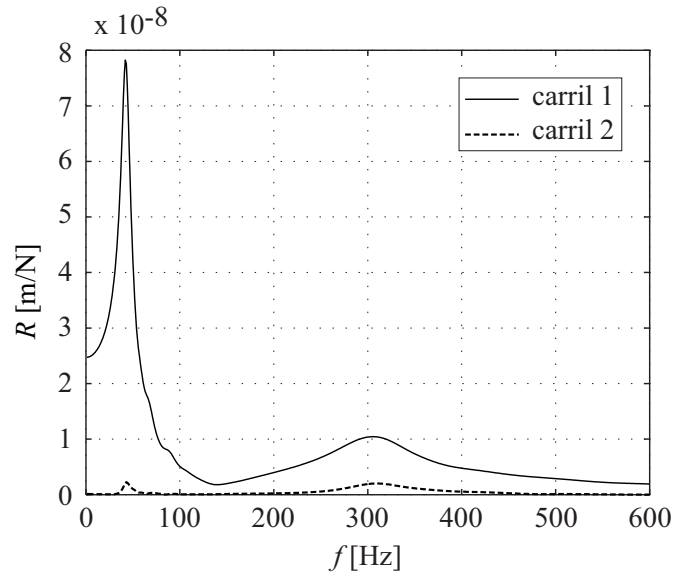


Fig. 12. Receptancia vertical de la vía convencional determinada con el modelo numérico completo; comparación de la receptancia en el carril sobre el que se aplica la fuerza –carril 1– con la receptancia en el carril opuesto –carril 2–.

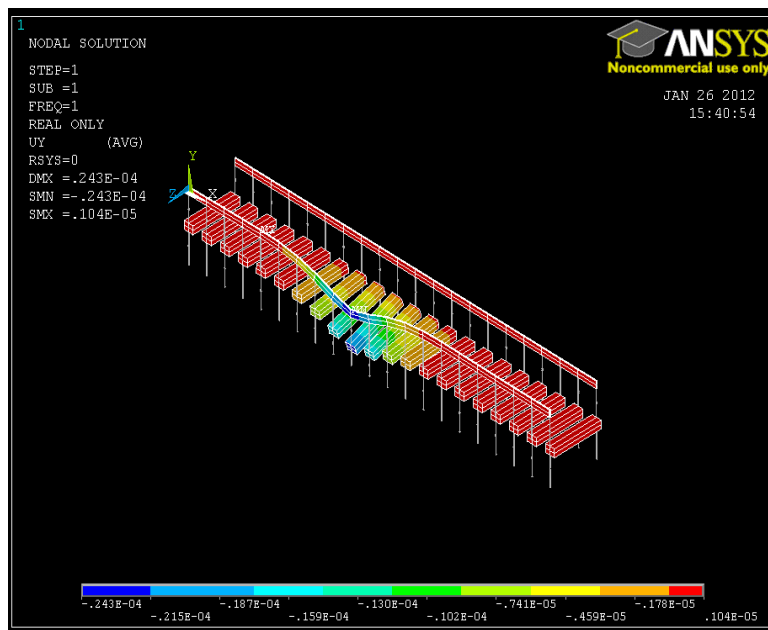


Fig. 13. Resultado del análisis harmónico en el punto de excitación en la frecuencia 1Hz del modelo numérico de vía convencional completa sobre balasto.

Es evidente la diferencia entre las amplitudes de las receptancias en ambos carriles en todo el rango de frecuencias presentado. La atenuación de la vibración generada por la fuerza excitadora es importante, con lo que se concluye que la interacción entre carriles es pequeña. Este hecho justifica la utilización de los modelos analíticos de media vía que han empleado y emplean muchos de los investigadores del ámbito de la generación y transmisión de vibraciones producida por el transporte ferroviario.

5. CONCLUSIONES Y FUTUROS TRABAJOS

La comparación entre la receptancia de la vía obtenida con los modelos numéricos y la receptancia que proporciona el modelo analítico, tanto para la vía DFF como para la vía bibloque y la vía convencional, muestran una muy buena concordancia. Este hecho demuestra la validez de los modelos numéricos empleados. A través de dos metodologías diferentes se han obtenido resultados similares.

Se constata que el modelo numérico de una vía completa permite estudiar aspectos del comportamiento vibratorio de la vía, como por ejemplo la relación entre los niveles de vibración en diferentes localizaciones de la vía, que otros modelos no pueden facilitar. Por ejemplo, utilizando el modelo numérico de vía convencional completa y para los parámetros descritos, se ha comprobado que no se produce una interacción significativa entre ambos carriles

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.

Si bien los modelos analíticos han sido contrastados experimentalmente en investigaciones anteriores, está previsto realizar en un futuro próximo medidas experimentales para validar directamente los modelos numéricos presentados en este trabajo. Especialmente el modelo de vía completa. También está previsto desarrollar modelos numéricos del conjunto eje ferroviario más suspensión primaria para analizar la transmisión de vibraciones entre ambos carriles a través de dicho conjunto.

REFERENCIAS

- [1] “Transit noise and vibration impact assessment”, Department of Transportation, Federal Transit Administration, USA (2006)
- [2] Orta, J., Cardona, J., Romeu, J., Sánchez, A., “Influencia de la Rugosidad del carril en la generación de vibraciones en infraestructuras ferroviarias”, *Congreso Acústica 2008*, Coimbra, Portugal (2008)
- [3] Otero, J., Martínez, J., de los Santos, M.A., “Evaluación de las vibraciones generadas al paso de un tren considerando diferentes tipologías de vía”, *IX Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica*, Las Palmas de Gran Canaria, España, 17-19 de Noviembre, 1403-1406 (2009)
- [4] Otero, J., “Contribución al estudio de las vibraciones producidas por el contacto rueda-carril y su transmisión al entorno”, *Tesis Doctoral*, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España (2009)
- [5] Otero, J., Martínez J., de los Santos, M.A., Cardona, S., “A mathematical model to study railway track dynamics for the 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), 62-71 (2012)
- [6] Iwnicki, S., *Handbook of railway vehicle dynamics*, Taylor and Francis Group (2006)
- [7] Martínez, J., de los Santos, M.A., Cardona, S., “A convolution method to determine the dynamic response in a railway track submitted to a moving vertical excitation”, *Machine Vibration*, **4**, 142-146 (1995)
- [8] Ansys Release 13 Multiphysics, *Ansys Release13 Documentation*, Ansys Inc. (2011)
- [9] Wu, T.X., Thompson, D.J., “A hybrid model for the noise generation due to railway wheel flats”, *Journal of Sound and Vibration*, **251**(1), 115-139 (2002)
- [10] Nielsen, J.C.O., Fredo, C.R., “Multi-disciplinary optimization of railway wheels”, *Journal of Sound and Vibration*, **293**(3-5), 510-521(2006)

VIBRATION RESPONSE OF A RAILWAY TRACKS OBTAINED USING NUMERICAL MODELS

Abstract – In the last forty years, researchers have developed models of wheel-rail contact force in order to study vibrations and rolling noise caused by railway traffic. These models range from analytical models, which consider a single rail of a railway track in contact with a rigid wheel attached to the bogie by means of the primary suspension, to numerical models based on finite element methods, boundary element, and mixed methods. Unlike analytical models, numerical models allow us to characterize more precisely the different components of

railway track structure and consider the interaction between the entire track and a complete vehicle wheel-set. The study of the various elements constituting the set of the railway track, the wheel-set and the primary suspension, as well as the knowledge of their influence in vibration generation and transmission due to train passage is of great interest when evaluating the possible vibration effects in the railway surrounding areas. This paper presents numerical models of the track structure based on the finite element method. It is devoted to the study of the vibration response caused by vertical forces applied at any location on the rails. The numerical results are compared with analytical results previously presented and developed in the bibliography.

Keywords – Vibrations, Finite elements, Railway tracks.