

Influencia de la flexibilidad de la vía sobre puente en el comportamiento dinámico del tren de alta velocidad

(Recibido: 25/04/2016; Aceptado: 13/06/2016)

Olmos, J.M.¹; Astiz, M.A.²

¹ Escuela de Ingeniería de Caminos Canales y Puertos y de Ingeniería de Minas. Universidad Politécnica de Cartagena. Paseo Alfonso XIII, nº 52 - 30203 Cartagena.

² Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid. C/ Profesor Aranguren nº 3 - 28040 Madrid.

Teléfono: 968 32 57 68

Email: josemanuel.olmos@upct.es

Resumen. En este artículo se estudia la influencia de la flexibilidad de la vía sobre viaducto en la respuesta dinámica de la locomotora del tren de alta velocidad tipo articulado AVE S-100, mediante simulaciones numéricas realizadas con un modelo no lineal de interacción dinámica vehículo-vía. Los parámetros de la respuesta del vehículo estudiados han sido la aceleración lateral y vertical de la caja del vehículo asociada al confort de los viajeros. Los resultados observados en las simulaciones muestran la escasa influencia de la flexibilidad de la vía en la respuesta del vehículo para velocidades de viaje menores o iguales a 300 km/h, mientras que para velocidades mayores dicha influencia es apreciable.

Palabras clave. Flexibilidad de la vía; Interacción dinámica tren-puente; Tren de alta velocidad.

Abstract. In this paper the influence of the railway track flexibility on the dynamic response of a locomotive, which belongs to the high-speed train type articulated AVE S-100, travelling on a short track length is studied by means of numeric simulations carried out with a nonlinear train-track interaction model. Lateral and vertical car body accelerations have been studied as dynamics vehicle response indices. The observed results of the numerical simulations carried out show the low influence of the track flexibility on the vehicle response for train speeds lower or equal to 300 km/h, whereas for higher train speeds this influence is appreciable.

Keywords. High-speed train; Railway track flexibility; Train-bridge dynamic interaction

1. Introducción

Para estudiar el confort de los viajeros y la seguridad del tráfico de un tren de alta velocidad viajando sobre un viaducto es necesario reproducir la respuesta dinámica del tren y del puente con modelos complejos que consideren la interacción entre el comportamiento de estos dos sistemas dinámicos. Se trata de modelos multibody para el tren y de elementos finitos para el puente.

Estos modelos deben reproducir adecuadamente la fuerza lateral ejercida por los ejes del tren contra la vía, fuerza presente en los índices de seguridad del tráfico. Para ello, se hace necesario considerar las no linealidades asociadas, por un lado, al rozamiento entre rueda y carril, y por otro, a la geometría de los perfiles de estos dos elementos en contacto, según se desprende de los trabajos de Antolín et al. (2013), Sabana et al, (2007) y Olmos (2016).

Es difícil encontrar en la literatura científica estudios de interacción vehículo-puente realizados con modelos que consideren, a la misma vez, la flexibilidad de la vía y la teoría no lineal del contacto entre rueda y carril, incluyendo la geometría de los perfiles de estos elementos (rueda y carril).

Los trabajos de Antolín et al. (2013) y Dinh et al. (2009) son ejemplos de estudios de interacción tren de alta velocidad – puente donde se consideran las no linealidades derivadas del contacto de cuerpos en movimiento (rueda y carril), sin embargo, los modelos utilizados no incluyen la vía. En estos modelos los carriles (en todos sus puntos) están rígidamente unidos al tablero del puente.

Por otro lado, se han realizado estudios de interacción puente – tren de alta velocidad (Guo et al. (2012) y Yang et al. (2004)) con modelos que consideran la flexibilidad de la vía (carriles, traviesas y balasto sobre el puente), aunque se trata de modelos lineales que no tienen en cuenta la teoría del contacto rueda-carril. Estos modelos lineales sobreestiman la fuerza lateral eje-vía (Olmos (2016)).

En un trabajo anterior de los autores, Olmos y Astiz (2013), se realiza un estudio de la interacción dinámica entre el tren y un puente alto con un modelo que incluye la flexibilidad de la vía y el rozamiento entre la rueda y el carril aunque con un perfil de rueda cónica (sin pestaña). La Fig nº1 corresponde al modelo de elementos finitos de puente y la vía de este último estudio citado.

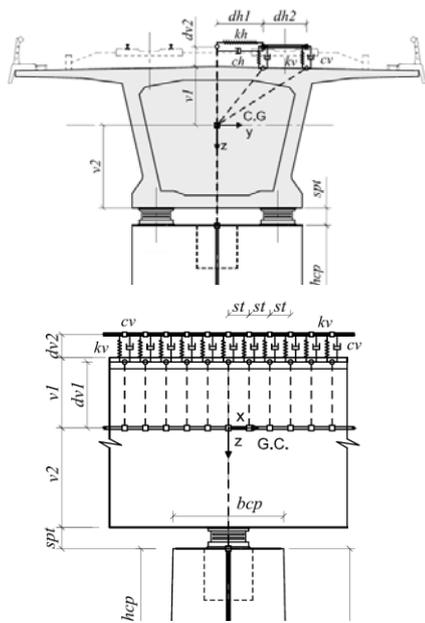


Fig. 1. Modelo de elementos finitos de puente y vía. (Olmos y Astiz, 2013).

Como se comprobó durante el desarrollo del citado trabajo, (Olmos y Astiz, 2013), la consideración de la flexibilidad de la vía en modelos dinámicos no lineales de interacción tren-puente presenta una serie de inconvenientes ligados, por una parte, al aumento de los grados de libertad del sistema puente-vía, dentro de un problema dinámico no lineal, y por otra parte, a la introducción de las altas frecuencias de oscilación de la vía en la respuesta dinámica del sistema puente-vía. Estos inconvenientes implican un aumento del coste computacional para la determinación de la solución numérica del problema de interacción dinámica no lineal tren-puente.

En el caso de líneas de alta velocidad, donde los puentes suelen tener longitudes en torno al kilómetro, la inclusión de la vía en el modelo de interacción tren-puente hace computacionalmente muy complicado obtener resultados de respuesta dinámica de estos dos subsistemas con ordenadores corrientes en tiempos razonables.

Por todo ello, el objetivo del presente estudio es obtener una primera aproximación del error que se comente al no considerar la flexibilidad de la vía en los modelos de interacción dinámica no lineal entre el tren de alta velocidad y el puente.

En este pequeño estudio se comparan las diferencias que se producen en el comportamiento de la máquina del tren articulado AVE S-100 al considerar, o no, la flexibilidad de la vía cuando viaja por un tramo corto de vía sobre puente a varias velocidades.

2. Modelos utilizados.

2.1. Modelo del vehículo

Para el tren se ha utilizado un modelo 3D multibody formado por una serie de cuerpos rígidos, correspondientes a los coches, bogies y ejes, que están unidos entre sí mediante las suspensiones del tren.

Existen dos tipos de suspensiones en un tren. La suspensión primaria une los ejes con los bogies del vehículo mediante un sistema de muelles lineales y amortiguadores viscosos dispuestos en vertical y también en horizontal. La suspensión secundaria une los bogies de los vehículos con los coches, y también está compuesta por el mismo tipo de elementos que aparecen en la suspensión primaria. La Fig. 2 representa este modelo para un vehículo tipo convencional como es el empleado en este estudio: la máquina del tren AVE S-100 (Tipo Thalys o TGV). Las características mecánicas de este vehículo se pueden encontrar en el trabajo de Olmos (2016). (Ver Fig. 3).

La Ec (1) es la ecuación de movimiento del sistema dinámico vehículo. Donde $\mathbf{u}_v, \mathbf{u}_v, \mathbf{u}_v$ son los vectores aceleración, velocidad y desplazamiento según los grados de libertad considerados en los coches, bogies y ejes del tren. $\mathbf{M}_v, \mathbf{C}_v, \mathbf{K}_v$ son las matrices de masa, amortiguamiento y rigidez del sistema dinámico tren.

$$\mathbf{M}_v \cdot \ddot{\mathbf{u}}_v(t) + \mathbf{C}_v \cdot \dot{\mathbf{u}}_v(t) + \mathbf{K}_v \cdot \mathbf{u}_v(t) = \mathbf{F}_{vb}(t) \quad (1)$$

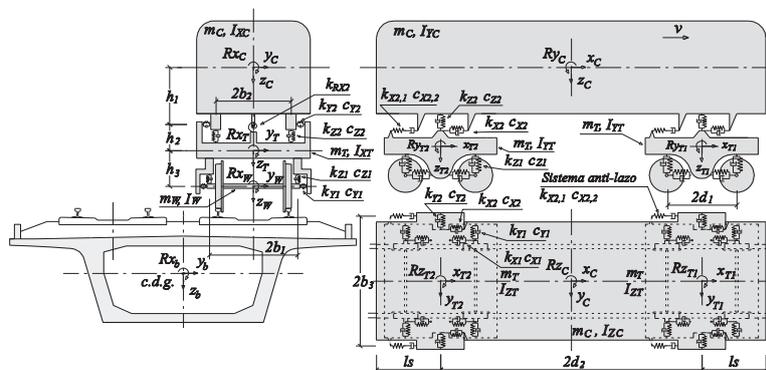


Fig. 2. Modelo multibody 3D de un vehículo tipo convencional.



Fig. 3. Tren articulado tipo AVE S-100.

2.2. Modelos de vía sobre puente

En el presente estudio se ha supuesto que el tablero del puente sobre el que descansa la vía es infinitamente rígido. De esta forma se elimina de la respuesta que del vehículo la excitación debida a los movimientos del puente, para obtener solamente la debida a los movimientos de la vía y a las irregularidades geométricas de la misma.

El primer modelo de vía es un modelo de vía rígida. En este modelo no existen movimientos de los carriles en ninguno de sus puntos de contacto con las ruedas durante el viaje del tren.

El segundo modelo es un modelo de vía flexible. Este modelo de elementos finitos construido para la vía flexible sobre puente se muestra en las Figuras 4 y 5.

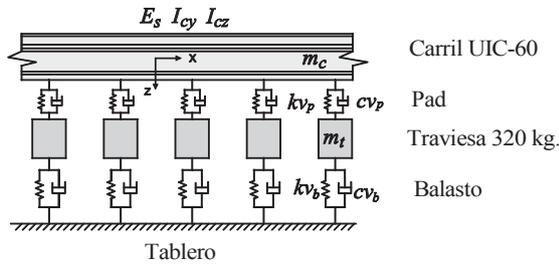


Fig. 4. Modelo vía flexible. Vista longitudinal

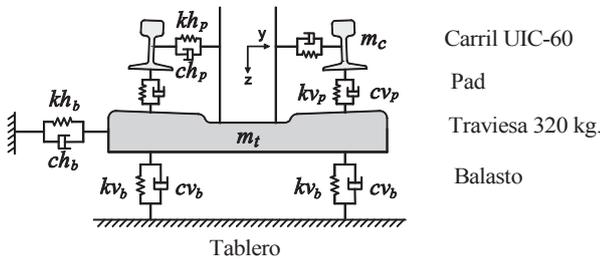


Fig. 5. Modelo vía flexible. Vista transversal.

En este modelo se han empleado elementos muelle lineal-amortiguador viscoso (en paralelo) tanto horizontales como verticales para modelar el balasto y los pad, y elementos barra y viga para las traviesas monobloque de 320 kg. y los carriles de acero UIC-60 (60.34 kg/m) respectivamente. Los elementos viga de los carriles son elementos finitos, con comportamiento elástico y lineal, con funciones de forma hermiticas. Estos elementos tienen una longitud igual a la separación entre traviesas (60 cm). A partir los movimientos en los nudos de estos elementos y de las mencionadas funciones de forma se obtienen los movimientos de los puntos de los carriles en contacto con los ejes del vehículo.

Este modelo de vía es similar a los empleados en los trabajos de Yang et al. (2004) y Guo et al. (2012) para vía sobre puente. En cuanto a los parámetros de rigidez y amortiguamiento del balasto y de los pad se han considerado los recogidos en la tabla 1.

Tabla 1. Constantes de rigidez y amortiguamiento de la vía.

Pad	Rigidez (MN/m)		Amortiguamiento (MNs/m)	
	kv_p	kh_p	cv_p	ch_p
	100	43	0.096 (80% crit.)	0.063 (80%)
Balasto	Rigidez (MN/m)		Amortiguamiento (MNs/m)	
	Kv_b	Kh_b	cv_b	ch_b
	100	37	0.05 (20% crit.)	0.087(40%)

Estos parámetros son una adaptación de los empleados por Zhaia et al. (2004) y Melis (2007) para el comportamiento vertical de la vía y los recogidos en Iwnichi (1999) para el horizontal.

La ecuación de movimiento del sistema dinámico vía se puede expresar de la siguiente forma (Ec. (2)):

$$\mathbf{M}_b \cdot \ddot{\mathbf{u}}_b(t) + \mathbf{C}_b \cdot \dot{\mathbf{u}}_b(t) + \mathbf{K}_b \cdot \mathbf{u}_b(t) = \mathbf{F}_{bv}(t) \quad (2)$$

Las variables de la Ec. (2) son análogas a las de la Ec (1) y corresponden ahora al modelo de elementos finitos descrito de vía flexible.

2.3. Modelo de irregularidades de la vía.

Este estudio tiene en cuenta perfiles de irregularidades de alineación vertical, lateral y de sobre-elevación (torsión) de la vía.

Las irregularidades de la vía se pueden considerar como un proceso estocástico estacionario y generarse numéricamente a partir de una función de densidad espectral de potencia. Para la obtención de los perfiles de irregularidades citados se ha seguido el procedimiento descrito por Yang et al. (2004), generando tramos de irregularidades de 300 m y ensamblándolos convenientemente. La calidad de la vía elegida, para la vía rígida y la flexible, ha sido de clase 5 F.R.A. (Yang et al (2004)). En esta clase vía tiene una desviación máxima en vertical de 4.63 mm. y en horizontal de 4.25 mm. El rango de longitudes de onda considerado ha sido el comprendido entre 3 m. y 70 m. La vía con estas irregularidades se puede considerar una vía de alta velocidad no muy bien conservada. (UNE – EN 13848-5).

2.4. Modelo de interacción eje-vía

Los vectores $\mathbf{F}_{vb}(t)$ y $\mathbf{F}_{bv}(t)$ de la Ec. 1 y Ec. 2 son vectores de fuerzas de interacción o de contacto entre la vía y el tren actuando según los grados de libertad del vehículo y de la vía respectivamente. Estas fuerzas son función no lineal de los movimientos relativos eje-vía. Su formulación, que tiene en cuenta la teoría del contacto no lineal de Kalker (1979), con la simplificación de Shen (1983), y la geometría completa del perfil de rueda S-1002 y del carril UIC-60, está recogida en Olmos (2016). (Coeficiente de rozamiento utilizado en el contacto $C=0.3$).

3. Resultados observados de las simulaciones realizadas.

Las simulaciones realizadas han consistido en el viaje de la máquina del tren AVE S-100 sobre un tramo de 400 m de vía, rígida primero y flexible después, a nueve velocidades distintas comprendidas entre 200 y 360 km/h.

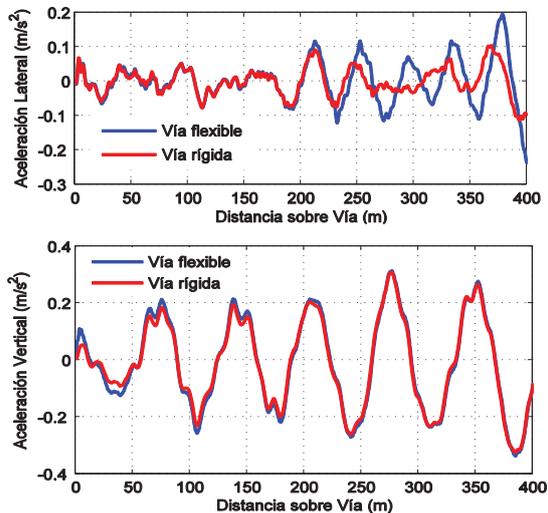


Fig. 6 . Aceleraciones lateral y vertical de la caja de la máquina del AVE S-100 viajando a 320 km/h por vía rígida y flexible.

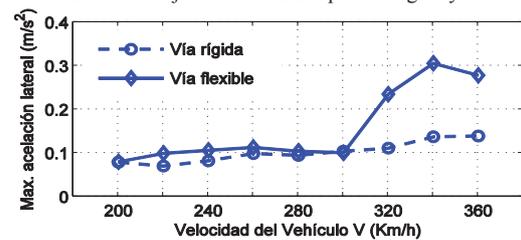


Fig. 7. Máximas aceleraciones laterales de la caja de la máquina del AVE S-100 para varias velocidades de viaje.

En la Fig. 6a se observa un aumento de la aceleración lateral del vehículo cuando viaja por vía flexible respecto a cuando lo hace por vía rígida. Los movimientos de la vía excitan lateralmente al vehículo a esa velocidad. Sin embargo, para esa misma velocidad de viaje, las aceleraciones verticales de la caja del vehículo prácticamente no se ven afectadas por la flexibilidad de la vía (Fig. 6b).

En la Fig. 7 se observa que las máximas aceleraciones laterales del vehículo cuando se considera la flexibilidad de la vía sólo son significativamente mayores que las registradas con vía rígida para velocidades de viaje mayores de 300 km/h. Se ha comprobado que para esas altas velocidades los desplazamientos relativos rueda-carril debidos en parte a las irregularidades de la vía y a los movimientos de la vía flexible hacen que se produzca el contacto de la pestaña con el carril incrementándose también significativamente la fuerza lateral eje-vía. Se ha comprobado también que no existen incrementos significativos de la aceleración vertical del vehículo cuando se considera la flexibilidad de la vía para ninguna de las velocidades de viaje ensayadas

4. Conclusiones.

Se ha conseguido una primera aproximación al error que se comete en la respuesta dinámica del vehículo en los estudios de interacción no lineal vehículo de alta velocidad - puente por no tener en cuenta la flexibilidad de la vía.

Por otra parte, por la gran influencia que tienen las irregularidades de la vía en el comportamiento lateral del vehículo, se hace necesario comprobar en estudios posteriores la sensibilidad de los resultados obtenidos aquí frente a la variación de la calidad de la vía.

Referencias

- [1] Antolín, P., Zhang, N., Goicolea, J.M., Xia, H., Astiz, M. A., y Oliva, J. (2013). “Consideration of nonlinear wheel-rail contact forces for dynamic vehicle-bridge interaction in high-speed railways”. *Journal of Sound and Vibration*, 332 (5), 1231–1251.
- [2] Olmos, J.M. (2016). “Estudio de la respuesta dinámica transversal de viaductos altos de líneas de ferrocarril de alta velocidad bajo la acción de las cargas de uso”. Tesis (Doctoral), E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos (UPM) <<http://oa.upm.es/view/institution/Caminos/>>.
- [3] Shabana, A. A., Zaaza, K. E. y Sugiyama, H., (2007), *Railroad Vehicle Dynamics: A Computational Approach*, CRC Press.
- [4] Dinh, V. N., Kim, K. D. y Warnitchai, P., (2009), “Dynamic analysis of three dimensional bridge-high-speed train interactions using a wheel-rail contact model”, *Engineering Structures*, 31 (12), 3090–3106.
- [5] Guo, W., H. Xia, H., De Roeck, G., y K. Liu (2012), “Integral model for train-track-bridge interaction on the sesia viaduct: Dynamic simulation and critical assessment”, *Computers and Structures*. 112-113, 205–216.
- [6] Yang, Y.-B., Yao, Z. y Y. S. Wu, Y. S. (2004), *Vehicle-bridge Interaction Dynamics: With Applications to High-speed Railways*, World Scientific
- [7] Olmos, J. M. y Astiz, M. A. (2013), “Analysis of the lateral dynamic response of high pier viaducts under high-speed train travel”, *Engineering Structures*, 56, 1384–1401.
- [8] Zhaia, W.M., Wanga, K.Y, Lin J.H., (2004), “Modelling and experiment of railway ballast vibrations” *Journal of Sound and Vibration*. 270 673–683.
- [9] Melis, M. (2007), “Terraplenes y balasto en la Alta Velocidad Ferroviaria. Cuarta parte: Los trazados de Alta Velocidad en España (I)”. *Revista de Obras Públicas*. 3476, 41-66.