

Estudios de confort de vehículos ferroviarios mediante técnicas combinadas de simulación FEM y MBS

J. Navarro, J.A. Chover, P. Rodriguez y B. Suarez

La elasticidad de la caja de viajeros de los vehículos ferroviarios tiene una gran influencia sobre el confort. Por esta razón, cuando se desea simular el comportamiento dinámico del vehículo para estudios de confort, resulta conveniente construir un modelo elástico de caja, a fin de obtener resultados más precisos. La construcción de este tipo de modelos pasa por el desarrollo de dos etapas fundamentales, que comprenden la generación de un modelo de caja mediante la técnica de los elementos finitos (FEM) para su caracterización dinámica como cuerpo elástico y la definición de un modelo de sistema multicuerpo (MBS) que englobe los restantes componentes del vehículo. En este artículo se presentan los resultados obtenidos en un estudio comparativo llevado a cabo con modelos de caja rígida y elástica, en los que se ha valorado el nivel de confort obtenido con ambas configuraciones. Para ello, se ha simulado el comportamiento del vehículo a dos velocidades distintas, de 70 y 110km/h, y con dos niveles de irregularidades. Se han analizado las aceleraciones de la caja, que se han procesado de acuerdo a las especificaciones de la norma EN12299, a fin de obtener el índice de comodidad. Este parámetro se ha utilizado para comparar el nivel de confort obtenido con ambos modelos, habiéndose encontrado una gran diferencia en los índices calculados con caja rígida y con caja elástica, lo que confirma la gran influencia de la elasticidad de la caja en los estudios de confort llevados a cabo mediante técnicas de simulación dinámica.

Esta es una versión electrónica de un artículo publicado en las Actas del IV Congreso Nacional de Innovación Ferroviaria, Sevilla, España, 3-5 Diciembre, 2008.

Para citar este artículo, hacer referencia al artículo publicado:

J. Navarro, J.A. Chover, P. Rodriguez y B. Suarez, *Estudios de confort de vehículos ferroviarios mediante técnicas combinadas de simulación FEM y MBS. Actas del IV Congreso Nacional de Innovación Ferroviaria, Sevilla, España, 3-5 Diciembre, 2008.*

Estudios de confort de vehículos ferroviarios mediante técnicas combinadas de simulación FEM y MBS

*Javier Navarro, José Antonio Chover, Pablo Rodríguez, Berta Suárez
CITEF, Universidad Politécnica de Madrid*

RESUMEN

La elasticidad de la caja de viajeros de los vehículos ferroviarios tiene una gran influencia sobre el confort. Por esta razón, cuando se desea simular el comportamiento dinámico del vehículo para estudios de confort, resulta conveniente construir un modelo elástico de caja, a fin de obtener resultados más precisos. La construcción de este tipo de modelos pasa por el desarrollo de dos etapas fundamentales, que comprenden la generación de un modelo de caja mediante la técnica de los elementos finitos (FEM) para su caracterización dinámica como cuerpo elástico y la definición de un modelo de sistema multicuerpo (MBS) que englobe los restantes componentes del vehículo.

En este artículo se presentan los resultados obtenidos en un estudio comparativo llevado a cabo con modelos de caja rígida y elástica, en los que se ha valorado el nivel de confort obtenido con ambas configuraciones. Para ello, se ha simulado el comportamiento del vehículo a dos velocidades distintas, de 70 y 110km/h, y con dos niveles de irregularidades. Se han analizado las aceleraciones de la caja, que se han procesado de acuerdo a las especificaciones de la norma EN12299, a fin de obtener el índice de comodidad. Este parámetro se ha utilizado para comparar el nivel de confort obtenido con ambos modelos, habiéndose encontrado una gran diferencia en los índices calculados con caja rígida y con caja elástica, lo que confirma la gran influencia de la elasticidad de la caja en los estudios de confort llevados a cabo mediante técnicas de simulación dinámica.

1. INTRODUCCIÓN

La elasticidad de la caja de viajeros de los vehículos ferroviarios tiene una gran influencia sobre el confort. Por esta razón, cuando se desea simular el comportamiento dinámico del vehículo para estudios de confort, resulta conveniente construir un modelo elástico de caja, a fin de obtener resultados más precisos.

La construcción de este tipo de modelos pasa por el desarrollo de dos etapas fundamentales, que comprenden la generación de un modelo de caja mediante la técnica de los elementos finitos (FEM) para su caracterización dinámica como cuerpo elástico y la definición de un modelo de sistema multicuerpo (MBS) que englobe los restantes componentes del vehículo. En este trabajo se ha utilizado ANSYS para el

modelado por elementos finitos, y SIMPACK para el modelado y simulación del sistema multicuerpo.

En este artículo se presentan los resultados obtenidos en un estudio comparativo llevado a cabo con modelos de caja rígida y elástica, en los que se ha valorado el nivel de confort obtenido con ambas configuraciones.

2. GENERACIÓN DEL MODELO FEM DE CAJA

Se ha construido un modelo por elementos finitos correspondiente a una caja ficticia, con las características propias de vehículo metropolitano. La caja seleccionada está formada por los siguientes componentes:

- Bastidor
- Traviesas
- Placa Corrugada (Plegada)
- Columnas Extremos
- Vigas T
- Pared Lateral con Nervios Horizontales
- Columnas Interiores
- Estructura Testeros
- Pared Lateral con Nervios Verticales
- Largueros
- Techo
- Equipos Auxiliares

Una vez designados los distintos componentes de la caja a modelar, se ha construido un modelo CAD. En la siguiente figura pueden apreciarse el diseño de caja utilizado en este trabajo.

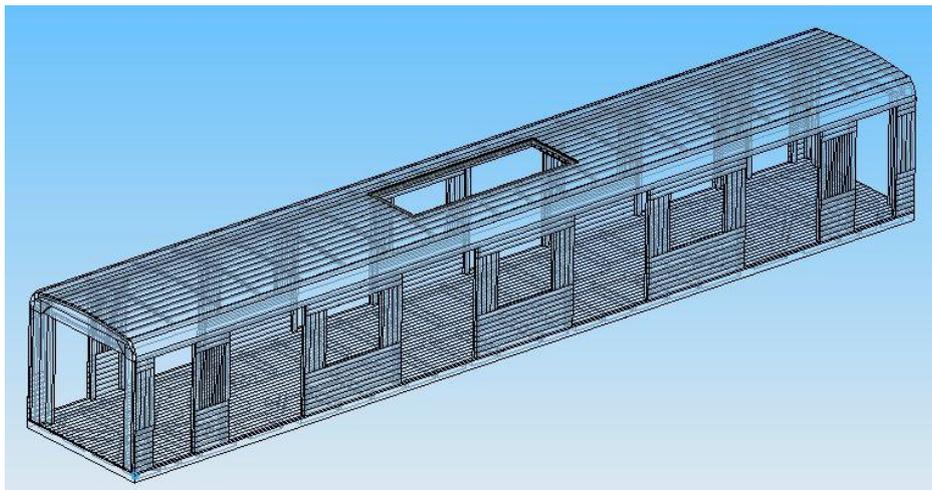


Figura 1 Modelo CAD 3D de caja

Dado que el propósito final de este trabajo es llevar a cabo un análisis de confort, el grado de detalle del modelo de elementos finitos no debe ser tan alto como el que se

requeriría para realizar un análisis estructural de la caja. Por este motivo, el primer paso ha sido simplificar la geometría, a fin de obtener un modelado más eficiente mediante técnicas de elementos finitos en ANSYS, considerando superficies sin espesor, y representando las vigas por su fibra neutra. En consecuencia, se ha generado un modelo CAD equivalente al anterior, con las especificaciones necesarias para el modelo de elementos finitos, tal como se muestra en la siguiente figura.

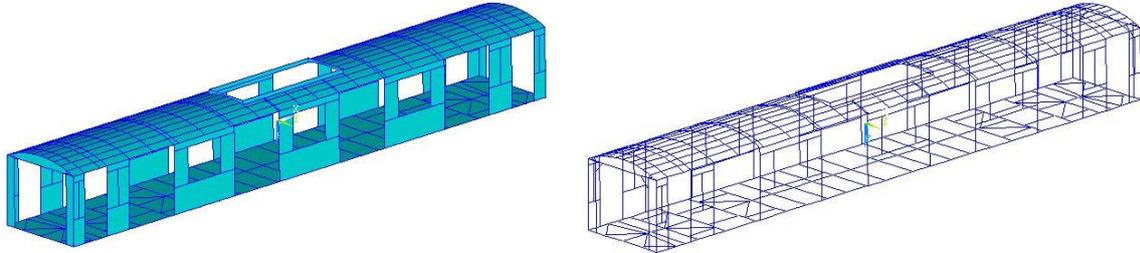


Figura 2 Modelo CAD 3D plano de caja

Una vez desarrollada la geometría, se ha procedido a construir el modelo FEM en ANSYS. Los tipos de elementos empleados son: BEAM189 para las vigas, SHELL93 para las placas y MASS21 para los equipos auxiliares y puntos de anclaje. La razón de la elección de estos elementos radica en la necesidad de utilizar elementos elásticos con nodos intermedios para el modelado de las placas con estructura de sándwich.

El proceso de construcción del modelo se ha llevado a cabo a partir de la generación secuencial de cada uno de sus componentes, habiéndose modelado cada uno de ellos con el siguiente tipo de elemento:

- BEAM189: Bastidor, Columnas Extremos e Interiores, Largueros, Traviesas, Vigas T y vigas de los Testeros.
- SHELL93: Techo, Placas de los Testeros, Placa Corrugada, Paredes Laterales de Nervios Horizontales y Verticales.
- MASS21: Equipos auxiliares y Enganches de los pivotes.

En la siguiente figura pueden apreciarse cada una de estas partes del modelo.

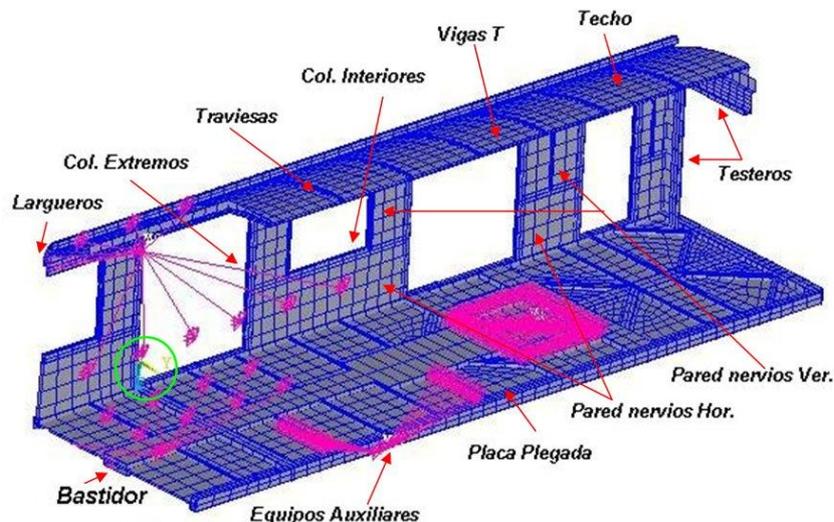


Figura 3 Componentes de la caja

Una vez completado el modelo FEM de caja, se ha efectuado un análisis modal del mismo. Este análisis ha sido necesario para caracterizar el modelo dinámicamente como elemento elástico, y ha servido para verificar la validez del modelo. En la siguiente figura se muestran los principales modos de vibración que se han obtenido.

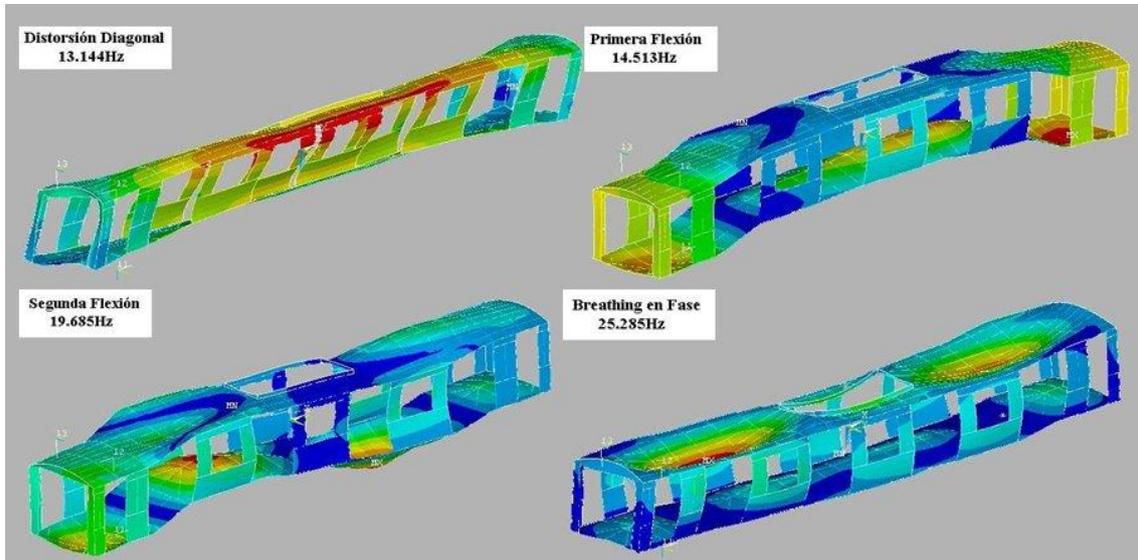


Figura 4 Primeros modos de vibración elásticos

Pese a la simplificación inicial llevada a cabo sobre la geometría de la caja, se ha tenido que reducir nuevamente el modelo FEM desarrollado, para permitir su incorporación en el modelo MBS. Para ello, se ha utilizado la reducción de Guyan, mediante la cual se ha conseguido reducir los 87.600 grados de libertad del modelo completo, a los 600 grados de libertad 'máster' que tiene el modelo reducido, con tan sólo un 3,5 % de error máximo en las frecuencias, hasta 30Hz. En la siguiente figura se representan gráficamente los grados de libertad del modelo reducido.

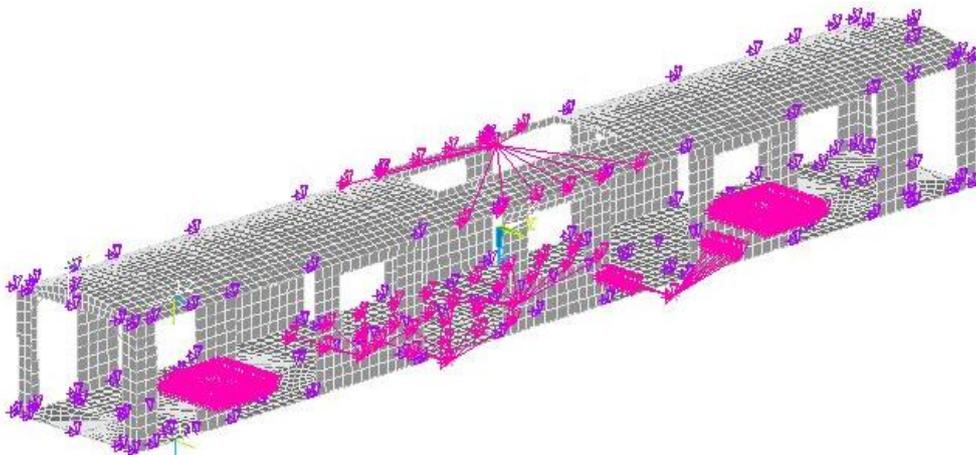


Figura 5 Grados de libertad máster elegidos

El proceso de localización de los másters se ha llevado a cabo seleccionando los puntos que se han considerado más importantes en el modelo, y dejando el resto de gdl hasta 600 a la elección de ANSYS.

3. GENERACIÓN DEL MODELO MBS DE COCHE FERROVIARIO

Una vez desarrollado el modelo elástico de caja y completada la etapa anterior, se está en disposición de elaborar el modelo MBS de coche ferroviario. Para analizar el comportamiento dinámico de un sistema multicuerpo, el primer paso a seguir es discretizar el sistema físico real que se desea estudiar en componentes básicos, tales como cuerpos, juntas y elementos de fuerza. En particular, los vehículos ferroviarios pueden considerarse como un conjunto de cuerpos rígidos (coche, bogies, ejes montados, etc.) conectados entre sí por muelles y amortiguadores que caracterizan la suspensión del vehículo. Suele incluirse también una restricción en cada rueda, que garantiza el contacto permanente con el carril. En la siguiente figura se muestra uno de los dos bogies incluidos en el modelo de vehículo.

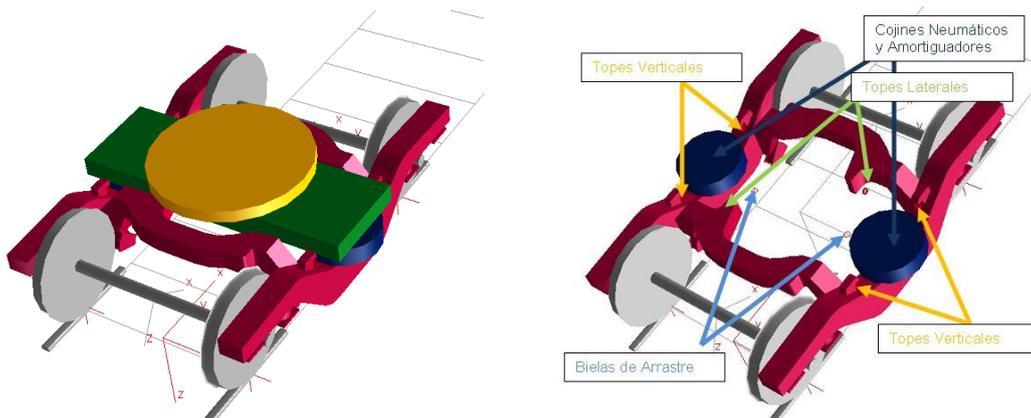


Figura 6 Componentes del bogie(Izda) y elementos de suspensión(Drcha)

La incorporación del modelo elástico de caja sobre el modelo de sistema multicuerpo se ha realizado a través de la herramienta FEMBS de SIMPACK. Esta herramienta se encarga de generar un cuerpo elástico para incorporarlo en el modelo de SIMPACK, a partir de la matriz de masa y rigidez, de los modos de vibración, y de los grados de libertad máster del modelo de elementos finitos reducido.

Como ya se ha comentado anteriormente, se han construido en SIMPACK dos modelos distintos para caracterizar un mismo coche ferroviario, uno con caja rígida y otro con caja elástica, con el fin de verificar la diferencia existente entre ambos. El resto de componentes del vehículo: traviesas bailadoras, bastidores de bogie, ejes montados, resortes, amortiguadores y topes son comunes para ambos modelos, a fin de poder compararlos en igualdad de condiciones.

En la siguiente figura se muestran ambos modelos. Los cubos de color gris del modelo de caja elástica corresponden con los nodos máster definidos en el modelo de elementos finitos, mientras que las esferas azules situadas en el suelo de la caja indican la posición de los sensores definidos para la medición de las aceleraciones de la caja, imprescindibles para llevar a cabo el estudio de confort.

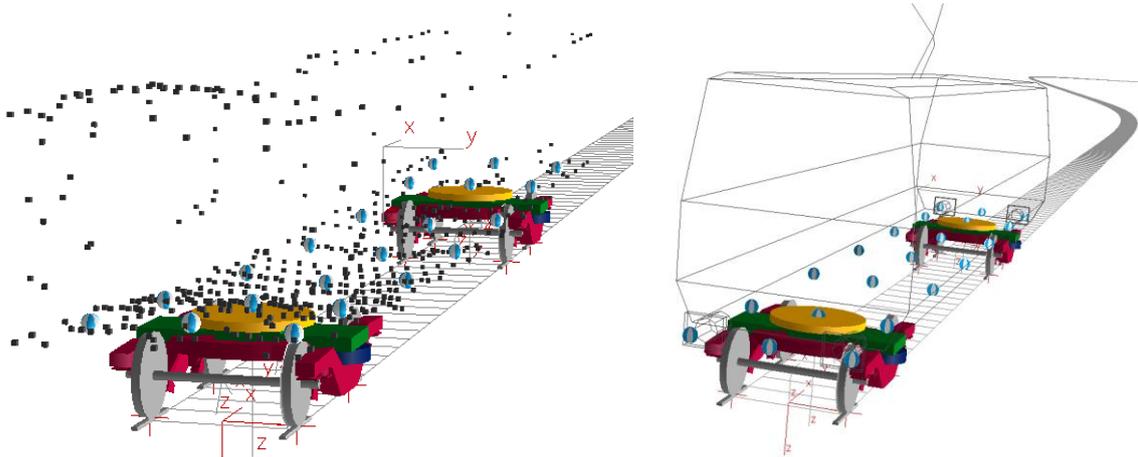


Figura 7 Modelos de Coche con caja elástica (Izda.) y rígida (Dcha.)

En ambos modelos, se ha definido una vía con datos procedentes de una línea de metro real, sobre la que se han llevado a cabo las simulaciones. Para una mejor comparación de los modelos en cuanto a su nivel de confort, se han incluido también en ambos casos las irregularidades laterales y verticales de la vía.

4. RESULTADOS DEL ESTUDIO DE CONFORT

Ambos modelos se han simulado a dos velocidades diferentes, de 70 y 110km/h, y con dos niveles de irregularidades, alto (High) y bajo (Low).

Durante la marcha con las distintas configuraciones anteriores, se han recogido las aceleraciones medidas en las 3 direcciones cartesianas en distintos puntos de la caja. Estas señales se han procesado de acuerdo con las indicaciones de la norma EN12299, a fin de obtener el índice de comodidad (NMV), parámetro utilizado en la comparación del confort de ambos modelos. En la siguiente figura se muestran los resultados correspondientes a un sensor determinado, para uno de los casos simulados (izquierda), junto con las gráficas correspondientes a las distintas etapas del postprocesado (derecha).

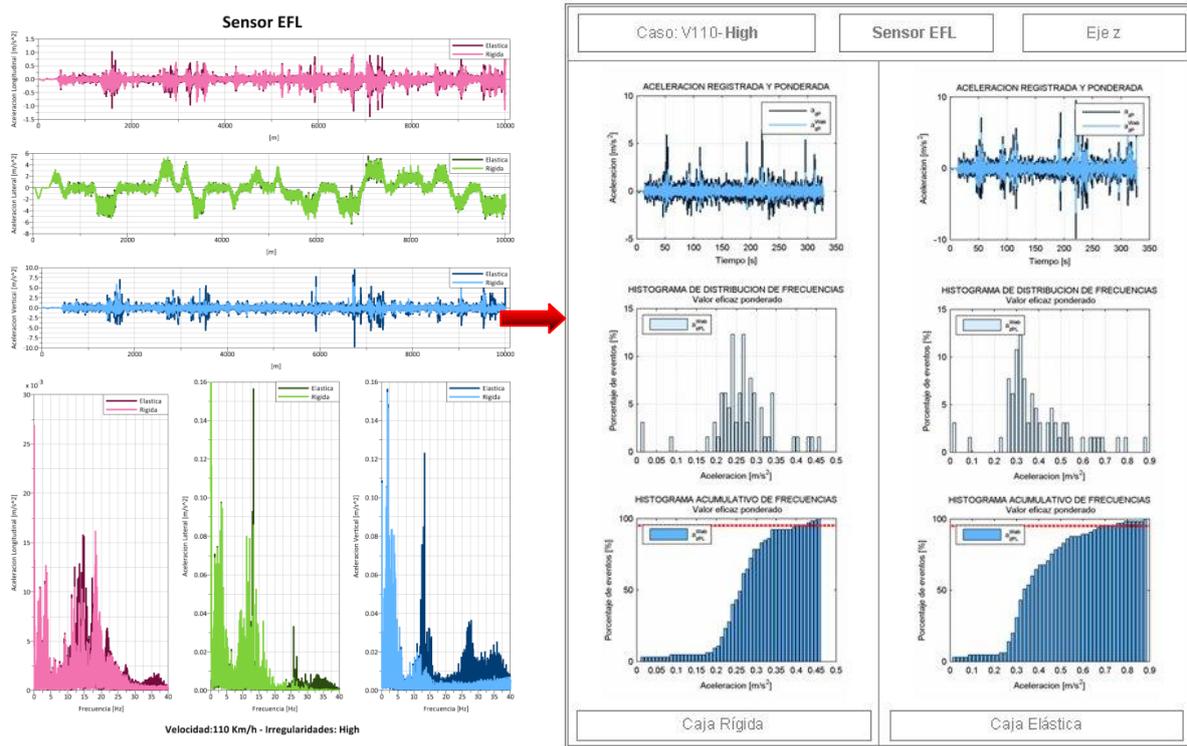


Figura 8 Aceleraciones medidas en el sensor y sus FFTs (Izda) y Tratamiento de dicha señal en MATLAB

En las siguientes gráficas se muestran los niveles de confort obtenidos con los modelos de caja rígida y de caja elástica, a las velocidades de 110 y 70 km/h, con irregularidades de vía altas y bajas. La posición longitudinal de los sensores se ha indicado con una combinación de dos letras: E/P/I/C (Extreme/Pivot/Inside/Center) y B/L (Back/Left). La posición lateral de los sensores se ha identificado con las letras L (Left) para el lado izquierdo; R (Right) para el lado derecho; y M (Middle) para la línea media, según se indica en la siguiente figura.

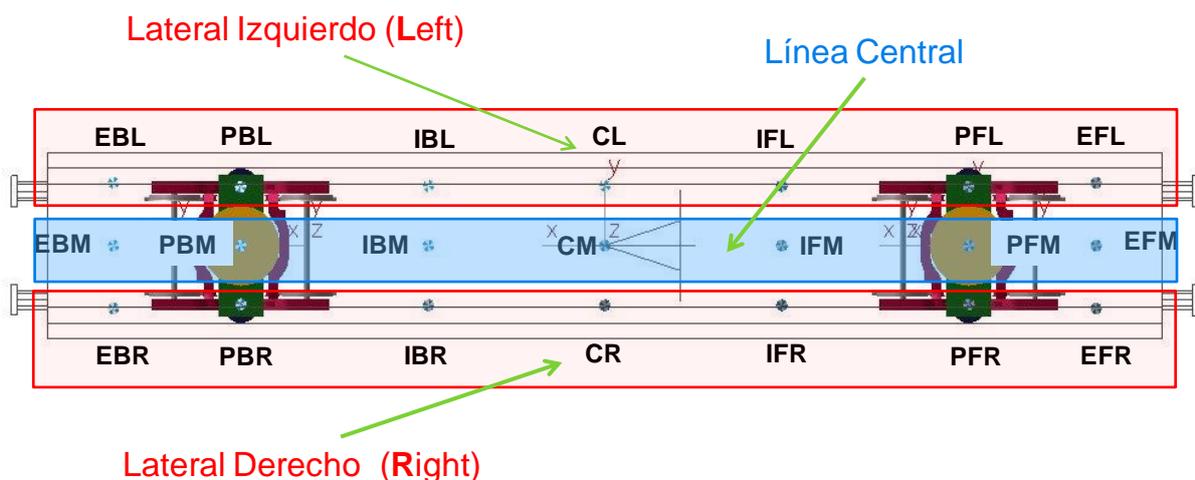


Figura 9 Disposición de los sensores

V70-Low

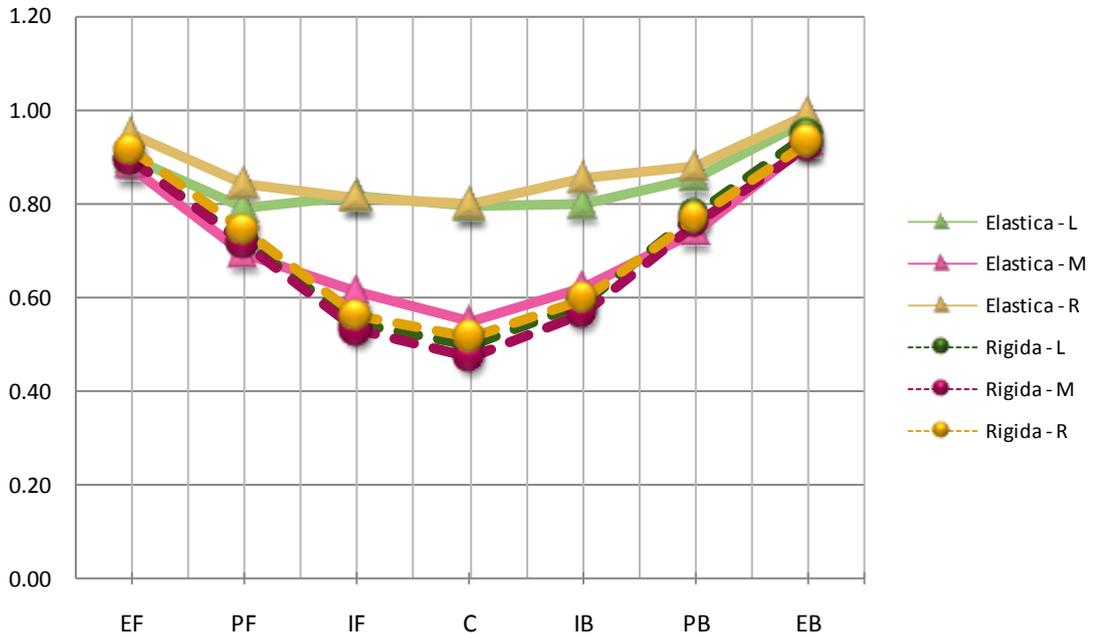


Figura 10 Nivel de confort en cada sensor para 110 km/h con irregularidades bajas

V70-High

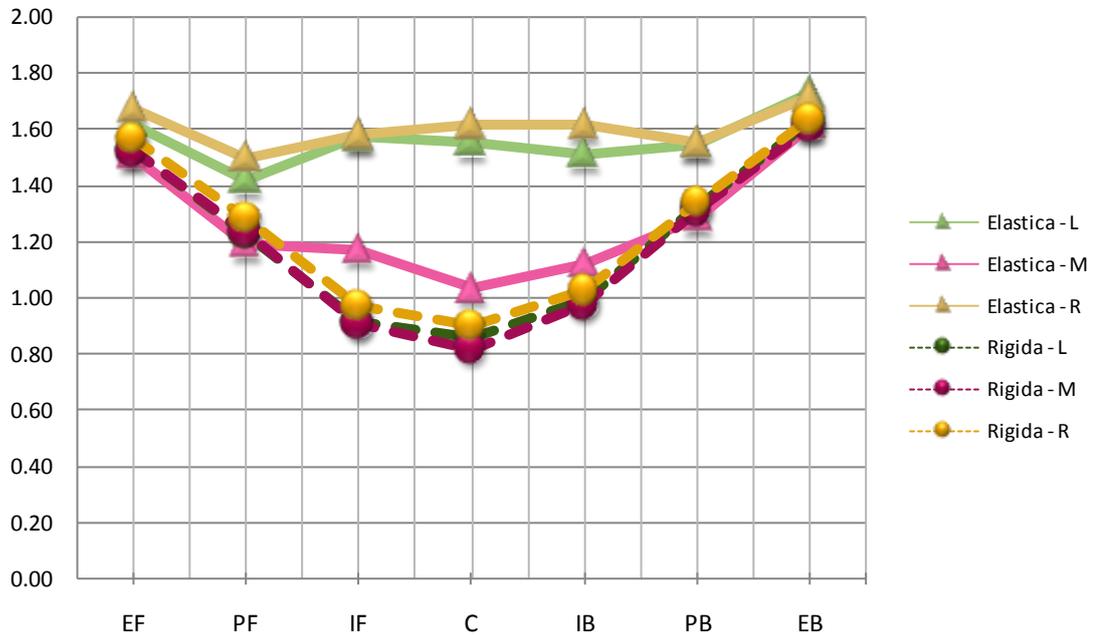


Figura 11 Nivel de confort en cada sensor para 70 km/h con irregularidades altas

V110-Low

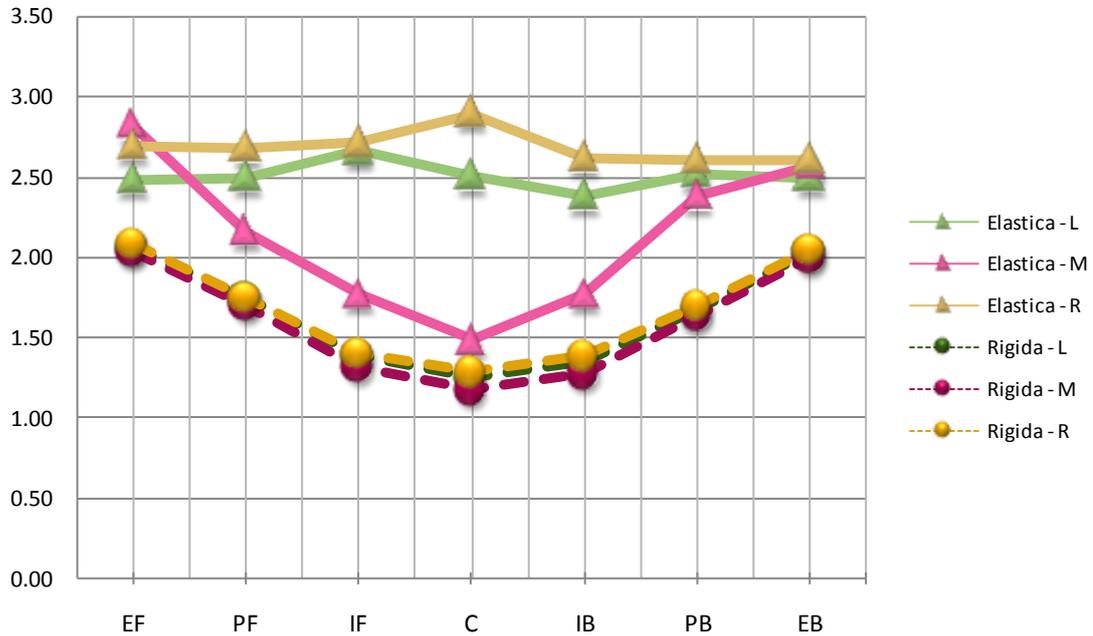


Figura 12 Nivel de confort en cada sensor para 110 km/h con irregularidades bajas

V110-High

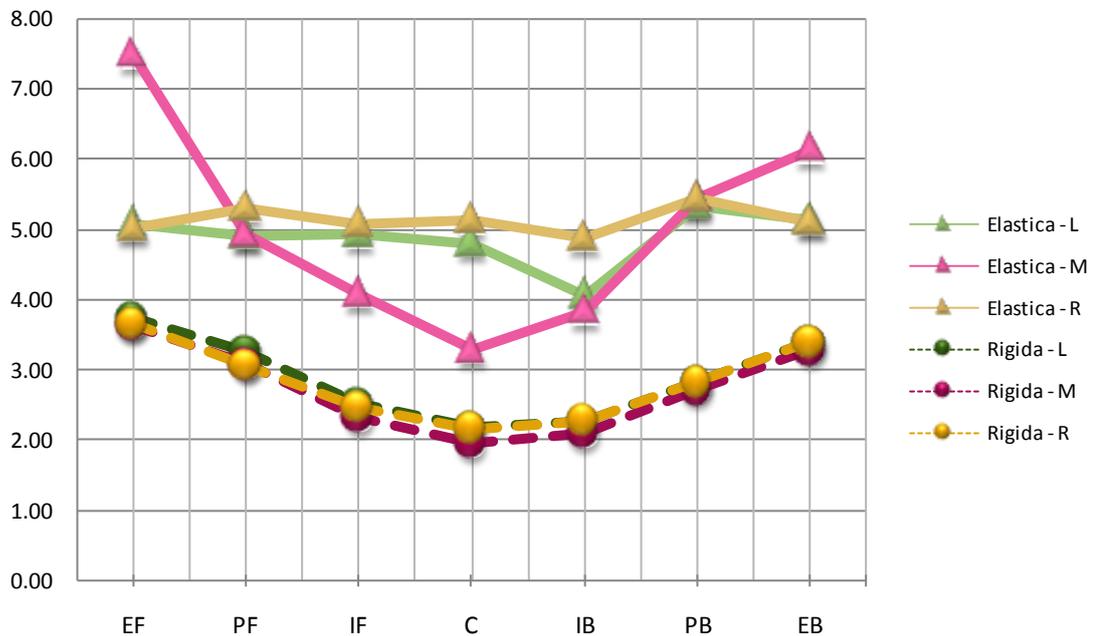


Figura 13 Nivel de confort en cada sensor para 110 km/h con irregularidades altas

Como se puede apreciar, existe gran diferencia en los índices calculados. Así, por ejemplo, para 110 km/h con irregularidades altas, el estudio con caja rígida indica que el vehículo presenta un confort medio (valores del índice menores que 4), mientras que el estudio con caja elástica pone de manifiesto que el vehículo presenta un

comportamiento claramente incómodo (valores por encima de 5). Esto confirma la gran influencia de considerar la elasticidad de la caja en estudios de confort cuando se aplican técnicas de simulación dinámica.

5. CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos, pueden extraerse las siguientes conclusiones:

- El modelo con caja rígida da lugar a índices de confort considerablemente inferiores a los mostrados por el modelado con caja elástica, llegando a mostrar incrementos de más del 100%, con una diferencia superior a 3 puntos en el índice de comodidad. Esto justifica la necesidad de considerar la elasticidad de la caja en el modelo de coche ferroviario.
- Cuando se consideran los resultados de los sensores situados en las líneas laterales de la caja, las mayores diferencias en el índice de comodidad entre ambos modelos se localizan en la zona central, mientras que cuando se analizan los sensores situados sobre la línea media, las mayores diferencias se encuentran en los extremos.
- La diferencia entre los modelos con caja rígida y elástica es mayor cuanto más desfavorables resultan las condiciones de la marcha, que corresponden a una mayor velocidad, con un mayor nivel de irregularidades. Así, a mayor velocidad se obtienen mayores índices, con lo que la marcha será menos confortable. Se ha observado también que la influencia de la velocidad es mayor que la del nivel de irregularidades.
- Las aceleraciones que más influyen en el índice de confort son las verticales, encontrándose para ellas la mayor diferencia entre los modelos con caja rígida y elástica. Les siguen las aceleraciones laterales, con una influencia media sobre el nivel de comodidad y, por último, las longitudinales, cuya influencia es despreciable.

En general, todas las conclusiones extraídas se ajustan bastante a los resultados esperados, quedando justificada la necesidad de utilizar modelos de caja elástica en estudios de confort mediante técnicas de simulación dinámica.

6. REFERENCIAS

1. Michael Peppel, "Simulation of Articulated Trains with Consideration of Elastic Carbodies", ALSTOM.
2. Charles Libove, S.B. Batdorf, "A General Small Deflection Theory for Flat Sandwich Plates", National Advisory Committee for Aeronautics, Report No. 899, 1950.
3. Q.H. Cheng, H.P. Lee, C. Lu, "A Numerical Analysis Approach for Evaluating Elastic Constants of Sandwich Structures with Various Cores", Composite Structures, vol.74, 2006, pp. 226-236.
4. S. Popprath et al., "Experimental Modal Analysis of Scaled Carbody for Metro Railway", ICSV13, July 2-6, 2006, Vienna, Austria
5. A. Stribersky et al., "Advances in Combined Structural Dynamics and System Dynamics Analyses of Rail Vehicles", Vehicle System Dynamics Supplement 37, 2002, pp. 465-477.

6. A. Stribersky et al., "Innovative System Dynamics Analyses of Rail Vehicles", Vehicle System Dynamics Supplement 41, 2004, pp. 448-457.
7. Z. Lu, M. Hecht, "Dynamic analysis of a new double deck passenger vehicle with bogie PW200", 4th ADAMS/Rail Users' Conference, Utrech, 1999.
8. M. R. Hatch, "Vibration Simulation Using MATLAB and ANSYS", Chapman & Hall/CRC, 2001, ISBN: 1-58488-205-0.
9. S. Iwnicki, "Handbook of Railway Dynamics", Taylor & Francis, 2006, ISBN-10: 0-8493-3321-0, ISBN-13: 978-0-8493-3321-7.
10. F.di Majo, "Costruzione di materiale ferroviario", Levrotto e Bella, Torino
11. P. Carlbom, "Carbody and Passengers in Rail Vehicle Dynamics", KTH, 2000, TRITA - FKT 2000:48, ISSN 1103 - 470X, ISRN KTH/FKT/D--00/48--SE.
12. Norma ISO 2631-1: Mechanical Vibration and Shock – Evaluation of Human Exposure to Whole Body Vibration.
13. Norma EN12299: Aplicaciones ferroviarias-Comodidad de viaje para los viajeros.