

EVALUACIÓN DE LOS EFECTOS DINÁMICOS ASOCIADOS A LAS IRREGULARIDADES DEL CARRIL EN VÍAS DE ALTA VELOCIDAD MEDIANTE ALGORITMOS DE CONTACTO

Felipe Gabaldón^{1*}, Juan José Arribas¹ y José María Goicolea¹

1: Grupo de Mecánica Computacional
Dpto. Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras
Escuela Técnica Superior de Ingeniero de Caminos
Universidad Politécnica de Madrid
C/ Profesor Aranguren s/n. Ciudad Universitaria. 28040 Madrid
e-mail: felipe@mecanica.upm.es, jja@mecanica.upm.es
goico@mecanica.upm.es, web: <http://w3.mecanica.upm.es>

Palabras clave: Dinámica, Trenes de Alta Velocidad, Vía en Placa, Irregularidades del Carril, Contacto, Interacción

Resumen. *Los esfuerzos dinámicos asociados a las irregularidades del carril, tienen especial relevancia en el cálculo y diseño de los aparatos de fijación de vías en placa sometidos a las acciones de trenes de alta velocidad. En este artículo se presenta una metodología basada en algoritmos de detección e interacción de los posibles contactos entre los modelos de elementos finitos de la vía y del vehículo. El carril se modeliza mediante elementos viga de Timoshenko, y los aparatos de fijación con muelles, amortiguadores y masas discretas. Para el tren se utilizan modelos simplificados con muelles, amortiguadores y masas concentradas. La metodología propuesta se aplica en una simulación computacional con objeto de obtener los factores de amplificación dinámica de los esfuerzos en la sujeciones de una vía en placa.*

1. INTRODUCCIÓN

En España la mayor parte de las inversiones en infraestructuras de los últimos años se ha dedicado al proyecto y construcción de nuevas líneas de ferrocarril de alta velocidad, ya que éstas se consideran una alternativa competitiva frente a otros modos de transporte para medias distancias. Actualmente hay tres líneas de alta velocidad en operación: Madrid–Sevilla, el tramo Madrid–Lérida perteneciente a la línea Madrid–Barcelona–Frontera Francesa, y la línea Córdoba–Málaga, y varias líneas en fase de proyecto y/o construcción: Madrid–Valencia–Murcia, Madrid–Segovia–Valladolid, y las líneas de enlace con Portugal dentro de la red internacional de alta velocidad Portugal–España–Resto de Europa.

Toda esta actividad ha conllevado un aumento del interés por diversos aspectos ingenieriles relacionados con el diseño de estructuras para los trenes de alta velocidad. Entre estos cabe destacar la respuesta dinámica de la vía en placa. El problema de la vía con balasto es el progresivo deterioro de éste debido a las cargas asociadas al tráfico ferroviario. En consecuencia es imprescindible un mantenimiento continuado para mantener un alineamiento adecuado de la vía. La vía en placa, aunque tiene un coste de construcción más elevado que la vía con balasto, es más estable desde el punto de vista de la alineación de la vía y necesita menos mantenimiento. En consecuencia, para valorar hasta que punto es ventajoso remplazar la vía sobre balasto por la vía en placa es necesario analizar diversos aspectos relacionados con la respuesta dinámica de ésta: ruido asociado a la circulación de los trenes, transmisión de vibraciones en el terreno, confort, variables de diseño asociadas a los esfuerzos dinámicos en los aparatos de fijación, etc. [1, 2]

Los métodos de cálculo dinámico se basan en la integración en el tiempo de los modelos estructurales considerando las acciones del tren como cargas móviles. Los esfuerzos dinámicos asociados a las irregularidades del carril tienen especial relevancia en el análisis de la vía en placa sometida a las acciones de trenes de alta velocidad. Este hecho hace que generalmente sea necesario realizar este tipo de cálculos empleando modelos de interacción que integran simultáneamente las ecuaciones diferenciales del movimiento de la estructura y del vehículo [3, 4]. Como consecuencia la complejidad de los modelos de elementos finitos aumenta, y se requieren mayores tiempos de cálculo.

En este artículo se presenta una metodología de cálculo con interacción basada en algoritmos que detectan y que consideran los posibles contactos rueda–carril. Las ventajas de esta metodología estriban tanto en la posibilidad de modelizar de forma completa y detallada los coches del tren, como en utilizar modelos no lineales en general para el contacto rueda-carril.

2. MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS

La metodología que se propone en este artículo para analizar los esfuerzos dinámicos en las fijaciones de una vía en placa se basa en un modelo de elementos finitos en el que se representa por una parte la estructura correspondiente al carril y las fijaciones, y por otra un modelo más o menos simplificado del vehículo, realizando la integración en el tiempo

de todos los grados de libertad del sistema vehículo–estructura.

Las acciones, en este caso correspondientes a la circulación con velocidad constante del eje de un coche tipo, se establecen mediante un algoritmo de detección e interacción de los contactos entre ambos modelos [6, 7] A continuación se describe la metodología de modelización de cada uno de ellos.

2.1. Modelo de la vía

Se han modelizado 18,6 de un raíl, mediante elementos viga de dos nodos, con las condiciones de contorno adecuadas para considerar que el carril tiene longitud indefinida (ver figura 1), habiéndose comprobado mediante un análisis modal que modelos de mayor longitud no aportan información adicional. Cada 0,6 m. se ha considerado que hay una traviesa con las correspondientes sujeciones, modelizadas mediante un muelle y un amortiguador de constantes k_t y c_t , respectivamente.

El valor adoptado para la rigidez de la sujeción es $k_t = 70000$ kN/m. El valor de la constante c_t del amortiguador viscoso se ha calibrado, con el procedimiento que se detalla en el apartado 2.1.1, para que el primer modo de oscilación del carril tenga una fracción de amortiguamiento crítico $\xi = 5\%$.

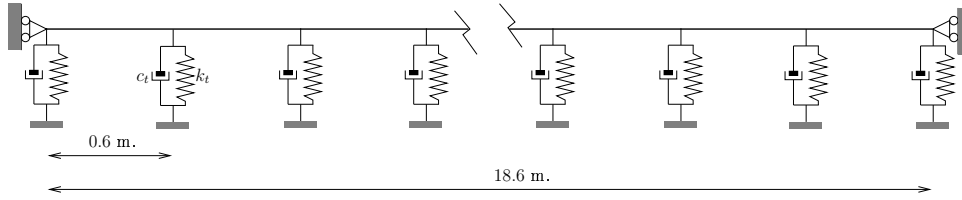


Figura 1: Representación esquemática del modelo de la vía

Para el raíl se han considerado dos modelos:

1. Carril ideal sin irregularidades discretizado con elementos viga de longitud $l^e = 0,1$, que da lugar a un total de 186 elementos y 376 grados de libertad.
2. Carril con irregularidades. Se han generado tres perfiles distintos de carril con irregularidades de acuerdo con la función de densidad espectral de potencia de la Sociedad Nacional de Ferrocarriles Francesa (SNCF), correspondiente a carriles de vías con buena calidad [5]. Se han considerado irregularidades con longitudes de onda comprendidas entre $l_0 = 0,05$ m y $l_f = 2,0$ m, valores que están relacionados con las velocidades de circulación v y con la frecuencia propia f_0 del modelo de interacción rueda-carril utilizado, a través de la expresión:

$$l(\text{m}) = \frac{v(\text{m/s})}{f_0(\text{Hz})} \quad (1)$$

Teniendo en cuenta que la frecuencia del modelo de contacto rueda-carril (ver apartado 2.2) es:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_c}{m_s}} \approx 167 \text{ Hz} \quad (2)$$

el valor de la longitud de onda menor l_0 viene determinado en (1) por el menor valor de la velocidad de circulación considerado en los cálculos dinámicos ($v_{\min} = 10$ m/s).

Por otra parte el valor de la longitud de onda mayor $l_f = 2$ m se ha adoptado considerando que es una onda suficientemente larga para que, con la velocidad máxima de circulación considerada ($v_{\max} = 120$ m/s), la frecuencia obtenida en (1) no sea relevante comparada con la frecuencia del elemento de interacción ($f_0 = 167$ Hz) y con la frecuencia del primer modo de oscilación de la vía ($f_{1,\text{via}} \approx 220$ Hz).

El carril se ha modelizado para cada uno de los perfiles con elementos de longitud $l^e = 0,01$ m. obteniéndose mallas de 1860 elementos con 3724 grados de libertad.

Los tres perfiles generados se muestran en la figura 2. En cada curva la ordenada muestran la cota de las irregularidades del carril (en milímetros), y las abscisas la longitud del mismo (en metros).

2.1.1. Ajuste del coeficiente de amortiguamiento de las traviesas

Para las traviesas se ha considerado un coeficiente de amortiguamiento c_t (ver figura 1) cuyo valor se ha ajustado de manera que la fracción de amortiguamiento crítico correspondiente al primer modo de oscilación es $\xi = 5\%$.

Para realizar dicho ajuste se ha utilizado la siguiente metodología:

1. Cálculo de los desplazamientos nodales correspondientes al primer modo de oscilación del modelo sin amortiguamiento. La forma de este primer modo se muestra en la figura 3.
2. Cálculo dinámico del sistema sometido a unos desplazamientos iniciales que corresponden al primer modo de oscilación, considerando unos coeficientes de amortiguamiento en las sujeciones:

$$c = 0,05 \sqrt{4k_t m_t} = 1,1380 \cdot 10^4 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1} \quad (3)$$

siendo $k_t = 70$ GN la rigidez de la fijación, y $m_t = 186$ kg la masa de una semitraviesa.

El movimiento del sistema en este caso corresponde únicamente del primer modo, mostrándose en la curva de la figure 4 la historia de desplazamientos de un punto del carril (concretamente el movimiento del punto medio).

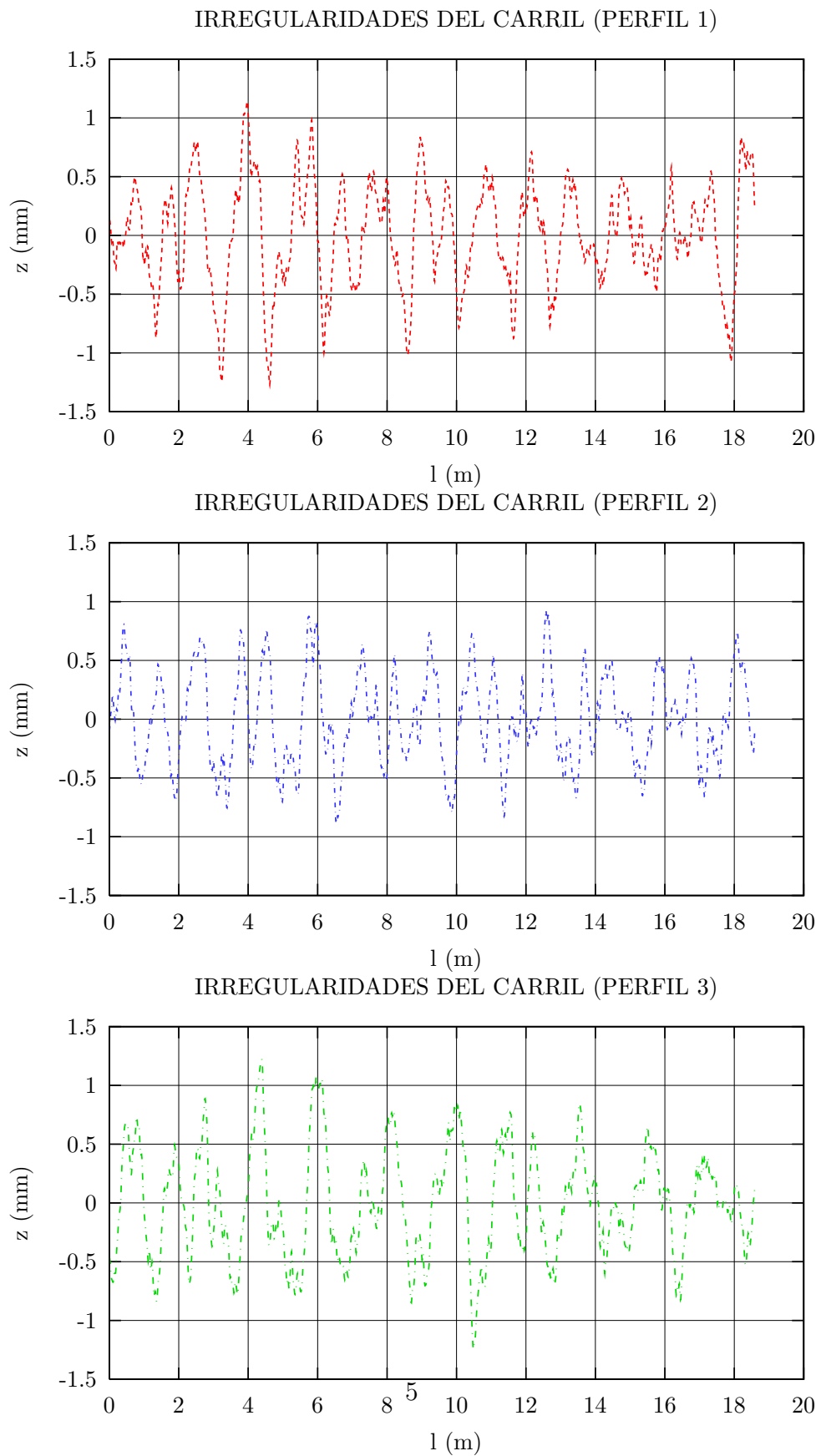


Figura 2: Perfiles generados para modelizar las irregularidades del carril

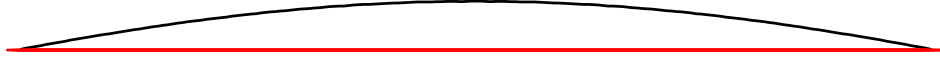


Figura 3: *Primer modo de oscilación del carril con sujeciones (la línea roja corresponde a la geometría del carril sin deformar y la línea negra a la primera forma modal)*

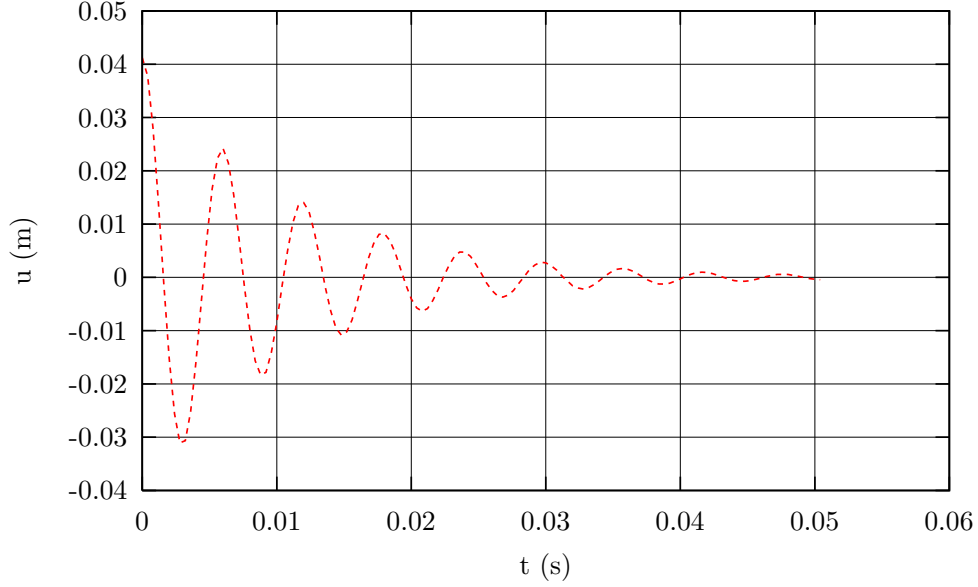


Figura 4: *Desplazamiento de un punto del carril correspondiente al primer modo de oscilación*

El movimiento de cualquier punto del carril verifica:

$$u(t) = Ae^{-\xi\omega_0 t} \sin(\omega t + \delta) \quad (4)$$

siendo ω_0 la primera frecuencia propia del sistema sin amortiguar, ω la frecuencia del sistema amortiguado y A y δ constantes de integración que dependen de las condiciones iniciales.

Llamado u_n y u_{n+1} a los desplazamientos en dos instantes t_n y t_{n+1} y tomando el intervalo $t_{n+1} - t_n$ igual a un número entero de veces el periodo: $t_{n+1} - t_n = NT$, resulta:

$$\frac{u_{n+1}}{u_n} = e^{-\xi\omega_0(t_{n+1}-t_n)} \Rightarrow \xi = -\frac{\log(u_{n+1}/u_n)}{2\pi N} \quad (5)$$

Sustituyendo los valores correspondientes a los cuatro primeros máximos de la curva de la figura 4 en (5), resulta:

$t_1 = 0,000$	$u_1 = 0,04121$	
$t_2 = 0,006$	$u_2 = 0,02406$	$\xi_{21} = 0,085646$
$t_3 = 0,012$	$u_2 = 0,01401$	$\xi_{31} = 0,085856$
$t_4 = 0,018$	$u_2 = 0,00820$	$\xi_{41} = 0,085628$

En consecuencia, si con el valor adoptado inicialmente para el amortiguamiento: $c = 1,1380 \cdot 10^4$, se obtiene una fracción de amortiguamiento crítico $\xi \approx 8,5\%$; para obtener $\xi = 5\%$ resulta:

$$c_t = 1,1380 \cdot 10^4 \frac{5}{8,56} = 6647,2 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1} \quad (6)$$

Este valor de c_t es el que se adopta como coeficiente de amortiguamiento de las fijaciones del carril para los cálculos dinámicos que se describen en este artículo.

2.2. Modelización de las acciones

Sobre el carril se ha supuesto que actúan las cargas correspondientes al paso de un semieje, a velocidad constante v .

El semieje del vehículo se ha modelizado con las siguientes componentes:

1. Una carga móvil constante de valor nominal $P = 100 \text{ kN}$ que representa las masas no suspendidas, cuya frecuencia de oscilación es mucho más baja que la que se produce en las ruedas debido a las irregularidades del carril.
2. Una rueda que se representa mediante una masa suspendida de valor $m_s = 600 \text{ kg}$, y con la fuerza correspondiente a su peso.
3. Un resorte de constante k_c que representa la rigidez del contacto rueda-carril. El valor adoptado para k_c se describe más abajo.

Este modelo se representa en la figura 5. En el cálculo de elementos finitos el modelo de interacción se ha representado con un elemento de barra articulada de dos nodos, con módulo de elasticidad $E_b = k_c$, área $A_t = 1$ y longitud $L_t = 1$. En el nodo superior hay una masa puntual de valor m_s y en el nodo inferior se define un contacto con los nodos del carril, de manera que debido a dicho contacto el problema es no lineal.

Es usual representar la fuerza f del contacto rueda-carril mediante un modelo de contacto hertziano [8]:

$$f = C_H(x - y - r)^{3/2} \quad (7)$$

$$f = 0, \quad \text{si } x - y - r \leq 0 \quad (8)$$

siendo x e y los desplazamiento de la rueda y el carril en dirección vertical, respectivamente, r es la ordenada de las irregularidades del carril y C_H es la constante de rigidez del contacto hertziano.

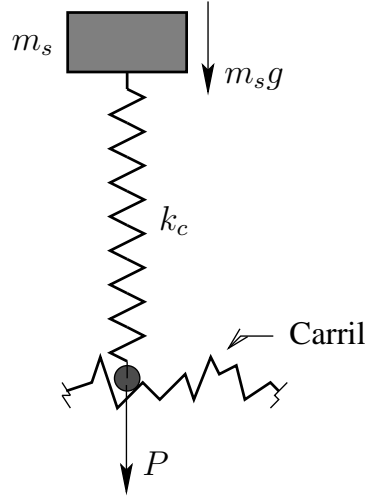


Figura 5: Representación esquemática del modelo de interacción utilizado para representar las cargas de un eje del tren

En este trabajo se ha linealizado la expresión (7) considerando para ello los valores reportados en [2]: $C_H = 93,7 \text{ GN/m}^{3/2}$, y desplazamiento dinámico relativo máximo: $x - y - r = 50 \text{ }\mu\text{m}$. El valor que resulta de la constante k_c es:

$$k_c = 6,6 \cdot 10^8 \text{ N/m} \quad (9)$$

3. RESULTADOS

Los resultados obtenidos con los modelos descritos se describen a continuación, y esencialmente corresponden a la carga que actúa en las fijaciones del carril en el caso estático, las cargas dinámicas en un carril ideal sin irregularidades, y las cargas dinámicas en un carril con las irregularidades cuyos perfiles se muestran en la figura 2.

3.1. Análisis estático

El cálculo estático se ha realizado aplicando el nodo correspondiente a una traviesa una carga estática de valor $F = 106 \text{ kN}$, correspondiente al peso de la masa no suspendida y de la rueda. De la carga aplicada F la parte que actúa sobre la fijación es:

$$F_{\text{est}} = 46,2 \text{ kN} \quad (10)$$

La disminución que se produce entre el valor de la carga aplicada en la traviesa y la reacción ejercida por la misma se debe a la rigidez del propio carril. En la figura 6 se muestra la malla de elementos finitos y la deformada del carril, con un factor de magnificación de 10^3 .

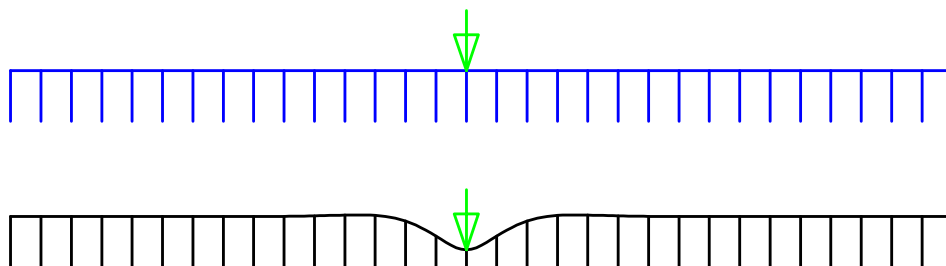


Figura 6: Malla de elementos finitos y deformada para una carga estática. Los elementos verticales representan las traviesas.

3.2. Análisis dinámico

El cálculo dinámico se ha realizado con un modelo de carril ideal y un modelo de carril con irregularidades que incluye los perfiles descritos anteriormente.

Los resultados obtenidos corresponden al movimiento del elemento de interacción descrito en el apartado 2.2, circulando a velocidades desde 10 m/s hasta 120 m/s, cada 5 m/s. En la figura 7 se muestra la historia de la carga vertical actuante en una traviesa intermedia, cuando el eje se mueve a velocidades $v = 40$ m/s, $v = 80$ m/s y $v = 120$ m/s, sobre el carril con el perfil de irregularidades número 3.

El número de cálculos dinámicos realizados han sido 92, que corresponden a los cuatro perfiles considerados (uno ideal y tres con irregularidades) y las 23 velocidades de circulación consideradas en el barrido.

Para interpretar adecuadamente los resultados se han representado las curvas envolventes que proporcionan, para cada velocidad, el valor máximo de la carga que actúa sobre la traviesa. Llamando:

- F_{est} : Carga estática aplicada en la traviesa (ver apartado 3.1).
- $F_{\text{din,ideal}}$: Carga dinámica aplicada en la traviesa considerando el carril sin irregularidades.
- $F_{\text{din,real}}$: Carga dinámica aplicada en la traviesa considerando el carril con las irregularidades definidas con el perfil correspondiente.

en las curvas de la figura 8 se representan, para los tres perfiles de irregularidades considerados, las envolventes de los siguientes factores de amplificación dinámica:

$$\varphi_{\text{ideal}} = \frac{F_{\text{din,ideal}}}{F_{\text{est}}}$$

$$\varphi_{\text{real}} = \frac{F_{\text{din,real}}}{F_{\text{est}}}$$

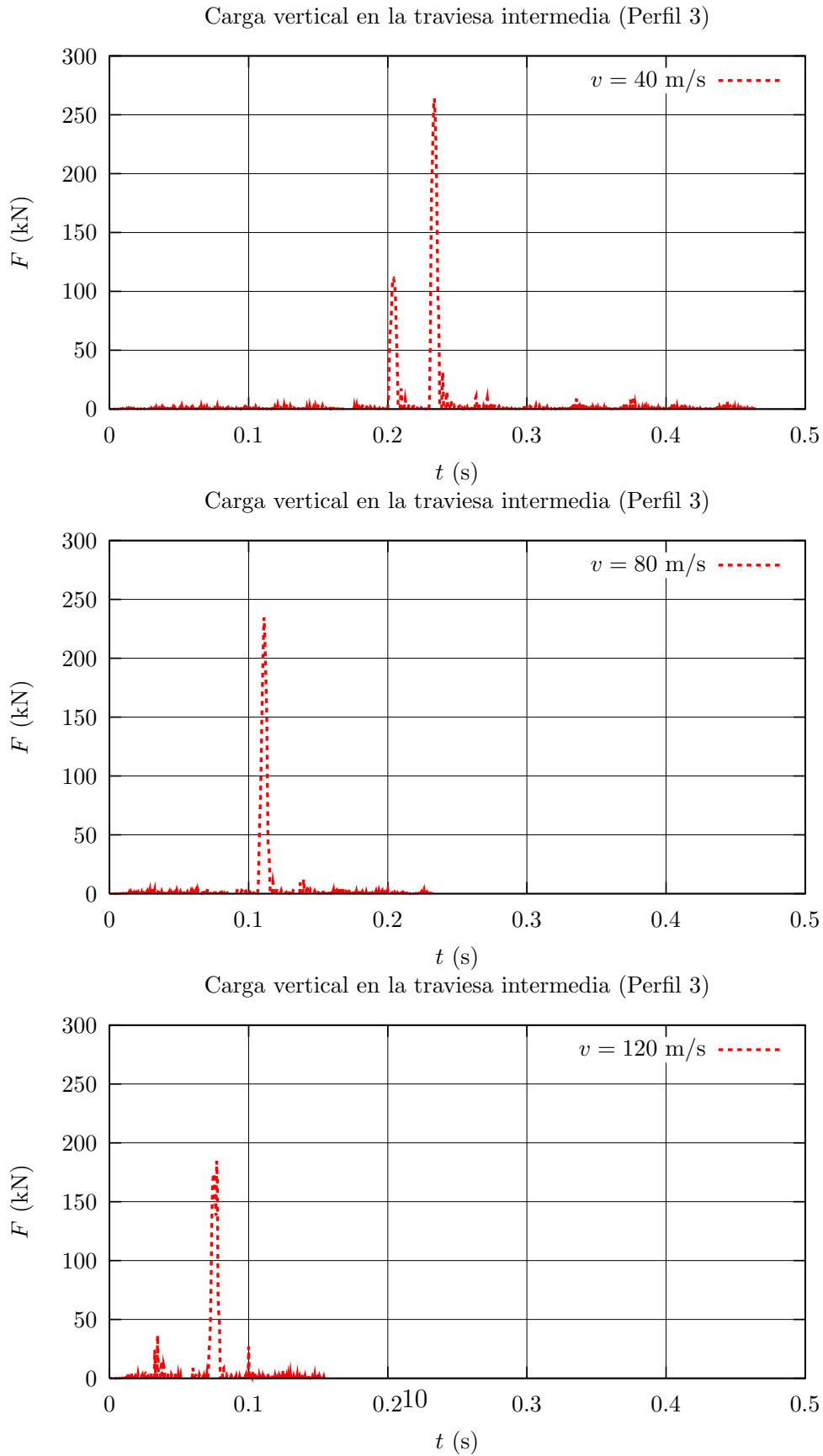


Figura 7: Carga actuante sobre una traviesa intermedia para el perfil 3 de irregularidades y para distintas velocidades

4. CONCLUSIONES

Se ha propuesto una metodología para el análisis de los esfuerzos en las fijaciones de la vía en placa bajo las acciones de cargas móviles, considerando la rigidez del contacto rueda carril. Esta metodología se basa en la utilización de algoritmos de detección e interacción del contacto entre el modelo de la rueda y el modelo del carril.

Para la rueda se han utilizado modelos de interacción simplificados constituidos por una masa vibrante pesada que representa a la rueda, un resorte que modeliza el contacto hertziano linealizado entre la rueda y el carril, y una carga constante que recoge el peso de las masas no suspendidas.

Se han obtenido los resultados correspondientes a un carril que incorpora las irregularidades generadas a partir de la función de densidad de potencia espectral definida por la SNCF para vías con buen estado de conservación y tráfico de pasajeros [5]. Se han considerado tres perfiles de irregularidades. Asimismo, a efectos comparativos también se ha considerado un carril ideal sin irregularidades.

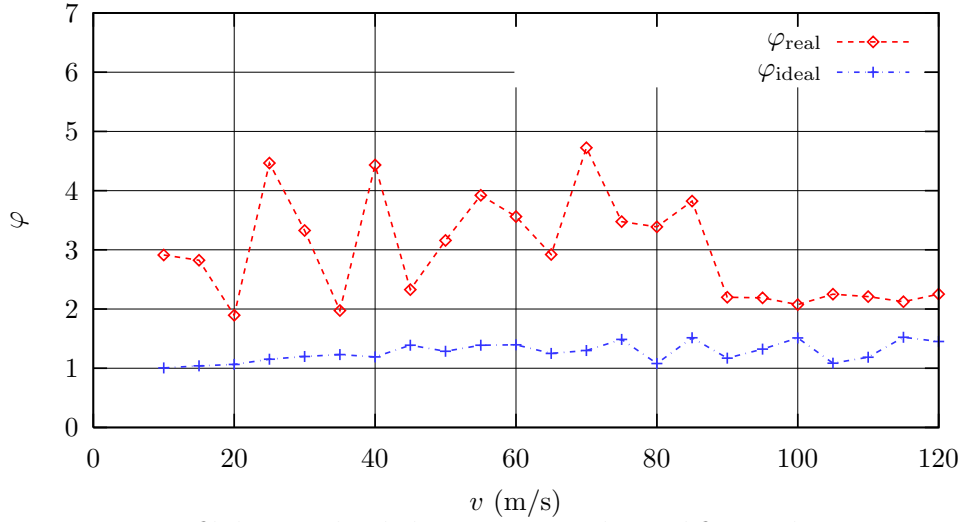
Los resultados obtenidos corresponden a los factores de amplificación dinámica respecto del valor calculado con una carga estática. Dichos factores se han obtenido tanto con el modelo de carril ideal (φ_{ideal}) como con los modelos con irregularidades (φ_{real})

De los resultados obtenidos se concluye que para el carril ideal sin irregularidades, para el rango de velocidades considerado, se obtiene un valor máximo del factor de amplificación $\varphi_{\text{ideal,max}} \approx 1,5$. Este factor de amplificación toma valores crecientes con la velocidad debido a un efecto de resonancia paramétrica. Para el carril con irregularidades los factores de amplificación máximos toman valores del orden de $\varphi_{\text{real,max}} \approx 6,5$ teniendo en este caso predominancia los efectos resonantes debidos a las propias irregularidades del carril.

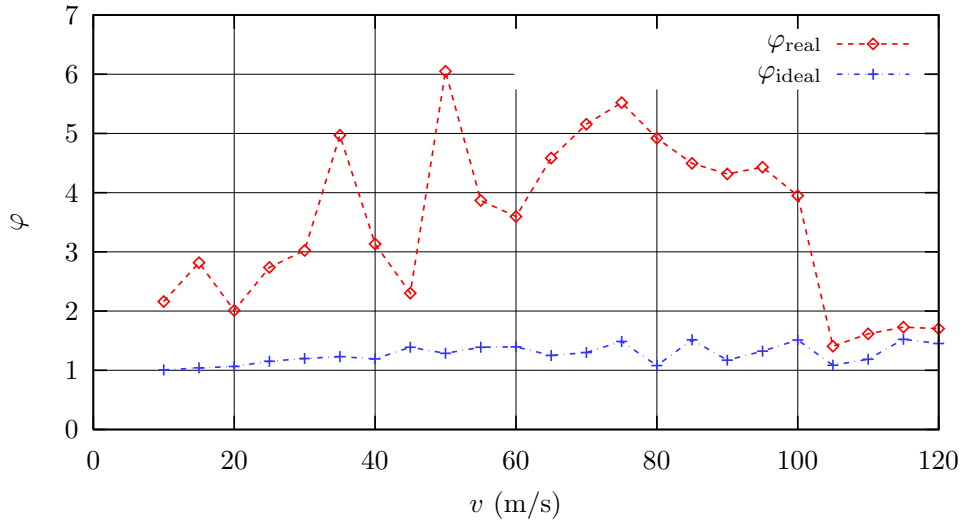
REFERENCIAS

- [1] *Noise and vibration from high-speed trains*. Edited by Victor V. Krylov. Thomas Telford. 2001.
- [2] On the rolling noise generation due to wheel/track parametric excitation. T.X. WU and D.J. THOMPSON. *Journal of Sound and Vibration*. Vol. 293, Issues 3-5, pp 556–574, 2006.
- [3] Dynamic Analysis of Metallic Arch Railway Bridge. R. CALÇADA, A. CUNHA, AND R. DELGADO. *Journal of Bridge Engineering, ASCE*. Vol. 7, No. 4, pp.214-222, (2002).
- [4] Análisis dinámico de estructuras sometidas a acciones de trenes de alta velocidad, considerando la interacción vehículo-estructura. F. GABALDÓN, F. RIQUELME AND J. GOICOLEA. *Métodos Numéricos en Ingeniería*, Eds. J.L. Pérez Aparicio et.al. Granada (2005).
- [5] *Dynamics of railway bridges*. L. FRÝBA. Thomas Telford. 1996.

Perfil de irregularidades 1. Factores de amplificación dinámica



Perfil de irregularidades 2. Factores de amplificación dinámica



Perfil de irregularidades 3. Factores de amplificación dinámica

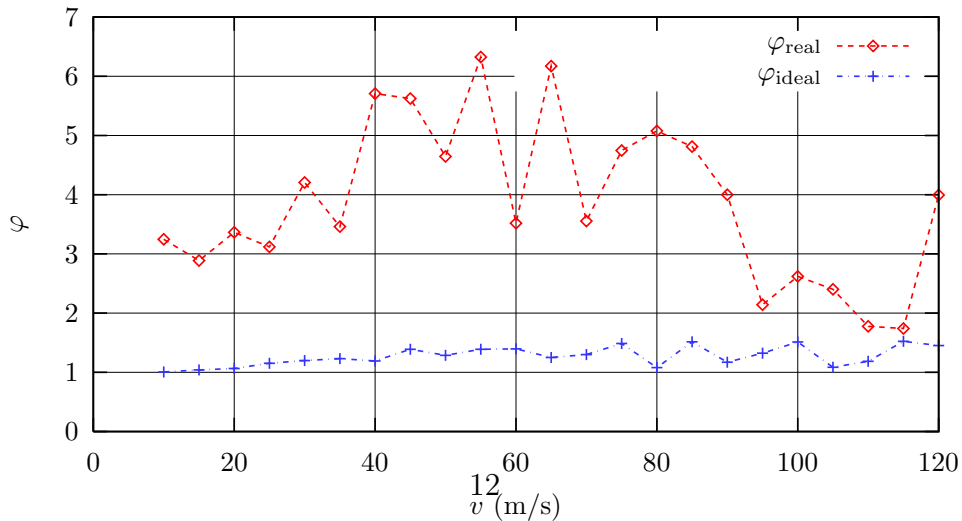


Figura 8: *Envolventes de los factores de amplificación dinámica*

- [6] *FEAP - A Finite Element Analysis Program. Version 7.5. User Manual.* R.L. TAYLOR. 2004.
<http://www.ce.berkeley.edu/~rlt/feap/>.
- [7] *FEAP - A finite element analysis program. Version 7.5 Contact Programmer Manual.* R.L. TAYLOR AND G. ZAVARISE. U.C. Berkeley, 2003.
- [8] *Modern Railway Track.* C. ESVELD. Delft University of Technology. 2nd edition. 2001.