MÉTODOS NUMÉRICOS EN INGENIERÍA
R. Abascal, J. Domínguez y G. Bugeda (Eds.)

PREDICCIÓN DE FENÓMENOS RESONANTES EN PUENTES DE FERROCARRIL

Jaime Domínguez*, **José M. Goicolea***

* Escuela Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos
Universidad Politécnica de Madrid
Avda. Complutense s/n 28040 MADRID, España
e-mail: jaime@mecanica.upm.es, página web: http://w3.mecanica.upm.es

Palabras clave: Resonancia, Puentes Ferrocarril, Cargas móviles, efectos dinámicos.

Resumen. *Este artículo se centra en el comportamiento dinámico de los puentes de ferrocarril proyectados en ramas de Alta Velocidad y Velocidad Alta. El estudio se enmarca dentro de las aportaciones realizadas al Comité redactor de la nueva Instrucción de Acciones a considerar en el Proyecto de puentes de ferrocarril (IAPF) por parte del grupo de Cálculo dinámico. Se han considerado los métodos de integración directa en el tiempo sin interacción vehículo–estructura, el cálculo por elementos finitos así como la metodología basado en la impronta dinámica del tren y los métodos que consideran los fenómenos de interacción. Entre las conclusiones se encuentran recomendaciones sobre los diversos métodos de cálculo a considerar para predecir la respuesta del sitema dinámico y la fiabilidad de éstos en relación a las mediciones reales obtenidas.*

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Riesgo de resonancia

El avance de la ingeniería mecánica nos ha llevado, en otras realidades, al desarrollo de la alta velocidad ferroviaria. Junto a ella aparecen una serie de cuestiones en su etapa de diseño: interrogantes sobre la geometría del trazado, sobre la calidad de la vía a utilizar, limitaciones para asegurar el confort del viajero, etc. Para conseguir parte de estos objetivos han proliferado la construcción de puentes para ferrocarril. Estas obras civiles se verán sometidas a unos efectos dinámicos, derivados de la alta velocidad, que antes no se habían estudiado a fondo y que, en la actualidad, precisan de un estudio más detallado.

Para determinadas distancias entre ejes y velocidades de circulación, en las líneas de Alta Velocidad e incluso para las de Velocidad Alta, el riesgo de encontrar efectos resonantes es elevado.

Si se considera la distribución espacial de las cargas de un tren, se puede llegar a obtener uno o más espaciamientos característicos, λ_k, que dependerá del tipo de vehículo (con Bogies, sin Bogies, ejes tipo TALGO, etc..). El riesgo de resonancia se producirá a las velocidades que cumplan:

$$\frac{v}{f_0} = \frac{\lambda_k}{i} \quad i = 1, 2 \ldots$$

La respuesta resonante puede generar esfuerzos superiores a los admisibles de proyecto y alterar las condiciones de circulación del tráfico al crear cambios inaceptables en la geometría del trazado, o vibraciones excesivas en los puentes ferroviarios.

El procedimiento más simplificado de cálculo, basado en el cálculo estático afectado de un coeficiente de impacto (cfr.[7] art. 6.4.3.2), queda fuera del lado de la seguridad para puentes de nueva línea en los que las velocidades de proyecto superen los 180 km/h.

Para garantizar la seguridad del tráfico ferroviario al paso de los puentes, así como el mínimo confort para los pasajeros, es necesario limitar los valores tanto de aceleraciones máximas del tablero, como de desplazamientos. Se ha comprobado que las limitaciones en aceleraciones suele ser la condicionante en el proyecto de puentes de nueva línea. Los límites fijados para la aceleración máxima en el tablero, a_{max}, en las recientes normativas europeas oscilan entre 0.5 y 0.7 veces la aceleración de la gravedad.

1.2 Alcance del estudio realizado

El presente artículo se limitará a presentar las conclusiones de un estudio comparativo de las diferentes metodologías disponibles en la actualidad para predecir y calcular los efectos resonantes en puentes de ferrocarril, así como las tendencias futuras y las nuevas metodologías para la mejor comprensión de este fenómeno.

Los resultados obtenidos se enmarcan dentro de lo aportado para la Comisión redactora de la nueva norma de acciones sobre puentes de ferrocarril (IAPF) por el grupo de trabajo de cálculo dinámico.

En este trabajo no sólo se ha tratado de acotar el rango de validez de las diversas metodologías —así como la sensibilidad de los parámetros que intervienen en los cálculos para mejorar su eficiencia— sino que se ha intentado buscar el necesario nexo con las necesidades de todos aquellos que intervienen en el mundo ferroviario: se han estudiado todas las composiciones de Alta Velocidad europeas; se han contrastado los estudios teóricos con mediciones reales en puentes con problemas ocasionandos por la resonancia y se ha intentado proporcionar metodologías de cálculo a los proyectistas de puentes que faciliten su utilización, así como la inteligibilidad de la resonancia.

Queda abierto el campo, para posterior estudio, del control de las vibraciones; se ha limitado este trabajo al estudio de las metodologías de cálculo utilizadas para los puentes. En el último apartado se efectúan una serie de recomendaciones acerca de los mismos.

1.3 Caracterización del sistema dinámico

Como en el estudio realizado no se han considerado tipologías estructurales complejas o puentes que contengan alguna característica según la cual se le pueda denominar singular, es admisible la modelización la respuesta del sistema dinámico como la de la una viga a flexión bajo cargas móviles. La ecuación dinámica que rige este comportamiento se expone en (1) para el caso de una carga puntual que recorre el puente.

$$\rho(x)\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2}\left[EI(x)\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}\right] = p(x,t) \tag{1}$$

La carga puntual, F, móvil con velocidad v, se representa como:

$$p(x,t) = F(x,t)\delta(x - vt)$$

donde:

δ Delta de Dirac, que por definición cumple $\delta(x) = 0$ si $x \neq 0$, y $\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x)\, dx = 1$

Para el caso general el sistema dinámico no se puede caracterizar de manera tan simplificada ya que:

- El comportamiento de las cargas móviles bajo las que se modelizan los ejes de las composiciones circulantes no corresponden, de ordinario, a cargas puntuales; las suspensiones de los ejes hacen que el valor nominal de la carga por eje varíe en función del tiempo y de la posición dentro de la deformada del puente. Se facilita un intercambio de energía entre los ejes y el puente de manera que, para luces pequeñas y velocidades de circulación relativamente altas, el efecto de interacción vehículo–estructura se asemeje al de un amortiguamiento estructural añadido al puente.

- A los efectos dinámicos producidos por la flexión del puente hay que sumar el posible acoplamiento de la torsión; este fenómeno puede hacer variar el valor de las cargas nominales por eje —cargando o descargando determinadas ruedas de un mismo eje— al igual que modificar significativamente las deformaciones y aceleraciones del sistema.

- Los parámetros mecánicos del puente pueden diferir dentro del comportamiento dinámico del sistema: existe una cierta inercia estructural, otros parámetros pueden diferir según el estado de aceleraciones o, sencillamente, no se puede caracterizar su respuesta sin antes haber realizado determinados ensayos dinámicos.

- A la no linealidad mecánica se debe añadir la geométrica, determinada fundamentalmente por las irregularidades del carril y el efecto producido, en vías sobre balasto, por la elasticidad del medio en el que se asienta.

Teniendo en cuenta estos condicionentes se exponen, en el siguiente capítulo, diferentes métodos de cálculo dinámico utilizados y sus diferentes grados de aproximación al comportamiento real del sistema.

2 MÉTODOS DE CÁLCULO DINÁMICO EN PUENTES DE FERROCARRIL

2.1 Cálculo cuasi-estático y coeficiente dinámico

Es el método con el que, dentro de la normativa europea[7] y española, se han venido calculando los efectos dinámicos en los puentes de ferrocarril. Se basa en la utilización de un coeficiente dinámico de impacto, Φ, que amplifica los desplazamientos máximos obtenidos según el cálculo estático para el tren de cargas tipo.

La simplificación que se consigue con la utilización del coeficiente de impacto lleva consigo las limitaciones propias de un método basado en la envolvente de cálculos reales. La extrapolación del método a composiciones de características diferentes a las de las que se utilizaron para la delimitación de la envolvente —en concreto la aparición de la Alta Velocidad— han hecho necesario la consideración de los efectos resonantes, anteriormente no estimados.

Es por esto por lo que este método se limita a velocidades de circulación inferiores a 180 km/h y no engloba los posibles efectos resonantes. No es aplicable, por tanto, a líneas de Alta Velocidad.

2.2 Integración directa en el tiempo sin interacción vehículo–estructura

Para puentes de directriz recta, sección y características de rigidez constantes a lo largo de su longitud, se recomienda el método de descomposición modal. Este cálculo se puede simplificar al pasar a un estudio bidimensional, en el que un puente queda modelizado mediante un modelo de vigas rectas; este método es válido para obtener esfuerzos longitudinales globales.

Este método se basa en la hipótesis de comportamiento lineal del puente y de las cargas, por lo que se consideran las cargas por eje como cargas puntuales de valor constante, esto es:

$$\rho(x)\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2}\left[EI(x)\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}\right] = \rho\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + EI\frac{\partial^4 u}{\partial x^4} = p(x,t) \tag{2}$$

La única diferencia que presenta el cálculo con un tren de cargas respecto al caso de carga aislada se encuentra en la carga modal; con un tren de cargas, la carga modal asociada que se utiliza para resolver la ecuación de los factores de participación es la suma de la contribución de las cargas que, en cada instante, se encuentran sobre el puente

2.3 Cálculo simplificado mediante la impronta dinámica del tren

Este método se basa en el análisis de las vibraciones libres después del paso de cada eje, en puentes isostáticos. El modelo de cálculo no tiene en cuenta la interacción vehículo–estructura (modeliza las cargas por eje como cargas puntuales), por lo que sus resultados pueden conducir, en ocasiones, a una mayoración de las aceleraciones. Una exposición más detallada de este cálculo simplificado se puede encontrar en.[4]

Es un método de cálculo que, según los estudios realizados, caracteriza muy bien los fenómenos resonantes pero sólo es aplicable a puentes isostáticos.

Se puede aproximar el valor máximo de la aceleración, Γ, como el producto de tres términos:

$$\Gamma = C_t \cdot A(K) \cdot G(\lambda) \tag{3}$$

Donde:

- λ Longitud de onda de la excitación; está definida por la relación: $\lambda = v/f_0$ [m].
- K Parámetro adimensional definido por el cociente: $\lambda/2L$.

Por otro lado::

$$C_t = \frac{2}{\rho L} \tag{4}$$

$$A(K) = \frac{K}{1-K^2}\sqrt{\mathrm{e}^{-2\zeta\frac{\pi}{K}} + 1 + 2\cos\left(\frac{\pi}{K}\right)\mathrm{e}^{-\zeta\frac{\pi}{K}}} \tag{5}$$

$$G(\lambda) = \max_{x_{ref}=x_1}^{x_{ref}=x_n}\sqrt{\left[\sum_{x_i}^{x_{ref}} P_x\cos(2\pi\delta_i)\,\mathrm{e}^{-2\pi\zeta\delta_i}\right]^2 + \left[\sum_{x_i}^{x_{ref}} P_x\,\mathrm{sen}\,(2\pi\delta_i)\,\mathrm{e}^{-2\pi\zeta\delta_i}\right]^2} \tag{6}$$

$\delta_i = \frac{x_i - x_{ref}}{\lambda}$

x_i Distancia del eje i al primer eje de la composición.

El término $G(\lambda)$ depende sólo de la distribución de las cargas por eje del tren y del amortiguamiento. Por estas razones se le suele denominar *impronta dinámica* del tren, pues es característico de cada uno, e independiente de las características mecánicas de los puentes. En la figura 1 se representa la impronta dinámica del tren ICE2, para distintos valores de amortiguamiento.

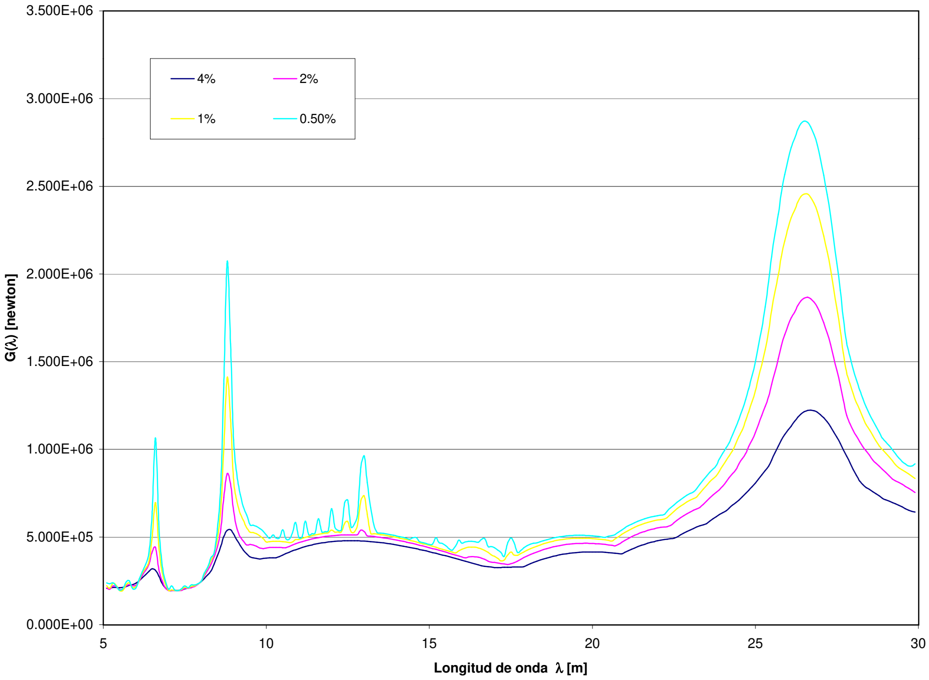

Figure 1: *Impronta dinámica del tren ICE2 según distintos valores del índice de amortiguamiento.*

$A(K)$ es una función determinada para cada caso particular; depende de la longitud del puente, de su frecuencia natural, de su amortiguamiento y del rango de velocidades de estudio. A esta función del parámetro K se le suele llamar *línea de influencia.*

Sólo C_t y $A(K)$ no dependen de las características del tren. Separando las contribuciones del puente y las del tren (impronta dinámica), se hace posible el determinar rápidamente los parámetros críticos de luz y longitud de onda que hacen máxima la aceleración en el tablero.

Éste método facilita la utilización de ábacos y hojas de cálculo que permitan la obtención de las aceleraciones en un rango de velocidades de paso y para diversas composiciones circulantes.

Aunque —como ya se ha explicado con anterioridad— la aceleración resulta determinante para el proyecto de puentes para líneas de alta velocidad, con este método también puede obtenerse los desplazamientos dinámicos. A estos desplazamientos hay que añadir los estáticos correspondientes a las cargas por eje del tren, consideradas como cargas estáticas.

2.4 Cálculo por elementos finitos

La modelización de sistemas bajo cargas variables en posición y magnitud ha sido abordada desde muy diversos aspectos. El cálculo tradicional por elementos finitos presenta dificultades para la modelización de estas cargas, fundamentalmente debido al escaso número de herramientas desarrolladas para este tipo de cálculos.

Se ha propuesto en[5] la utilización de elementos especiales que representen la interacción–vehículo estructura. La utilización de estos elementos no se encuentra disponible en los programas comerciales que utilizan el cálculo por elementos finitos, por lo que se debe acudir a la reprogramación de códigos abiertos, con su consecuente tiempo de programación.

Por otro lado, la mayoría de los programas comerciales permiten un análisis sin interacción vehículo–estructura que, como se puede apreciar en los ejemplos, proporcionan resultados idénticos a los propuestos en el apartado 2.2, aunque la definición de las cargas suele ser compleja, lo que además puede provocar la pérdida del sentido físico del problema dinámico.

En el apartado de las conclusiones se formulan algunas recomendaciones acerca de los parámetros que se utilizan en estos cálculos por elementos finitos: la modelización de la estructura, el número de modos a considerar (si se basas en el método de descomposición modal), la frecuencia de corte a considerar, etc.

2.5 Integracción directa en el tiempo con interacción vehículo-estructura

El efecto de la interacción entre el vehículo y el puente puede conducir a una disminución importante tanto de las aceleraciones como de los desplazamientos en la estructura. Este fenómeno se aprecia con mayor claridad a las velocidades de paso con las que aparecen fenómenos resonantes.

Esta disminución de los esfuerzos dinámicos en el puente alcanza una muy especial relevancia para puentes de luces inferiores a 30 metros, siendo aconsejable para el proyectista realizar un estudio dinámico más exhaustivo que incluya modelos dinámicos de los vehículos ferroviarios.

Para luces superiores a los 30 metros, el efecto debido a la interacción se puede considerar despreciable[6] , siendo, por lo tanto, suficiente realizar el cálculo dinámico empleando la metodologías de cargas puntuales que faciliten el cálculo lineal, con la simplicidad que ello conlleva.

3 COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS

3.1 Influencia de la interacción vehículo–estructura

Según los estudios referenciados en[3] la consideración de la interacción vehículo–estructura es recomendable en puentes de luces cortas (< 20 m) y para índices de amortiguamiento bajos ($\zeta < 1.5\%$).

La evaluación de los fenómenos de interacción pueden reducir los niveles de aceleración en el entorno de un 30% a un 40% como máximo. Con estos resultados se podría justificar la complejidad propia de estos cálculos.

Pero el verdadero problema del cálculo de los efectos resonantes en puentes cortos no viene dado por la necesidad de recomendar a los proyectistas la consideración de los efectos de interacción vehículo–estructura, sino en la recomendación acerca de las tipologías estructurales.

Como se puede apreciar en la figura 4 los niveles de aceleración que se obtienen con el método de integración en el tiempo sin interaccción vehículo–estructura son muy superiores a los establecidos. En el caso improbable de que se consiguiera la máxima reducción por efectos de interacción se obtendrían aceleraciones superiores a $15g$, muy por encima de los límites admisibles.

3.2 Comparativa de los métodos que no consideran la interacción vehículo–estructura

En las figuras 2 y 3 se pueden apreciar el desplazamiento medido en el centro del vano de un puente isostático de la línea de Alta Velocidad Madrid-Sevilla y los desplazamientos predecidos por el método de integración directa en el tiempo sin interacción vehículo-estructura para el mismo caso.

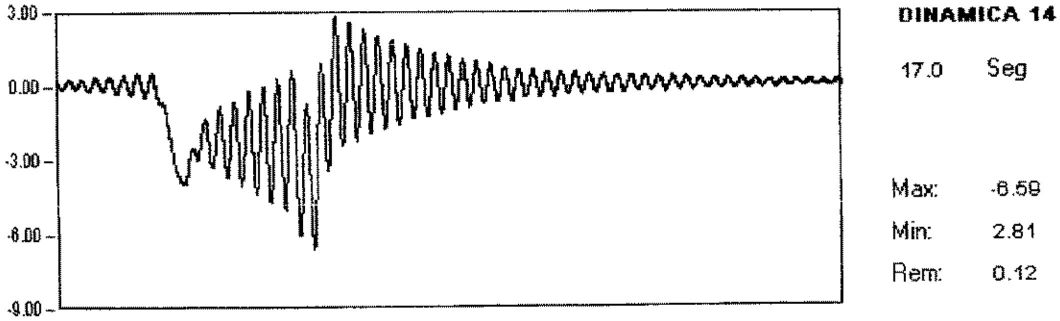

Figure 2: *Desplazamientos medidos en el Viaducto del Tajo (Línea AV Madrid-Sevilla) al paso del AVE con $v = 216 km/h$*

En los siguientes gráficos se muestran las comparativas entre los métodos de integración dinámica en el tiempo y método según la impronta dinámica del tren. los cálculos según

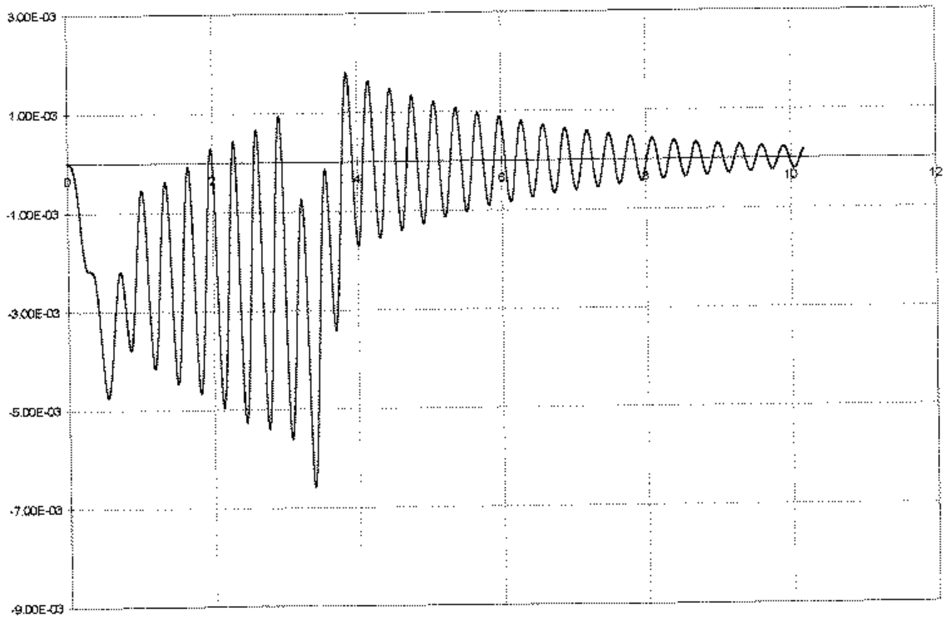

Figure 3: *Desplazamientos obtenidos con un modelo de integración directa en el tiempo sin interacción vehículo–estructura, para el Viaducto del Tajo para una velocidad de paso del AVE, $v = 216km/h$*

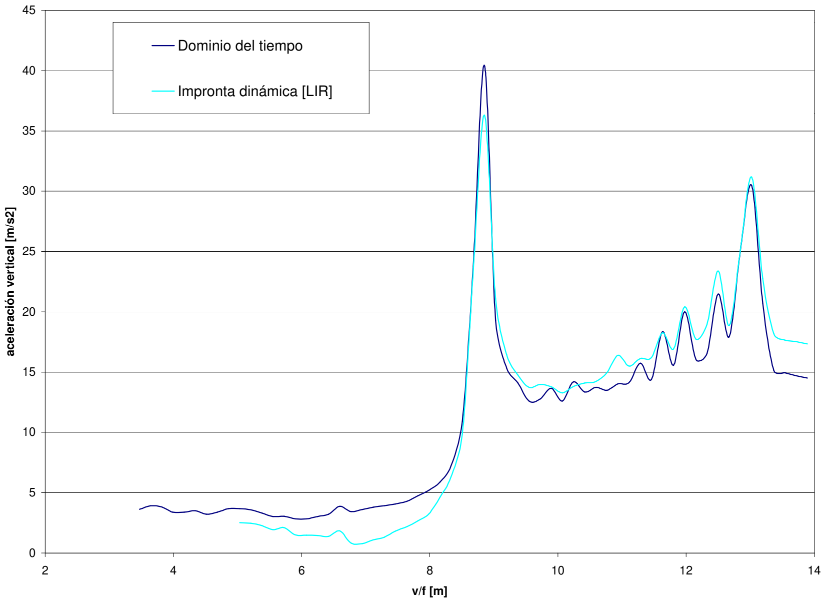

Figure 4: *Aceleraciones máximas producidas en el centro del vano de un puente de 15 m de luz, $\zeta = 0.5\%$ y $f_0 = 5$ Hz, al paso del ICE2, según los métodos de integración directa en el tiempo sin interacción vehículo–estructura y según el método de la impronta dinámica del tren.*

el método de los elementos finitos equivale, para los modelos utilizados, a una variante de la integración directa en el tiempo sin considerar interacción vehículo–estructura.

4 CONCLUSIONES

- Los métodos que no consideran la interacción vehículo–estructura son envolventes de los que sí la consideran. En primera aproximación es recomendada la utilización de éstos en cualquiera de sus variantes: integración directa en el tiempo, cálculo por elementos finitos, método de la impronta dinámica, análisis en el dominio de la frecuencia, etc.

- La influencia de la interacción en los puentes cortos no resuelve el exceso sobre los niveles de aceleraciones máximos permitidos. Antes de acudir a cálculos que estimen la influencia de la interacción, se recomienda el estudio de distintas tipologías estructurales.

- El método de cálculo según la impronta dinámica del tren es fiable para velocidades que se encuentren en el entorno de las que produzcan resonancia y, de ordinario, deja del lado de la seguridad.

- No todas las vibraciones que se producen en un puente llevan energía suficiente como para influir en el comportamiento dinámico del mismo. Para frecuencias de vibración superiores a 20 Hz, la contribución de los modos de vibración se ha visto despreciable.

- Los modos de vibración a utilizar en un análisis según la descomposición modal de la respuesta para puentes isostáticos se pueden reducir al primero.

- En los estudios dinámicos se considerará variable la velocidad de paso; el rango de estos valores debe oscilar desde una velocidad teórica mínima —20 km/h, velocidad cuasiestática— hasta la máxima previsible en el puente. El incremento de velocidades, para cálculos preliminares, no deberá ser superior a 10 km/h. En el entorno de velocidades cercanas a las que produzcan efectos resonantes se deberá refinar el cálculo, con intervalos menores.

REFERENCIAS

[1] Clough, R.W. y Penzien, J. (1993): Dynamic of Structures (2a. ed.)
[2] Chopra, A.K. (1995): Dynamics of Structures, Theory an Application to Earthquake Engineering.
[3] ERRI D 214. Borrador provisional ”Ponts rails pour vitesses> 200 km/h et< 350 km/h. Conditions de déformation dynamiques”. 23-6-1997
[4] ERRI D 214. Borrador provisional ”Méthode simplifiée basée sur la ligne d'influence – Signature correspondante”. 23-6-1997

[5] Yang, Y.; Yau, J. "Vehicle-Bridge interaction element for dynamic analysis". Journal of Structural engineering. November 1997.

[6] Fryba, L. "Vibration of solids ans structures under moving loads". Noordhoff International Publishing. 1972.

[7] Eurocódigo 1: Bases de proyecto y acciones en estructuras. Parte 3: Acciones del tráfico en puentes. Norma UNE-ENV 1991-3.