

Avances en el cálculo rápido de envolventes de respuesta para el diseño de puentes ferroviarios de alta velocidad

Advances in the Rapid Calculation of Response Envelopes for the Design of High-Speed Railway Bridges

Alejandro E. Martínez Castro^a, Enrique García-Macías^b y

Alejandro Castillo Linares^c

^aDr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Granada. Profesor Titular de Universidad. amcastro@ugr.es

^bDr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Granada. Profesor Titular de Universidad. enriquegm@ugr.es

^cIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. ACL Diseño y Cálculo de Estructuras. CEO. acastillo@acl-estructuras.com

RESUMEN

Esta comunicación presenta una mejora en la solución semi-analítica para el análisis de puentes de ferrocarril de alta velocidad, basada en la Transformada de Hilbert y la optimización de los tiempos de evaluación. Gracias a la capacidad de la solución semi-analítica de proporcionar la integración exacta de las ecuaciones modales en el dominio del tiempo, sobre una malla de elementos finitos, no es necesario introducir un paso de tiempo de integración, con lo que es posible extraer las curvas envolventes de respuesta con menor coste computacional. La potencialidad de la solución propuesta para la optimización y mejora en el diseño se ilustra a través de varios ejemplos numéricos tomados de estructuras reales.

ABSTRACT

This paper presents an improvement in the semi-analytic solution for the analysis of high-speed railway bridges, based on the Hilbert Transform and the optimization of evaluation times. Owing to the semi-analytic solution's ability to provide the exact integration of the modal equations in the time domain over a finite element mesh, there is no need to introduce a time integration step, allowing response envelope curves to be extracted with lower computational cost. The potential of the proposed solution for optimization and design improvement is illustrated through several numerical examples from real structures.

PALABRAS CLAVE: Dinámica, Puentes, Ferrocarril de Alta Velocidad, Métodos Numéricos.

KEYWORDS: Dynamics, Bridges, High-Speed Railway, Numerical Methods

1. Introducción

Las políticas de transporte de la Unión Europea abogan por soluciones intermodales de Movilidad como Servicio para pasajeros y mercancías, así como a la reducción de las

emisiones de CO₂ y la lucha contra el cambio climático. El Libro Blanco del Transporte de la Comisión Europea de 2011 [1] establece el objetivo de trasladar el 30% del transporte de

mercancías por carretera hacia el ferrocarril o el transporte marítimo-fluvial para 2030 y el 50% en 2050. En este contexto, el ferrocarril de alta velocidad, con menores emisiones y externalidades, desempeña un papel clave, respaldado por importantes inversiones en los nuevos corredores dentro de las Redes Transeuropeas de Transporte (TEN-T).

El diseño de infraestructuras ferroviarias de alta velocidad es, sin embargo, un desafío complejo debido a las elevadas cargas dinámicas transmitidas por los trenes en movimiento. Esto es especialmente crítico en puentes, donde los fenómenos de resonancia y amplificación dinámica dificultan el cumplimiento de los estados límite último y de servicio [2]. Normativas como el Eurocódigo [3] y la UIC [4] limitan las aceleraciones verticales para garantizar el confort de los pasajeros y evitar fenómenos de inestabilidad en la vía, por lo que resulta esencial analizar la respuesta dinámica de los puentes ferroviarios desde las primeras etapas de diseño conceptual [5].

En general, el estudio de los efectos dinámicos sobre la integridad estructural se lleva a cabo mediante el incremento de la respuesta estática a través de Factores de Amplificación Dinámica (DAFs del inglés *Dynamic Amplification Factors*), cuyas expresiones para cargas de tren reales están recogidas en normativas de diseño, como el Eurocódigo (anexo C [3]), y en numerosos estudios científicos especializados (véase p.ej. [6]). Por otra parte, la estimación de las aceleraciones máximas del tablero de puentes ferroviarios requiere la resolución del problema de vibración inducida por cargas móviles. Este problema ha sido ampliamente estudiado en las últimas décadas, y se han propuesto múltiples enfoques en la literatura, muchos de ellos recogidos en la revisión de Ouyang [7]. Estos incluyen desde técnicas simplificadas de un grado de libertad (SDOF) hasta modelos más sofisticados que consideran la interacción vehículo-puente y/o suelo-puente (véase p.ej. [8]). Investigaciones recientes, como el trabajo

de Moliner y coautores [9], evidencian que la interacción tren-vía-puente (T^vTB) puede alterar las características modales de puentes ligeros y flexibles. En estos casos, los métodos de integración numérica paso a paso, como el ampliamente utilizado método de Newmark- β , se vuelven imprescindibles para resolver el problema acoplado de vibraciones no lineales. Por el contrario, los enfoques basados en superposición modal, menos exigentes computacionalmente, son adecuados para puentes con masas muy superiores a las de los trenes, tales como puentes de hormigón y acero con vía en balasto o losa [10], por lo que siguen siendo ampliamente utilizados. En estos casos, los trenes se modelan como tándems de cargas sin masa desplazándose a velocidad constante, y el problema dinámico se reduce a resolver una serie de ecuaciones diferenciales modales desacopladas. No obstante, estas ecuaciones generalmente requieren del uso de técnicas de integración numérica paso a paso, existiendo únicamente soluciones analíticas para configuraciones simplificadas (véase, por ejemplo [11]).

A pesar de los grandes avances en la simulación dinámica de puentes ferroviarios ante el paso de trenes de alta velocidad, los métodos actuales suelen ser computacionalmente exigentes, lo que limita su uso en aplicaciones que requieren cálculos iterativos intensivos, como la optimización estructural o la identificación de daños. En este contexto, los autores han desarrollado en los últimos años una serie de metamodelos para la extracción rápida de envolventes de respuesta de puentes de ferrocarril ante el paso de trenes de alta velocidad sobre la base de la solución semi-analítica propuesta por Martínez-Castro y co-autores [12]. La principal ventaja de esta solución radica en que, mientras el dominio espacial se aborda mediante el método de elementos finitos (MEF) y superposición modal, la solución es analítica en el dominio temporal. A diferencia de los esquemas paso a paso, la frecuencia de muestreo

en la solución semi-analítica solo depende de los requisitos de resolución para la detección de valores máximos, ya que no presenta errores de integración numérica. En esta línea, los autores propusieron recientemente dos metamodelos para acelerar la extracción de curvas envolventes de respuesta, uno basado en la sensibilidad de la respuesta dinámica a la velocidad del tren (TSS) [13], y otro basado en la transformada de Hilbert (HTSA) de la solución semi-analítica [14]. En la presente comunicación, se propone un nuevo metamodelo combinando el metamodelo HTSA y un muestreo inteligente de la solución dinámica. Este último aprovecha la forma cerrada en el dominio del tiempo de la solución semi-analítica y su transformada de Hilbert, por lo que se muestrea directamente la respuesta en un intervalo temporal acotado donde se esperan los fenómenos resonantes, reduciendo así substancialmente el coste computacional.

A continuación, se presenta en la Sección 2 el marco teórico del nuevo metamodelo propuesto. A continuación, en la Sección 3, se presentan dos casos de estudio que ilustran la potencialidad de la nueva solución propuesta, y finalmente la Sección 4 concluye el trabajo.

2. Marco Teórico

2.1 Solución semi-analítica basada en la Transformada de Hilbert

La solución semi-analítica consta de dos pasos consecutivos: (i) análisis modal lineal de la estructura del puente utilizando un modelo numérico, como un modelo MEF; y (ii) solución analítica de la respuesta del puente en el dominio del tiempo bajo cargas móviles. Bajo la hipótesis de linealidad, la respuesta dinámica del puente a un tren de cargas se puede obtener mediante la superposición lineal de la solución fundamental para una carga móvil única. Suponiendo una carga puntual única P que cruza el puente a una velocidad constante v , se puede escribir la carga dependiente del tiempo resultante como

$p(x, t) = P\delta(x - vt)$, siendo δ la función delta de Dirac, y x y t denotando la coordenada longitudinal a lo largo de la vía de carga y la variable temporal, respectivamente. Definamos un elemento finito $e \equiv \{x: x \in [x_i^e, x_j^e]\}$ situado a lo largo de la vía de carga entre las coordenadas x_i^e y x_j^e . Además, sea x^e la abscisa relativa al origen del elemento, es decir, $x^e = x - x_i^e$. A partir de esto, el desplazamiento vertical $w^e(x, y, z, t)$ de un punto arbitrario (x, y, z) en el elemento e se puede obtener mediante expansión modal como:

$$w^e(x, y, z, t) = \sum_{n=1}^m q_n(t) \varphi_n^e(x, y, z), \quad (1)$$

donde el término $q_n(t)$ denota la amplitud modal dependiente del tiempo del n -ésimo modo o coordenada generalizada, y $\varphi_n^e(x, y, z)$ es modo de vibración n evaluado en (x, y, z) . El número m de modos de vibración que deben ser considerados en el análisis dinámico generalmente corresponde a aquellos con frecuencias resonantes hasta 30 Hz. Además, la solución semi-analítica asume que la discretización de la estructura del puente permite la consideración de grados de libertad (DOF) equivalentes tipo viga 1D a lo largo de la vía de carga. De esta forma, el campo de desplazamientos a lo largo de la vía de carga puede ser caracterizado por funciones de forma de spline cúbico de Hermite, $h_i(x^e)$, de tal manera que la Ecuación (1) puede reescribirse sin dependencia explícita de las variables y y z como:

$$w^e(x, y, z, t) = \sum_{n=1}^m q_n(t) \sum_{i=1}^4 G_{ni}^e h_i(x^e) \quad (2)$$

donde los coeficientes de la matriz G_{ni}^e representan la evaluación de las formas de los modos a lo largo de la vía de carga. Las funciones $q_n(t)$ en la Ecuación (2) en forma cerrada como la suma de una solución homogénea y una particular, $q_n(t) = q_n^h(t) + q_n^p(t)$, dadas por:

$$q_n^h(t) = e^{\zeta_n \omega_n \tau} [A_n \cos(\omega_n^d \tau) + B_n \sin(\omega_n^d \tau)] \quad (3)$$

$$q_n^p(t) = \alpha_n^0 + \alpha_n^1(v\tau) + \alpha_n^2(v\tau)^2 + \alpha_n^3(v\tau)^3 \quad (4)$$

con $\tau = t - x_i^e/v$ el tiempo relativo para el elemento e . Los coeficientes de la solución homogénea, A_n y B_n , así como la expresión de los coeficientes α_n^i se encuentran especificados en [12].

Gracias a la forma cerrada de las soluciones (3) y (4), es posible extraer la HT también en forma cerrada. En general, la HT de una función $x(t) \in L^p(\mathbb{R})$, $1 \leq p < \infty$, es una función de valor real $\tilde{x}(t)$ dada por la siguiente transformación integral [15]:

$$\mathcal{H}[x(t)] = \tilde{x}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(s)}{t-s} ds \quad (4)$$

donde PV denota el valor principal de Cauchy de la integral debido a una posible singularidad en $t = s$, siendo s la variable de integración. El principal interés de la HT radica en su capacidad para extender señales analíticas a partir funciones de valor real. Una señal analítica, o proyección en cuadratura, se define como una señal compleja cuya parte imaginaria es la HT de la parte real, es decir $X(t) = x(t) + i\tilde{x}(t)$. Las señales analíticas se representan típicamente en forma de un fasor $X(t) = A(t)e^{i\psi(t)}$ que rota en el plano complejo con módulo $A(t) = |X(t)|$ y posición angular $\psi(t) = \arctan \frac{\tilde{x}(t)}{x(t)}$.

Dada la forma cerrada en el dominio del tiempo de la Ecuación (2), la transformación integral en (4) puede aplicarse directamente como:

$$\tilde{w}^e(x, y, z, t) = \sum_{n=1}^m \tilde{q}_n(t) \sum_{i=1}^4 G_{ni}^e h_i(x^e) \quad (5)$$

Las expresiones analíticas de la HT en la Ecuación (5) se encuentran detalladas en la referencia [14], así como los detalles de su implementación en código FORTRAN, omitidas aquí por brevedad. Asimismo, en ese trabajo anterior se presentan estrategias para acelerar el cálculo de los valores principales de Cauchy relativos a las HT de la parte homogénea y particular de la solución. En concreto, se plantea la reducción de la integral en (5) a ventanas en el entorno de la posición de la carga,

así como la extensión infinita y la aplicación de la identidad de Bedrosian a la parte homogénea de la solución para modos altos. Con ello, la solución resultante arroja la amplitud instantánea $A^e(x^e, t) = \sqrt{w^e(x^e, t)^2 + \tilde{w}^e(x^e, t)^2}$, (6) envolvente de respuesta.

2.2 Concepto de solución optimizado combinando la solución semi-analítica basada en la Transformada de Hilbert con muestreo inteligente

Como resultado de la HT de la solución semi-analítica, el modelo resultante, denominado HTSA (*HT-based semi-analytic*), permite determinar en forma cerrada la envolvente instantánea de respuesta como se ilustra en la Figura 1. Dado que esta envolvente presenta una oscilación más lenta con respecto a la señal original, es posible estimar el valor máximo de respuesta con una menor frecuencia de muestreo sin una pérdida significativa de precisión, tal y como se muestra la Figura 1. La aproximación submuestreada resultante permite extraer las curvas envolventes de respuesta máxima para un conjunto de trenes y velocidades de paso con un tiempo de cálculo significativamente menor.

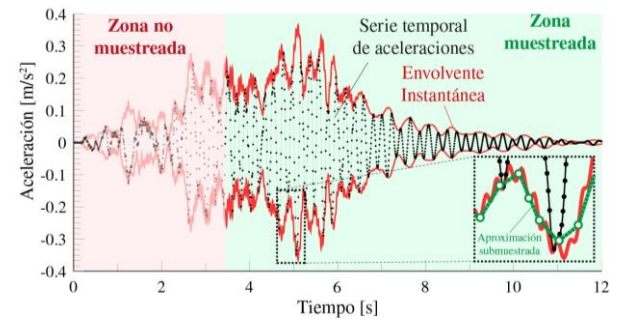


Figura 1. Concepto del enfoque propuesto combinando el metamodelo HTSA y un muestreo reducido.

Generalmente, la solución en el dominio del tiempo se extrae para el rango de tiempos desde que la primera carga del tren entra en el puente ($t = 0$), hasta un tiempo suficiente de vibraciones libres ($t = t_f$), una vez el tren abandona el puente. Con ello, se extrae la respuesta máxima para cada tren y velocidad de

paso, determinando así las curvas de respuesta envolvente.

No obstante, es sabido que las mayores respuestas resonantes aparecen cuando el tren se encuentra sobre la estructura, con lo que rara vez los máximos aparecen en las partes iniciales de la serie temporal. Dado que la solución semi-analítica está definida en forma cerrada en el dominio del tiempo, actuando la variable temporal t simplemente como un parámetro de muestreo, resulta trivial evaluar la Ecuación (6) solo en un intervalo de tiempo reducido donde se espera encontrar la respuesta máxima. Con esta intuición, este trabajo propone un nuevo metamodelo combinando HTSA con un muestreo temporal reducido como se muestra en la Figura 1, denominado HTSA-red. Como aproximación inicial, el cálculo dinámico no considera los instantes iniciales de las series temporales, extrayendo las curvas de respuesta envolvente a partir de la respuesta cuando el tren se encuentra sobre la estructura. En concreto, para un puente con un único vano de longitud L , se propone iniciar el análisis cuando la primera carga se localiza sobre el centro de vano, es decir $\frac{L}{2v} \leq t \leq t_f$. Con ello, las curvas envolventes pueden determinarse con un tiempo de cálculo ultra reducido, combinando la eficiencia computacional del modelo HTSA con un menor espacio de muestreo en el dominio del tiempo.

3. Resultados numéricos y discusión

A continuación, se presentan dos casos de estudio para ilustrar la potencialidad de la metodología propuesta. En la Sección 3.1 se presenta un caso de estudio simplificado de una viga simplemente apoyada, seguido de un puente mixto acero-hormigón real en la Sección 3.2, el viaducto de Santa Ana. El propósito de la primera sección es el de ilustrar la capacidad del modelo propuesto para extraer la envolvente de las series temporales de respuesta en intervalos reducidos de tiempo. Finalmente, el segundo

caso de estudio muestra la capacidad del modelo para extraer las envolventes de respuesta máxima en un puente realista débilmente amortiguado con una reducción substancial en los tiempos de cálculo.

3.1 Caso de estudio I: Viga simplemente apoyada.

El primer caso de estudio se esquematiza en la Figura 2(a) y corresponde a una configuración de puente analizada por la norma española para puentes ferroviarios IAPF-07 [16]. Consiste en una viga simplemente apoyada de Euler-Bernoulli con una longitud de $L = 15$ m, una masa por unidad de longitud constante $\rho A(x) = 15$ t/m, una rigidez a flexión $EI(x) = 7694.081$ MPa y un coeficiente de amortiguamiento modal constante $\zeta = 2\%$. Se han estudiado dos casos de carga diferentes: (i) una carga móvil única de 100 kN que cruza la viga a 150 km/h (distancia del origen de 50 m), y (ii) el tren ICE2 de 56 ejes a una velocidad de 160 km/h, mostrado en la Fig. 6 (la composición del tren se detalla en [16]). En estos análisis, se han considerado los cuatro primeros modos de vibración representados en la Figura 2(b). La viga se ha modelado en el software SAP200 mediante 24 elementos tipo viga.

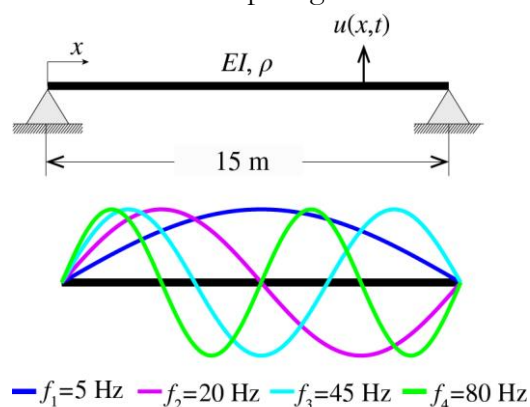


Figura 2. Geometría y propiedades mecánicas de una viga simplemente apoyada con sección transversal constante (a), y propiedades modales de la viga (b).

Las series temporales de desplazamiento y aceleración calculadas en el centro del vano de la viga para el caso de carga aislada y el tren ICE2

se presentan en las Figuras 3 y 4, respectivamente. En estas figuras, se muestra la solución obtenida mediante el enfoque semi-analítico junto con el meta-model HTSA-red con instantes de tiempo inicial $t_i = 0$, $t_i = \frac{0.25L}{v}$, $t_i = \frac{0.50L}{v}$, y $t_i = \frac{0.75L}{v}$.

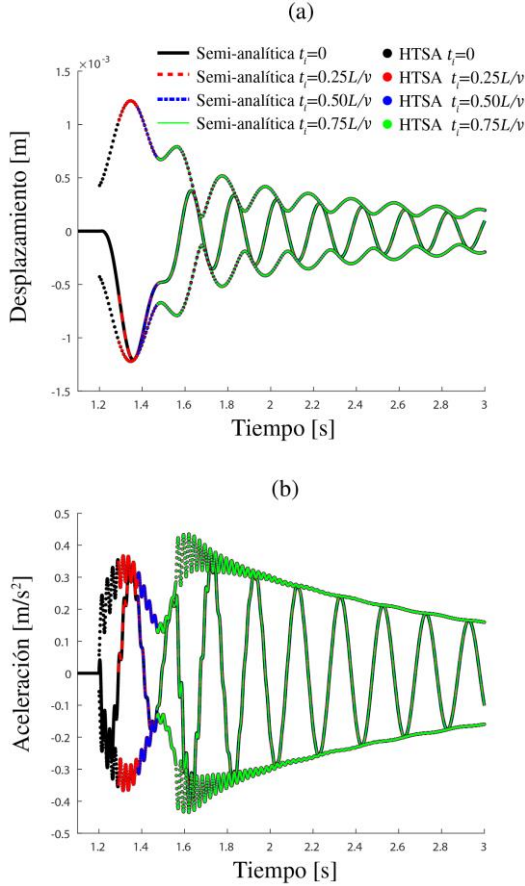


Figura 3. Series temporales de desplazamiento (a) y aceleración (b) en el centro del vano de una viga simplemente apoyada atravesada por una carga móvil única de 100 kN que viaja a 150 km/h, partiendo desde 50 m del origen de la viga ($\Delta t=1$ ms).

En primer lugar, se observa que independientemente del instante de tiempo inicial considerado, las soluciones muestran perfecto solapamiento en los intervalos de tiempo comunes. A diferencia de los métodos de integración paso a paso, esto es posible gracias a la definición en forma cerrada de la solución semi-analítica, por lo que la variable temporal es únicamente empleada como parámetro de muestreo. Asimismo, estas figuras muestran cómo efectivamente el metamodelo HTSA permite extraer las envolventes de respuesta,

necesitando de un menor tiempo de muestreo para determinar el valor de respuesta máximo.

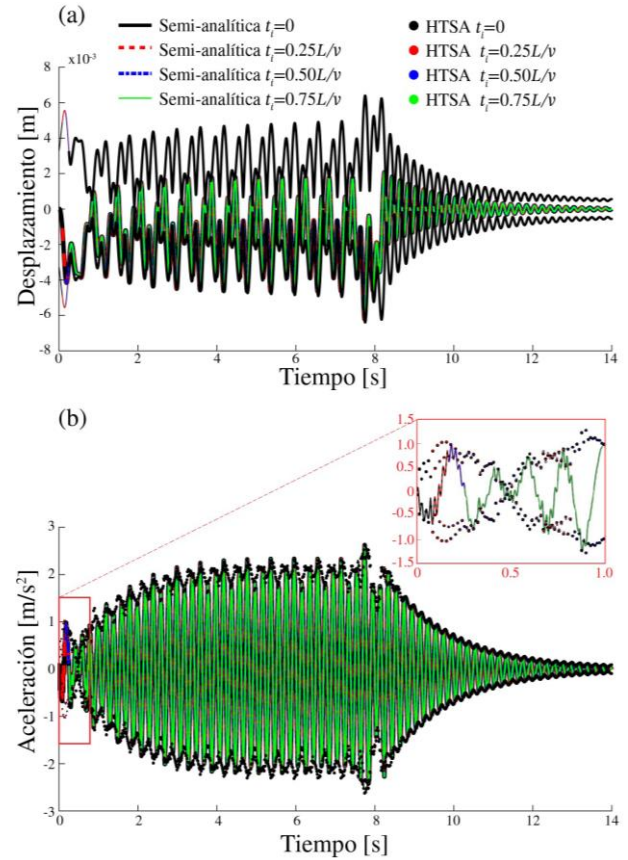


Figura 4. Series de desplazamiento y aceleración en el centro del vano de una viga simplemente apoyada atravesada por el tren ICE2 a una velocidad de 160 km/h ($\Delta t=1$ ms).

3.2 Caso de estudio II: Viaducto de Santa Ana

Este segundo caso de estudio aborda el análisis dinámico de un puente mixto acero-hormigón en 3D, el viaducto de Santa Ana. El viaducto de Santa Ana se encuentra en el Eje Transversal Andalúz de Alta Velocidad Huelva-Almería, y cruza la línea de alta velocidad Córdoba-Málaga cerca de la localidad de Santa Ana. Se trata de un puente mixto acero-hormigón de cinco vanos, que incluye cuatro vanos exteriores de 32.4 m y 27.0 m, y un vano central en arco de 86.4 m de longitud (véase la Figura 5(a)). El puente se define con una sección transversal en U invertida de 12.40 m de ancho, compuesta por dos vigas principales de acero de alma llena en forma de I,

vigas transversales de acero y un tablero de hormigón de 0.35 m de espesor vertido sobre chapas perfiladas de acero. El vano central se caracteriza por dos arcos parabólicos de acero con una flecha máxima de 17.0 m. Estos arcos están formados por vigas de acero con sección en cajón de 0.80 m $\times$ 1.5 m $\times$ 2.5 cm y se encuentran atados a las vigas longitudinales mediante una celosía de péndolas tubulares con un diámetro exterior de 0.4 m y un espesor de pared de 2 cm. Tanto las vigas longitudinales como los arcos están inclinados 9° con respecto a la vertical. Por último, la superestructura de vía está compuesta por un carril UIC-60, traviesas de hormigón pretensado y una capa de balasto de 0.50 m de espesor.

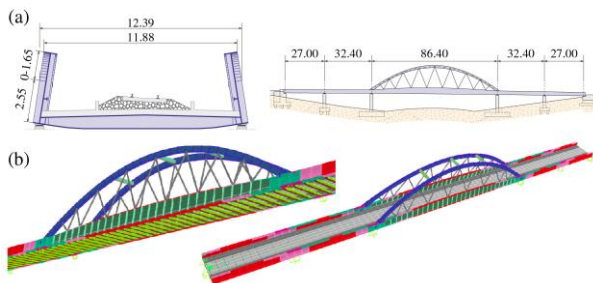


Figura 5. Sección transversal y vista lateral (a), y MEF del viaducto de Santa Ana (b) (Unidades en m).

Para extraer las características modales de la estructura, el viaducto se ha modelado en el software SAP2000 (véase Figura 5(b)). Para ello, se han utilizado elementos de tipo lámina para modelar las vigas de acero, las vigas transversales y los rigidizadores, con hasta catorce secciones diferentes y espesores comprendidos entre 12 y 40 mm. El tablero mixto (hormigón y chapas perfiladas de acero) se ha modelado con elementos de lámina ortotrópicos. Los arcos, arriostramientos horizontales y péndolas tubulares se han modelado con elementos de viga. Además, se han empleado elementos de viga sin masa y con rigidez infinita para simular la conexión entre el tablero de hormigón y las costillas de acero mediante pernos de cortante. En total, el modelo de elementos finitos consta de 54,660 elementos, incluyendo 810 elementos de viga y 53,850 elementos de lámina. Para más detalles acerca de la modelización y los

parámetros materiales empleados, el lector puede consultar la referencia [14].

El análisis modal lineal del puente en SAP2000 estima un total de 266 modos de vibración con frecuencias resonantes inferiores a 30 Hz, incluidos en los análisis dinámicos posteriores. La Figura 6 muestra los ocho primeros modos de vibración del viaducto. Entre ellos, se encuentran tres modos locales de los arcos: un modo de primer orden con una frecuencia de 1.37 Hz, un modo de segundo orden de 2.36 Hz y un modo de tercer orden de 4.03 Hz. También se observan en la Fig. 17 los modos de flexión de primer y segundo orden, con frecuencias resonantes de 2.46 Hz y 2.83 Hz, respectivamente, así como dos modos locales de flexión de los vanos exteriores con frecuencias de 3.17 Hz y 3.26 Hz. Finalmente, se presenta un modo de torsión de primer orden del vano central con una frecuencia resonante de 3.59 Hz.

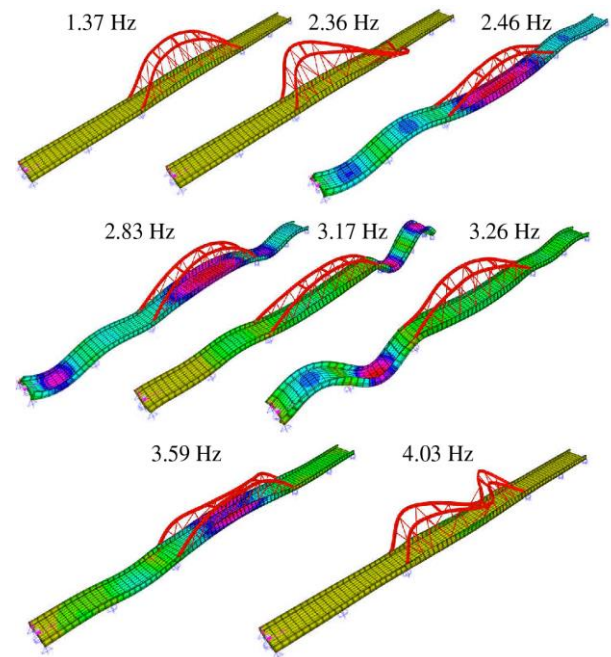


Figura 6. Primeros ocho modos de vibración obtenidos mediante análisis modal lineal del MEF del viaducto de Santa Ana.

En cuanto al amortiguamiento de la estructura, se ha seleccionado una tasa de amortiguamiento modal constante de $\zeta = 0.5\%$, de acuerdo con las prescripciones de la

normativa española IAPF-07 [16] para puentes mixtos de acero y hormigón. La respuesta dinámica del viaducto se ha calculado en 15 puntos de postprocesado distintos en el tablero, bajo el paso del primer tren de la serie HSML-A del Eurocódigo. Los puntos de postprocesado se han ubicado en cada cuarto de vano y en el centro del tablero a lo largo de su eje longitudinal. En este caso, para el cálculo del metamodelo HTSA, se ha seleccionado una ventana de integración de 8.1 m (del orden de la distancia media entre ejes del tren), y se ha considerado la aproximación de extensión infinita de la solución homogénea para todos los modos de vibración con frecuencias resonantes superiores a 10 Hz (para más detalles, véase [14]). En todas las series temporales analizadas se ha incluido un tiempo de vibración libre equivalente a seis veces el mayor período del puente.

Las Figuras 7 (a) y (b) muestran las envolventes de diseño de los valores absolutos máximos de desplazamiento y aceleración, respectivamente, en función de la velocidad del tren bajo el paso del tren A1 del modelo HSML-A., para el rango de velocidades comprendido entre 20 y 282 km/h con un muestreo cada 1 km/h. Para el caso de la solución semi-analítica, las series temporales se han determinado con una frecuencia de muestreo de $\Delta t = T_{min}/10$, con T_{min} el período mínimo de todos los modos de vibración incluidos en el análisis. Por el contrario, las envolventes de diseño calculadas con el modelo HTSA-red propuesto se han extraído con un paso de tiempo de $\Delta t = T_{smin}$ y un instante de tiempo inicial $t_i = \frac{0.5L}{v}$. Nótese que ambas soluciones aportan soluciones idénticas para la envolvente de desplazamientos máximos, y resultados muy aproximados para la envolvente de aceleraciones máximas, con un error máximo en la aceleración pico de 0.0656 m/s². Por otra parte, mientras la solución semi-analítica original requiere 1 hora y 30 minutos para completar el análisis de la Figura 7, el metamodelo HTSA-red requiere únicamente 50

minutos, suponiendo una reducción de 44.4% en el tiempo de cálculo.

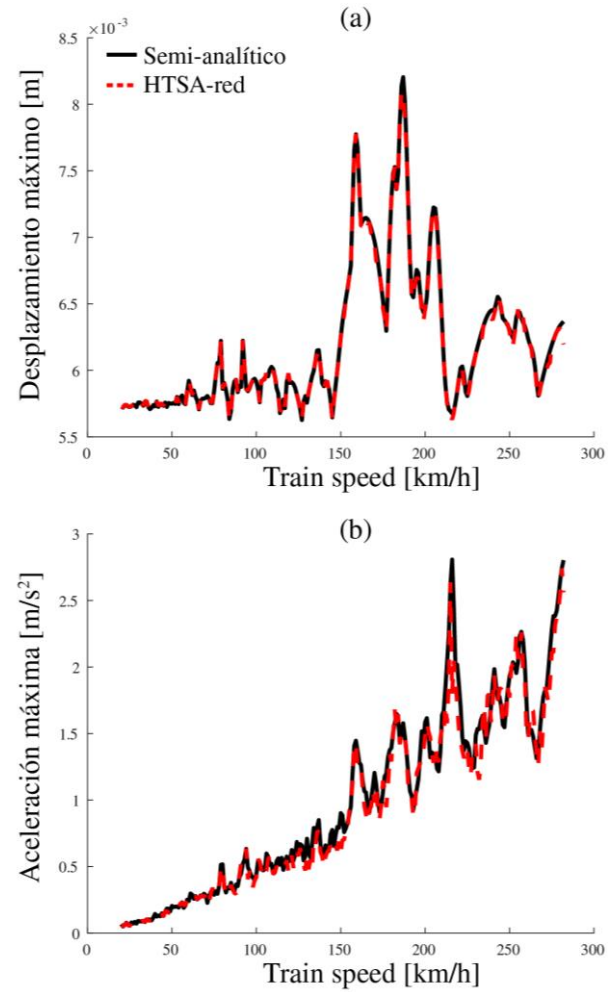


Figura 7. Envolventes absolutas máximas de desplazamientos (a) y aceleraciones (b) del viaducto de Santa Ana en función de la velocidad del tren, determinadas mediante el método semi-analítico ($\Delta t = \frac{T_{min}}{10}$, $t_i = 0$) y el metamodelo HTSA-red ($\Delta t = T_{min}$, $t_i = \frac{0.5L}{v}$). Los desplazamientos y aceleraciones se han calculado en el borde de la capa de balasto en el centro del vano central (Tren A1 del modelo HSML-A del Eurocódigo).

4. Conclusiones

Este trabajo ha presentado un nuevo metamodelo para la extracción rápida de curvas envolventes de respuesta máxima en puentes de ferrocarril de alta velocidad combinando la transformada de Hilbert de la solución semi-analítica con un muestreo temporal reducido. Por una parte, gracias a la forma cerrada de la

solución semi-analítica en el dominio del tiempo, es posible extraer la transformada de Hilbert en forma cerrada, con la que a su vez es posible extraer la envolvente instantánea de respuesta. Dicha envolvente presenta un carácter menor oscilante que la solución inicial, por lo que es posible estimar el máximo de respuesta mediante una aproximación submuestreada sin pérdida substancial de precisión. Por otra parte, dado que la variable temporal no determina la precisión de la respuesta como en modelos de integración paso a paso, sino que actúa como un simple parámetro de muestreo, es posible extraer la respuesta solo en intervalos temporales de interés donde se espere la respuesta resonante. En este trabajo preliminar, se propone limitar la respuesta al intervalo de tiempo entre que el tren se encuentra en la zona central del puente y un período de vibraciones libres. La combinación de una tasa de muestreo temporal reducida, así como una exploración del dominio del tiempo limitado, permiten extraer las envolventes de respuesta máxima con menor coste computacional y sin pérdidas notables de precisión.

La potencialidad del metamodelo propuesto, denominado HTSA-red, se ha demostrado mediante dos casos de estudio, correspondientes a un caso simplificado de viga simplemente apoyada, y un puente real ligeramente amortiguado, el viaducto de Santa Ana. Los resultados presentados han demostrado que, efectivamente, la solución no pierde precisión al aumentarse el instante de tiempo inicial en el análisis dinámico. Asimismo, el segundo caso de estudio ha mostrado una reducción del coste computacional de la extracción de las envolventes de respuesta del 44.44%, con un error despreciable en términos de desplazamiento máximo, y un error máximo de 0.0656 m/s^2 en el valor de aceleración pico. Futuros desarrollos incluyen metodologías más sofisticadas para la determinación del intervalo de tiempo de análisis, tales como algoritmos genéticos o basados en gradiente. Asimismo, es

posible combinar el metamodelo basado en la transformada de Hilbert presentado en la referencia [14] con el metamodelo TSS presentado en [13]. Este último permite determinar la pendiente de las curvas envolventes de respuesta, permitiendo reducir el paso de velocidades de tren y aplicar curvas splines de interpolación. La combinación de ambos modelos permitiría aumentar tanto el muestreo del tiempo en las series temporales, como el paso de velocidades en la extracción de envolventes. Ello combinado con el intervalo de tiempo reducido propuesto en este trabajo, podría dar lugar a una solución ultra rápida para la extracción de curvas de respuesta envolventes en puentes de ferrocarril.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento al Dr. Pedro Museros (Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras, Universidad Politécnica de Valencia) por sus contribuciones en el desarrollo original, ideas y código utilizado para resolver el problema directo mediante la solución semi-analítica, así como al Sr. Alejandro Castillo-Linares (CEO de ACL-Estructuras) por proporcionar datos reales de los viaductos de Rodenillo y Santa Ana. Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación de España a través del proyecto de investigación “SMART-BRIDGES-Monitorización inteligente del estado estructural de puentes ferroviarios de alta velocidad” (Ref. PLEC2021-007798).

Referencias

- [1] Comisión Europea. (2011). Hoja de ruta hacia un espacio único europeo de transporte: por una política de transporte competitiva y sostenible. COM (2011) 144, Bruselas
- [2] G. Gu, Resonance in long-span railway bridges carrying TGV trains, *Computers & Structures* 152 (2015) 185–199.

- [3] European Committee for Standardization (CEN), Eurocode 1: Actions on structures - part 2: Traffic loads on bridges, EN 1991-2 Eurocode 1 (2003).
- [4] U. I. C. Code, 776-2. design requirements for rail-bridges based on interaction phenomena between train, track and bridge, International Union of Railways (2009).
- [5] S. Schneider, S. Marx, Design of railway bridges for dynamic loads due to high-speed traffic, *Engineering Structures* 174 (2018) 396–406.
- [6] Senthil, K., Tewari, D., Sharma, A., & Singh, N. (2022). Influence of Parameters on the Prediction of Dynamic Impact Factor for Railway Bridges: A Review. *Recent Advances in Materials, Mechanics and Structures: Select Proceedings of ICMMS 2022*, 165-175.
- [7] H. Ouyang, Moving-load dynamic problems: A tutorial (with a brief overview), *Mechanical Systems and Signal Processing* 25 (2011) 2039 – 2060.
- [8] Li, G., Wang, X., Wu, S., Ma, L., & Ding, W. (2025). Dynamic response analysis of vehicle-track coupled system at subgrade-bridge transition zone in seasonal frozen region under multi-source excitation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 190, 109216.
- [9] Moliner, E., Museros, P., & Allahvirdizadeh, R. (2024). Track–bridge interaction effects in the acceleration and displacement response of high-speed railway bridges: Simplified vs refined modelling. *Engineering structures*, 314, 118304.
- [10] Majka, M., & Hartnett, M. (2009). Dynamic response of bridges to moving trains: A study on effects of random track irregularities and bridge skewness. *Computers & Structures*, 87(19-20), 1233-1252.
- [11] L. Fryba, Vibration of solids and structures under moving loads. Thomas Telford, 1999.
- [12] Martínez-Castro, A. E., Museros, P., & Castillo-Linares, A. (2006). Semi-analytic solution in the time domain for non-uniform multi-span Bernoulli–Euler beams traversed by moving loads. *Journal of Sound and Vibration*, 294(1-2), 278-297.
- [13] Martínez-Castro, A. E., & García-Macías, E. (2019). Train-speed sensitivity approach for maximum response envelopes in dynamics of railway bridges. *Journal of Sound and Vibration*, 452, 13-33.
- [14] García-Macías, E., & Martínez-Castro, A. E. (2020). Hilbert transform-based semi-analytic meta-model for maximum response envelopes in dynamics of railway bridges. *Journal of Sound and Vibration*, 487, 115618.
- [15] Nuttall, A. H., & Bedrosian, E. (1966). On the quadrature approximation to the Hilbert transform of modulated signals. *Proceedings of the IEEE*, 54(10), 1458-1459.
- [16] Instrucción de acciones a considerar en puentes de ferrocarril (IAPF), Ministerio de Fomento (Spain), 2007