

Interacción dinámica vía-estructura en puentes ferroviarios con distintos tipos de vía

Dynamic structure-track interaction in railway bridges with different track types

Elena Pilar MARTÍNEZ GONZÁLEZ^a, Pablo MARISCAL SANTANA^b,
Gonzalo SANZ-DIEZ DE ULZURRUN^c, Carlos ZANUY SÁNCHEZ^d

^a Ingeniero de Caminos, C y P. INECO. Técnico de mantenimiento de Puentes. epilar.martinez@ineco.com

^b Ingeniero de Caminos, C y P. DRAGADOS. Ingeniero de producción. pmariscals@dragados.com

^c Dr. Ingeniero de Caminos, C y P, Universidad Politécnica de Madrid, Profesor Permanente Laboral. g.ulzurrun@upm.es

^d Dr. Ingeniero de Caminos, C y P, Universidad Politécnica de Madrid, Catedrático. carlos.zanuy@upm.es

RESUMEN

El diseño de puentes ferroviarios de alta velocidad está fuertemente determinado por su respuesta dinámica ante el paso de los trenes, dado que pueden aparecer fenómenos de amplificación dinámica excesiva o incluso resonancia. La utilización de nuevos sistemas de vía en placa alternativos a la vía en balasto afecta al puente a través de la interacción vía-estructura, así como por la distinta masa y rigidez del conjunto. En la presente comunicación se presentan los principales resultados de un amplio estudio llevado a cabo en los últimos años por los autores, considerando viaductos con vía en balasto, vía en placa prefabricada y vía en placa in situ, que pueden ayudar a tomar decisiones sobre el diseño de la vía.

ABSTRACT

Design of high-speed railway bridges is strongly governed by the dynamic response produced by moving rail traffic loads. Excessive dynamic amplifications or even resonance may lead to serviceability or ultimate issues. The introduction of new ballastless track systems alternative to traditional ballasted track affects the structural response through the track-bridge interaction and the distinct mass and stiffness of the system. In the present contribution, the main results obtained by the authors in a comprehensive study of the influence of the track type on the dynamic behavior of railway bridges is presented in order to help practice designers, considering two ballastless track types (precast and on-site) and ballasted track.

PALABRAS CLAVE: puentes de ferrocarril, alta velocidad, comportamiento dinámico, interacción vía-estructura

KEYWORDS: railway bridges, high speed, dynamic response, bridge-track interaction

1. Introducción

En las últimas décadas se ha producido un espectacular incremento de las redes de alta velocidad ferroviaria en España y en el extranjero [1]. Las grandes ventajas en sostenibilidad, comodidad y velocidad ligadas al

transporte por ferrocarril hacen pensar que este desarrollo continuará y aumentará durante los próximos años. En España, la red de alta velocidad tiene actualmente una longitud de más de 4.000 kilómetros y es un ejemplo de la alta

calidad de la tecnología española en el sector ferroviario. La implantación de redes de alta velocidad en regiones con mayores dificultades de trazado, como los recientemente inaugurados accesos a Galicia y Asturias, supone un reto ingenieril que requiere la introducción de un gran número de estructuras, hasta tal punto que en muchos tramos el trazado es una sucesión casi continua de túneles y viaductos. Por otra parte, la innovación en la ingeniería de la vía ferroviaria ha llevado a la introducción de nuevos sistemas de vía en placa, alternativos al tradicional de vía en balasto, no sólo en lugares acotados como zonas urbanas o estaciones. Tales sistemas tienen grandes ventajas en términos de durabilidad, facilidad de construcción, estabilidad y geometría de la vía. En los viaductos de los accesos de alta velocidad a Galicia y Asturias se ha instalado el sistema de vía en placa prefabricada VP de AFTRAV (Figura 1), consistente en placas prefabricadas de hormigón pretensado, de 5,1 m de longitud, que descansan sobre una sucesión de capas de mortero y elastomérica [2], mientras que en los túneles se ha generalizado el uso de vía en placa continua consistente en traviesas bi-bloque embebidas en una losa de hormigón ejecutada in situ (sistema BX de AFTRAV, [3]).

Uno de los aspectos clave para el diseño de puentes ferroviarios de alta velocidad es su respuesta dinámica ante el paso de las cargas móviles de los trenes. La frecuencia de excitación ejercida por los trenes sobre la estructura viene determinada por la combinación entre las distancias entre ejes de los bogies del vehículo y la velocidad de circulación. Cuando esa frecuencia de excitación se aproxima a la frecuencia propia de la estructura del viaducto, se puede producir una amplificación dinámica excesiva de la respuesta estructural o incluso resonancia. Los actuales códigos de diseño [4,5] exigen la realización de cálculos dinámicos específicos de los puentes de alta velocidad para garantizar que no se produzcan amplificaciones

dinámicas que pongan en peligro la estructura o la comodidad de los viajeros.



Figura 1. Viaducto de Teixeira: vista general de la estructura (arriba) y de la vía en placa (abajo). Fotografías del autor C. Zanuy (agosto 2024).

Debido a que el tipo de vía afecta tanto a la masa como a la rigidez del conjunto viaducto-vía, y a la forma en que se transfieren las cargas del vehículo a la estructura, es lógico que la respuesta dinámica de los viaductos se pueda ver influenciada por el tipo de vía. Es por ello que el Grupo de Ingeniería Estructural de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) lleve varios años estudiando el efecto del tipo de vía en el comportamiento dinámico de los viaductos ferroviarios ante la acción dinámica de los trenes [6,7]. En esta contribución se muestran los resultados más relevantes de la investigación relativa a la influencia del tipo de vía en puentes cortos ferroviarios, que son los más sensibles a los efectos dinámicos [8]. Se han analizado

puentes de distinta tipología estructural, de vía simple y doble, considerando la interacción vía-estructura, con tres tipos de vía: vía en balasto tradicional, vía en placa continua monolítica con la estructura del tablero, y vía en placa con placas prefabricadas cortas independizadas del tablero por medio de una capa elastomérica intermedia, denominada vía en placa independiente.

2. Metodología

2.1. Modelización numérica

La dinámica de puentes ferroviarios con distintos tipos de vía se ha analizado con modelos numéricos desarrollados con el software de cálculo ANSYS. En los siguientes párrafos se describen los modelos. No obstante, estos se describen más detalladamente en [6] para puentes de vía única y en [7] para puentes de doble vía.

En la Figura 2 se representan esquemas mecánicos de los alzados de los modelos para los tres tipos de vía considerados y un esquema 3D de un tramo de un puente con vía única y otro con doble vía. Los modelos simulan mecánicamente todos los elementos de un puente de ferrocarril (tablero, vía y cargas muertas). Las cargas de tráfico se han simulado como un conjunto de cargas móviles, una por eje del vehículo, circulando por una de las vías a una velocidad dada. El modelo incluye dos tramos de 50 m de vía sobre terreno a continuación de cada estribo, evitando así efectos numéricos locales irreales en la entrada o salida de las cargas.

Los elementos con rigidez longitudinal del sistema (carriles, vía en placa, sección del viaducto) se han representado con elementos tipo viga (BEAM3 en 2D y BEAM4 en 3D). Estos elementos se han mallado con una separación entre nodos igual a la separación longitudinal entre asientos de carril (0,60 y 0,65 m para vía sobre balasto y en placa, respectivamente). En el caso de la vía en placa se han definido las placas con juntas constructivas

en los estribos, y cada 5.2 m en la vía con placa independiente.

Adicionalmente, el modelo incluye elementos transversales al eje de la vía para simular la interacción de los distintos elementos de las vías entre sí y con el tablero del puente, Figura 2; **Error! No se encuentra el origen de la referencia..** En sentido vertical se dispone debajo de cada asiento de carril elementos que determinan los fenómenos de interacción vía-estructura (fijaciones de carril, balasto, capa elástica o contacto mortero-puente) o vía-plataforma en los tramos de terraplén de aproximación, Figura 2 (a). Estos se han representado mediante resortes con o sin masa (LINK11 y COMBIN14). En el caso de los modelos con vía sobre balasto se han incluido las traviesas como masas discretas (MASS21).

En los puentes con vía doble se han dispuesto elementos de conexión horizontales, transversales al puente, que introducen el efecto de la excentricidad de las vías Figura 2(c). Mecánicamente estos elementos se han definido como vigas 3D (BEAM4) infinitamente rígidas. En el caso de los puentes de vía única se ha prescindido de estos elementos de conexión, al estar la vía centrada sobre el eje del puente. Por último, se ha considerado que el tablero tiene apoyos de rigidez finita en los estribos (ver 2.2), con un amortiguamiento de 15 kNs/m por apoyo (definidos con dos resortes COMBIN14 en la vía única y cuatro en la doble).

Las propiedades mecánicas de la sección del puente se han definido con valores representativos para cada luz estudiada. Las propiedades de los puentes de vía única se han tomado como $A = 0.069 \cdot L + 3.03 \text{ m}^2$ y $I_x = 0.00065 \cdot L^{2.42} \text{ m}^4$. En los casos con vía doble estas han sido $A = 0.0285 \cdot L + 7.955 \text{ m}^2$, $I_x = 0.0036 \cdot L^{2.15} \text{ m}^4$, $I_y = 103.8 \text{ m}^4$ y $J_t = 0.0079 \cdot L^2 \text{ m}^4$. Estos valores se basan en ajustes de regresión a partir de puentes reales [6,7]. Para el material empleado para el tablero, hormigón ($E=30 \text{ GPa}$ y $\rho=2.5 \text{ ton/m}^3$), se ha modificado su densidad para considerar la masa

de los elementos no estructurales como canaletas, barreras y pretiles, además de los muros guardabalasto en el caso de la vía sobre balasto. En total se han considerado unas cargas muertas de 2,1 y 2,6 t/m para vía en placa y sobre balasto, respectivamente. Las propiedades mecánicas de los elementos de interacción vía-estructura definidos en el modelo se resumen en la

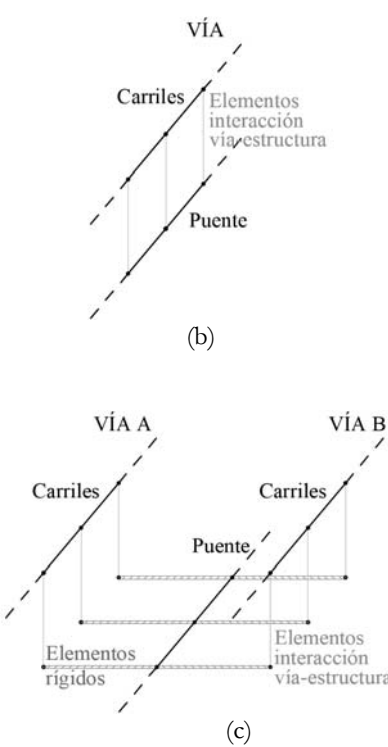
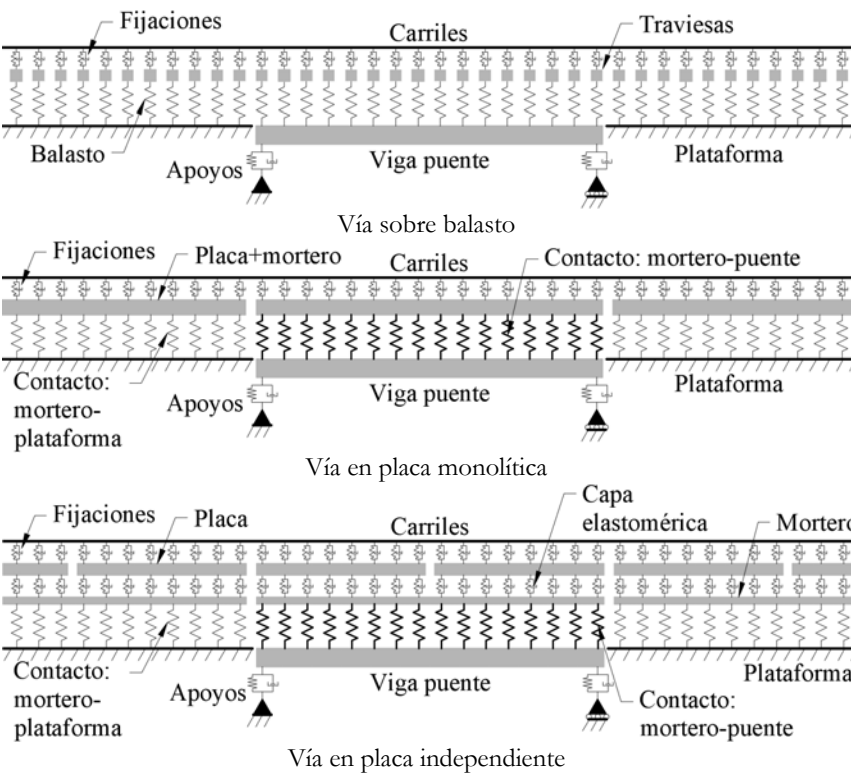
Tabla 1. Los elementos estructurales de la vía se han definido de acuerdo con su geometría. La masa considerada para cada traviesa ha sido 0.36 ton. Las placas monolíticas se han definido con una sección de 0.35×3.2 m, incluyendo el mortero de base. Por su parte, la vía en placa independiente se ha definido con una sección de 0.20×2.5 m para las placas y 0.15×3.0 m para el mortero de base.

El análisis transitorio del problema dinámico se ha resuelto mediante integración completa en el tiempo. El tiempo en el que se ha analizado la respuesta dinámica del puente es un 50% superior al tiempo de paso del tren en el tramo modelizado (puente y terrenos adyacentes). De esta forma se ha podido obtener la respuesta dinámica forzada del puente y la

libre una vez el tren sale de él. Para la solución numérica se ha utilizado el método de integración implícito de Newmark con los parámetros por defecto de ANSYS y un paso de tiempo variable, comprendido entre 0.0003 y 0.01 s y con un valor inicial de 0.001 s.

Tabla 1. Propiedades mecánicas de los elementos del modelo para la interacción vía-estructura.

Tipo de vía	Elemento	Propiedades
Todos	Carriles	2·UIC-60
Balasto	Fijaciones	$K = 300 \text{ kN/mm}$ $C = 30 \text{ kNs/m}$
Balasto	Balasto	$K = 114.4 \text{ kN/mm}$ $C = 12 \text{ kNs/m}$ $m = 2.8 \text{ ton}$
Placa	Fijaciones	$K = 100 \text{ kN/mm}$ $C = 15 \text{ kNs/m}$
Placa	Mortero-Pte.	$K \approx \infty$
Placa Mono.	Mort.-Platafor.	$K = 62.9 \text{ kN/mm}$
Placa Indp.	Mort.-Platafor.	$K = 110.1 \text{ kN/mm}$
Placa Indp.	Capa elást.	$K = 24.4 \text{ kN/mm}$ $C = 11 \text{ kNs/m}$



(a)

Figura 2. Esquema de la modelización numérica: (a) alzado modelos; (b) esquema 3D transversal del modelo con vía única; (c) esquema transversal del modelo con vía doble.

2.2. Casos estudiados

Se han estudiado puentes isostáticos de luces de 15, 20, 25 y 30 m con vía única y doble. El presente estudio se ha centrado en la influencia del tipo de vía en la respuesta dinámica, considerando la vía sobre balasto, la vía en placa monolítica e independiente. Se ha evaluado la respuesta tanto en flexión como en torsión, relevante en los puentes con doble vía. Con luces cortas, los modos de vibración asociados a la torsión del puente suelen presentar frecuencias altas. No obstante, la rigidez de los apoyos puede ser relevante en el comportamiento dinámico de estos puentes. Los puentes de alta velocidad suelen emplear apoyos tipo *pot*, cuya rigidez vertical dinámica es incierta. Para considerar esta incertidumbre se han considerado dos valores extremos de rigidez vertical en los apoyos del puente en los estribos, $k_1 = 480$ o $k_2 = 2400$ kN/mm por apoyo.

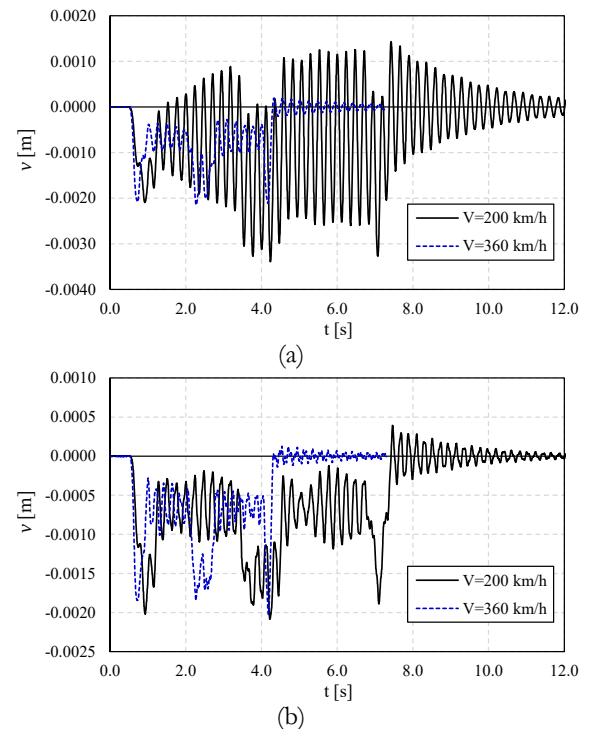
Para cada tipo de puente se ha analizado su respuesta frente a las cargas de tráfico, empleando 12 trenes de referencia. Los trenes considerados son los normativos HSLM-A y dos trenes comerciales comunes en la Alta Velocidad Española (AVE-S101 y Talgo-S102). Las cargas por eje de estos trenes se han definido según la IAPF [4], contemplando 17 velocidades de circulación, cada 10 km/h entre 200 y 360 km/h.

En los siguientes apartados se toman como referencia los puentes de doble vía con 25 m de luz y apoyos de rigidez k_2 , sumando 612 casos (3 tipos de vía, 12 trenes y 17 velocidades). Los resultados de estos puentes se contrastarán con los correspondientes a otros tipos de puente en el apartado 3, analizando la influencia de las variables más relevantes en el comportamiento dinámico (luz del puente, rigidez de los apoyos, tipo y número de vías). En total el presente artículo analiza los resultados de 3672 modelos,

con un tiempo computacional medio de 6 min. por caso.

2.3. Extracción de resultados temporales

Para cada caso analizado se ha extraído la solución temporal de los siguientes parámetros relevantes para el servicio de la estructura: flecha en el centro de vano bajo la vía cargada, aceleración en el centro del vano bajo la vía cargada, giro a flexión del tablero en los extremos, y giro a torsión en el centro de vano. A modo de ejemplo, en la Figura 3 se muestra la historia temporal de la flecha en el centro para un viaducto de 25 m de luz y doble vía producido por el tren Talgo, para los tres tipos de vía consideradas, considerando dos velocidades (200 y 360 km/h).



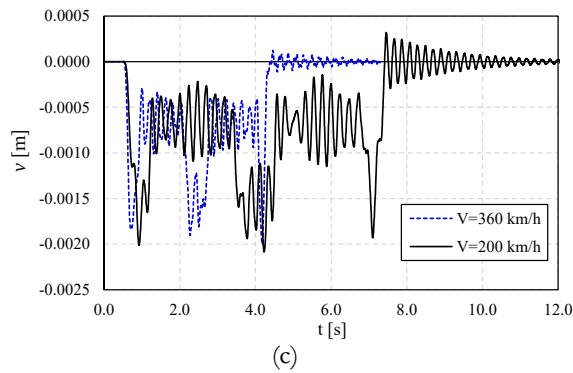


Figura 3. Flecha en centro de vano, $L = 25$ m, doble vía, tren Talgo: (a) Vía en balasto; (b) Vía en placa monolítica; (c) Vía en placa independiente.

La Figura 3 confirma que el tipo de vía tiene una influencia apreciable en el comportamiento del tablero, ya que afecta a la masa total del sistema, a la rigidez del conjunto, y a la forma en que se distribuyen las cargas del tren. Además, las dos velocidades representadas en la Figura 3 muestran la distinta amplificación dinámica que se produce en función de si la velocidad acoplada con la geometría de ejes del tren, causa una frecuencia de excitación más o menos próxima a las frecuencias propias de la estructura (hay una clara amplificación en la Figura 3a, con vía en balasto, a 200 km/h, que no se obtiene con los sistemas de vía en placa). De cara a valorar todos los efectos analizados, se han tomado los picos (valores máximos) de todos los resultados temporales relativos a los parámetros de servicio indicados en el párrafo anterior y se han obtenido las envolventes causadas por los trenes HSLM y comerciales. En base a dichas envolventes, en los siguientes párrafos se analiza la influencia de las distintas variables estudiadas.

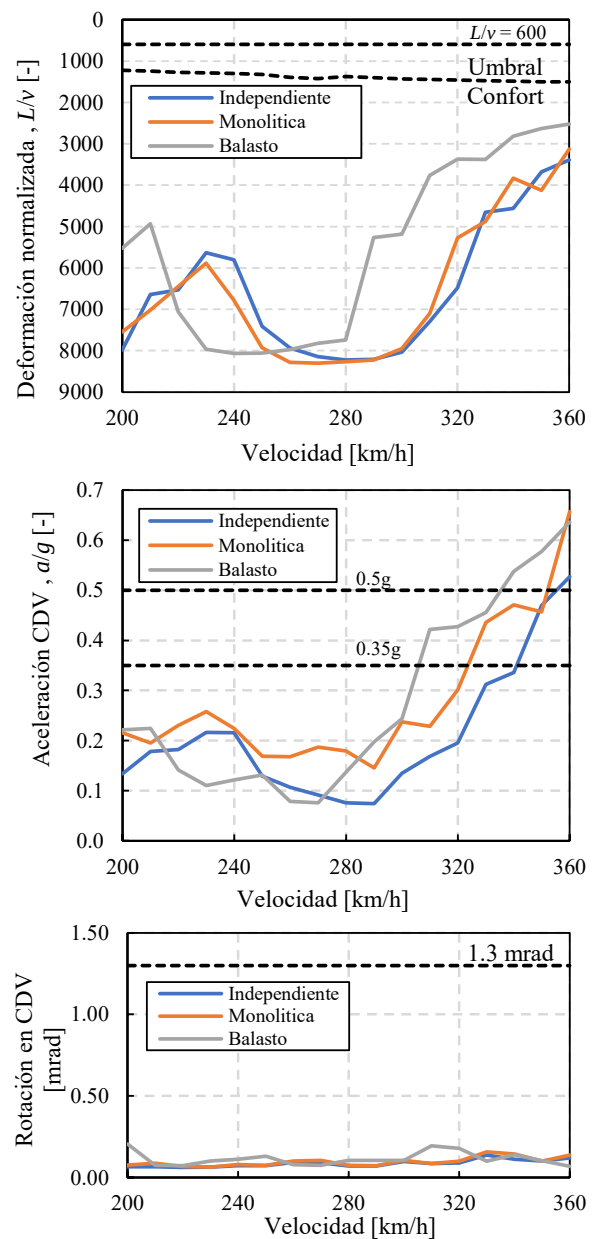
3. Análisis de resultados

3.1. Resultados en puentes de doble vía

Las envolventes de los parámetros determinantes del servicio del puente de 25 m de luz y vía doble se representan en la Figura 4. En cada gráfico se han representado las envolventes obtenidas para los tres tipos de vía estudiados,

así como los límites que establece la normativa (IAPF [4]) para el Estado Límite de Servicio.

Con respecto a las flechas máximas, la Figura 4 indica que en ningún caso se alcanza el límite de confort de los usuarios, aunque los valores máximos se obtienen para la vía en balasto para velocidades superiores a 300 km/h. Los valores envolventes de giros, tanto de flexión como de torsión, también se encuentran alejados de los límites establecidos por la normativa.



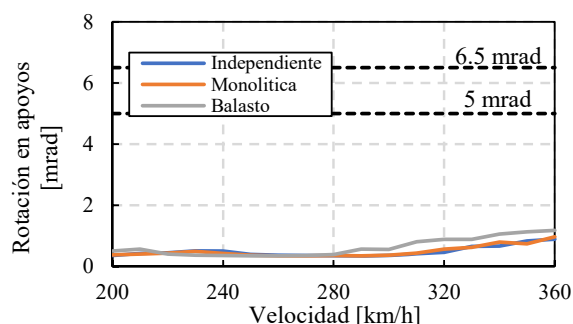


Figura 4. Envolventes de flechas, aceleraciones y giros, $L = 25$ m, doble vía.

Sin embargo, los mayores riesgos aparecen en las aceleraciones verticales máximas, que de acuerdo con la normativa deben ser inferiores a $0.35g$ (vía en balasto) y $0.5g$ (vía en placa). Estos límites suelen estar asociados al riesgo de desconsolidación del balasto y a la pérdida de contacto entre el vehículo y el carril en vía en placa, aunque existe un debate abierto acerca de la posibilidad de incrementar esos límites [9]. Asumiendo como válidos esos límites, se muestra que se pueden superar para velocidades superiores a 305 km/h (vía en balasto), 350 km/h (vía en placa monolítica e independiente). Por tanto, los resultados indican que el comportamiento dinámico de la estructura se puede mejorar con el uso de sistemas de vía en placa.

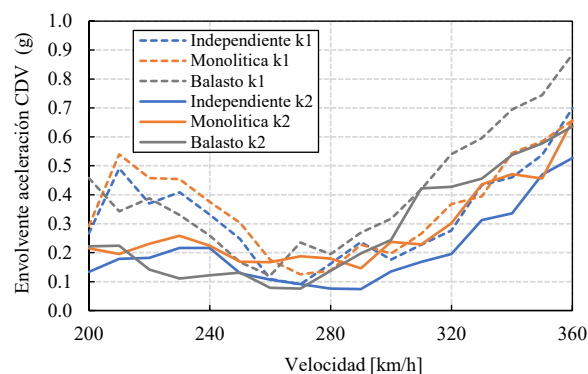
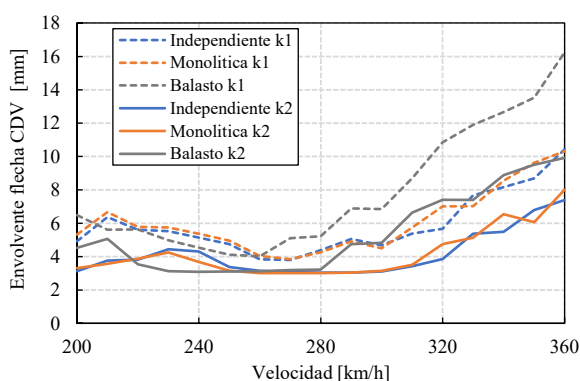


Figura 5. Influencia de la rigidez de los apoyos en flecha y aceleraciones, $L = 25$ m, doble vía.

En la Figura 5 se analiza la influencia de la rigidez de los apoyos, comparando las envolventes de la flecha y la aceleración máxima. Se observa que, por lo general, la respuesta dinámica del puente aumenta al disminuir la rigidez de los apoyos, especialmente con velocidades bajas (≤ 240 km/h) o altas (≥ 290 km/h). En términos de flecha este aumento es más relevante con velocidades altas, especialmente en la vía sobre balasto. Por su parte, las aceleraciones aumentan en todos los casos con velocidades bajas y con vía sobre balasto con velocidades altas. Se ha observado que la mayor respuesta dinámica al reducirse la rigidez en los apoyos está en parte relacionada con la activación de un modo de torsión, en el que el tablero gira alrededor de su propio eje como un sólido rígido coaccionado parcialmente por los apoyos. En estudios anteriores [7] se ha observado que la influencia del modo de torsión aumenta su relevancia en los puentes más cortos (15 y 20 m), que con apoyos flexibles (k_1) pueden mostrar una respuesta dinámica elevada con velocidades moderadas. La relevancia de la rigidez de los apoyos en el comportamiento dinámico invita a proponer estudios que caractericen la rigidez vertical dinámica de los apoyos empleados habitualmente en este tipo de puentes.

Por su parte, la influencia de la luz del puente en la respuesta dinámica se analiza en la Figura 6. Esta muestra que la flecha normalizada (L/v) en el centro de vano es siempre mayor en el caso de la vía sobre balasto,

siendo similares en ambos tipos de vía en placa. En puentes con vía sobre balasto L/v aumenta con la luz en los vanos más cortos, si $L \leq 20$ m, siendo prácticamente independiente de la luz con luces mayores. En el caso de la vía en placa se observa que la relación flecha/luz es mínima si $L = 20$ m, creciendo con la longitud de la estructura en el resto de casos. En términos de aceleración los valores pico se observan para una luz de 20 m con vía sobre balasto y 25 m para vía en placa. En el caso de la vía sobre balasto se supera el límite normativo (0.35g) para todas las luces, en el rango de velocidades estudiadas. La vía en placa monolítica supera esta limitación (0.5g) para luces de 15 y 25 m. La vía en placa independiente es la que muestra menores valores de aceleración, superando ligeramente la limitación normativa solamente para puentes de 25 m de luz. De forma análoga a lo observado en la Figura 3 las velocidades críticas suelen ser elevadas. En el caso de la vía sobre balasto las aceleraciones superan el umbral de 0.35g con velocidades mayores a 300-320 km/h. Sin embargo, con vía en placa las velocidades críticas ($a > 0.5g$) se comprenden entre 340 y 360 km/h.

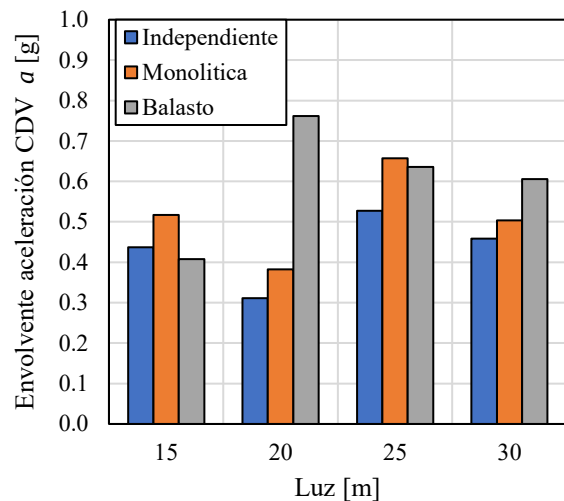
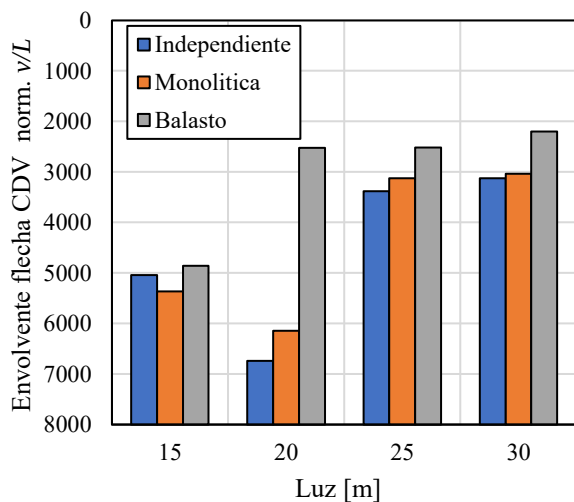
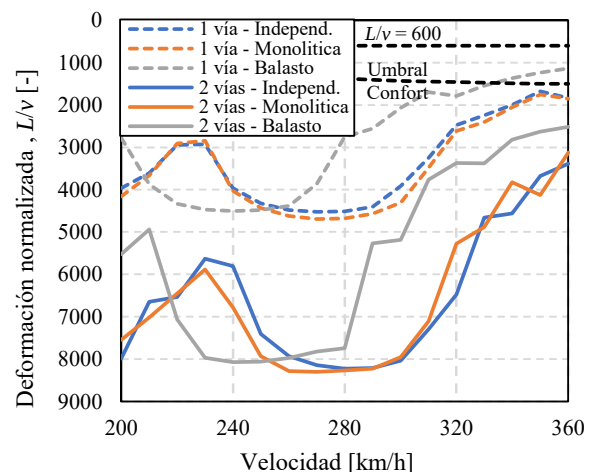


Figura 6. Influencia de la luz en flecha normalizada y aceleraciones, doble vía.

3.2. Comparación entre tableros de vía única y vía doble

Debido a la compleja orografía de la península ibérica, importantes longitudes de trazado de alta velocidad deben transcurrir por sucesiones de túneles y viaductos. Tal ha sido el caso de los recientes accesos de alta velocidad a Galicia y Asturias. En tales situaciones, los viaductos suelen ser dobles, es decir, formados por dos puentes de vía única, uno paralelo al otro, motivados por la existencia de túneles independientes antes y después del viaducto por motivos de seguridad. Por tanto, resulta de interés práctico analizar el comportamiento de tableros de viaductos de vía única y comparar la respuesta con los de vía doble. El trabajo de Martínez et al. [10] ha abordado los viaductos de vía única.



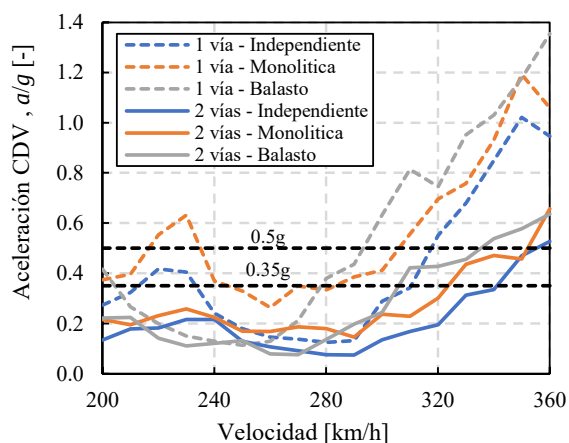


Figura 7. Comparación de flechas y aceleraciones de viaductos de 25 m de luz con vía única y vía doble.

En la Figura 7 se comparan las envolventes dinámicas de dos viaductos de 25 m de luz, con vía única y doble, para los tres tipos de vía analizados. Por lo general, se observa que los casos con vía doble tienen una respuesta dinámica menor que en los viaductos con vía única, lo que resulta lógico por la diferencia de inercia entre ambos tipos de puentes. Esta diferencia es especialmente relevante con velocidades moderadas (200–240 km/h) y velocidades altas (290–360 km/h). Comparando los resultados entre tipos de vía se observa que con velocidades moderadas los viaductos con vía en placa tienen una mayor respuesta dinámica, en el caso del viaducto con vía única en placa monolítica incluso se sobrepasa el límite de aceleración (0.5g) con velocidades entre 220 y 235 km/h. Sin embargo, con velocidades altas la vía sobre balasto muestra una respuesta dinámica mayor, sobrepasando el límite de aceleración (0.35g) con velocidades mayores que 280 km/h para viaductos con vía única y 320 km/h con doble vía.

4. Conclusiones

Esta contribución analiza la respuesta de puentes cortos isostáticos de ferrocarril de alta velocidad al ser sometidos a la acción dinámica de la circulación de trenes. El estudio se ha realizado con modelos numéricos paramétricos,

analizando los factores más relevantes en la respuesta dinámica (tipo de vía, luz, número de vías y rigidez de los apoyos). Las conclusiones más significativas han sido las siguientes:

1. El tipo de vía puede desempeñar un papel no despreciable en la respuesta dinámica de estos puentes. Con velocidades moderadas (200–260 km/h) los puentes con vía en placa pueden tener una respuesta mayor que la vía sobre balasto, pero sin ser crítica. Con velocidades mayores los puentes con vía en placa mostraron una respuesta dinámica menor que los puentes con vía sobre balasto. La introducción de vía en placa puede reducir el rango de velocidades críticas, por lo que puede ser una solución a problemas dinámicos en puentes cortos de ferrocarril.
2. La influencia del grado de interacción entre la vía en placa y el puente es limitada. El sistema monolítico da lugar a flechas del puente similares, pero aceleraciones moderadamente mayores para todas las luces estudiadas (de 15 a 30 m).
3. La rigidez vertical de los apoyos del puente tiene una influencia relevante en la respuesta dinámica de los puentes con vía doble. Los puentes con apoyos con una rigidez vertical baja presentan una mayor respuesta dinámica, especialmente en puentes cortos por la activación de un modo de torsión. No obstante, se considera interesante analizar en el futuro investigaciones los valores de la rigidez vertical dinámica de los apoyos empleados habitualmente en puentes cortos de alta velocidad.
4. Entre los casos analizados, los puentes con vía sobre balasto y 20 m de luz son los que muestran una mayor respuesta dinámica, superando para todas las luces el límite normativo de aceleración. En el caso de los puentes con vía en placa la

respuesta ha sido mayor con una luz de 25 m. En este tipo de vía se superó en algunos casos el límite de aceleración, en mayor medida con vía en placa monolítica.

5. El número de vías es relevante en la respuesta dinámica. Por lo general, los puentes con vía doble tienen una respuesta dinámica menor que los viaductos con vía única.

Por último, los autores destacan que los resultados presentados en esta contribución están basados en las propiedades seccionales promedias de distintas tipologías de tablero. Por esto es recomendable en futuros trabajos profundizar en la influencia de utilizar distintas tipologías de tablero.

Agradecimientos

Se agradecen las interesantes aportaciones de AFTRAV (Asociación Nacional de Fabricantes de Traviesas). El presente trabajo se basa en los modelos elaborados en los Trabajos de Fin de Máster de Ref. [6,7].

Referencias

- [1] UIC, High speed lines in the world, International Union of Railways, Paris, 2023.
- [2] L. Albajar, La vía sin balasto a partir de placas prefabricadas de AFTRAV, ANDECE, Madrid, 2012.
- [3] ADIF, NAV 7-1-0.7 Diseño y montaje de vía sin balasto para obra nueva, Cap. 7.3, Montaje de vía, ADIF, Madrid, 2021.
- [4] Dir. Gral. de FFCC, Instrucción se Acciones a Considerar en Puentes de Ferrocarril IAPF-07, Ministerio de Fomento, Madrid, 2007.
- [5] CEN, EN 1991-2:2019 Eurocódigo 1: Acciones en estructuras. Parte 2: Cargas de tráfico en puentes, Comisión Europea de Estandarización, Bruselas, 2019.
- [6] E.P. Martínez González, Effects of moving loads on railway bridges considering the structure of railway track, Trabajo de Fin de Máster, Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos (UPM), Madrid, 2022.
- [7] P. Mariscal Santana, Estudio de la influencia del tipo de vía en los puentes de alta velocidad de vía doble considerando efectos de torsión, Trabajo de Fin de Máster, Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. (UPM), Madrid, 2024.
- [8] P. Museros, M.L. Romero, A. Poy, E. Alarcón Advances in the analysis of short span railway bridges for high-speed lines, Computers and Structures 80 (2002) 2121-2132.
- [9] T. Arvidsson, A. Andersson, R. Karoumi, Train running safety on non-ballasted bridges. International Journal of Rail Transportation 7 (2019) 1-22.
- [10] E.P. Martínez, G. S.D. Ulzurrun, C. Zanuy, Influence of Track Typology on the Dynamic Response of Short-Span High-Speed Railway Bridge, Hormigón y Acero. 74(301) (2023) 7-20.