

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA SUBESTRUCTURA DE VIADUCTOS DE FERROCARRIL DE ALTA VELOCIDAD CONSIDERANDO INTERACCIÓN VÍA -ESTRUCTURA

Tesina de Especialidad
Autor: Juan Murcia Delso
Tutor: Juan A. Sobrino Almunia

Introducción

La voluntad de la Unión Europea de crear una red transeuropea de transporte ferroviario para el transporte de mercancías y pasajeros junto con las exigencias de interoperabilidad del sistema ferroviario de alta velocidad está constituyendo un revulsivo para el sector ferroviario en los distintos países de la UE, en el que las líneas de alta velocidad (LAV) están adquiriendo un papel importante.

Los puentes junto con los túneles son uno de los elementos clave y vulnerables de las LAV por su enorme valor estratégico y económico. Dado que los condicionantes de trazado son mucho más estrictos que los de carretera, las líneas de ferrocarril de alta velocidad no pueden adaptarse al terreno natural y ello supone tener que proyectar una cantidad importante de puentes y túneles. En las recientes LAV españolas los puentes representan aproximadamente un 7 % de la longitud total. Tan sólo en la LAV Madrid-Barcelona-Frontera Francesa, el coste de construcción de los puentes se aproxima a 1000 millones de euros (figuras 1 y 2).

Los puentes de ferrocarril presentan ciertas especificidades respecto a los puentes de carretera que condicionan su diseño. Tanto por las acciones y movimientos a los que están sometidos, como por los condicionantes de confort y seguridad que requieren, o los fenómenos característicos como la interacción vía-estructura o los efectos dinámicos. El anteriormente citado valor estratégico y económico que tienen estas estructuras exige que estos fenómenos específicos deban ser estudiados en profundidad.



Fig 1 Viaducto de la LAV Madrid-Barcelona en Sant Sadurn d'Anoia (viaducto continuo)



Fig 2 Viaducto de la LAV Madrid-Barcelona en Montblanc (viaducto de vanos isostáticos)

Una de las especificidades que presentan los puentes de ferrocarril reside en el reparto de esfuerzos longitudinales a través del denominado fenómeno de interacción vía-estructura (o vía-tablero). Este fenómeno se basa en la vinculación que se establece entre vía y tablero a través del balasto, cuyo comportamiento se puede asimilar a una ley fuerza - desplazamiento horizontal no lineal. Estudiar sus consecuencias es imprescindible en las líneas de alta velocidad de carril continuo soldado, ya que es, entre otros, uno de los aspectos condicionantes del diseño de la subestructura (pilas, estribos) y de disposición de los aparatos de dilatación de vía (dispositivos que rompen la continuidad del carril para liberarlo de tensiones). El análisis del comportamiento del conjunto vía - estructura - subestructura, cuyo modelo de cálculo se representa en la figura 3, permite conocer la influencia mutua que ejercen la vía y el puente.

El diseño de las pilas está íntimamente ligado a las cargas horizontales que deben ser capaces de absorber, hecho que se acentúa para pilas de gran altura. Para conocer el esfuerzo cortante en sentido longitudinal de las pilas, hay que considerar las siguientes acciones: deformaciones impuestas del tablero (retracción, fluencia del pretensado, efectos térmicos) y acciones exteriores (frenado y arranque de trenes, traducidos como cargas estáticas equivalentes). Estas acciones en viaductos de ferrocarril de alta velocidad se deben considerar actuando sobre el conjunto formado por la vía, la estructura y la subestructura. En el modelo de cálculo de interacción entre vía y estructura se debe incluir también la subestructura porque la influencia de su rigidez (incluida la cimentación) puede ser significativa en el comportamiento global del puente. Las vinculaciones entre vía y estructura y entre estructura y subestructura se establecen a partir de elementos con comportamiento no lineal, que representan respectivamente al balasto y a los aparatos de apoyo tipo POT.

El objetivo de la presente tesina ha sido establecer un método eminentemente práctico, pero no por ello carente de rigor, para abordar el estudio del fenómeno de interacción vía-estructura-subestructura que permita conocer las sollicitaciones de la subestructura en viaductos rectos de hormigón de LAV. Se ha propuesto una metodología general para tal fin partiendo de un estudio bibliográfico sobre el fenómeno de interacción vía-estructura y el comportamiento de los aparatos de apoyo tipo POT. En base a esta metodología se han analizado diversos viaductos reales con diferentes configuraciones estructurales representativas.

Estudio bibliográfico

El estudio bibliográfico realizado ha permitido establecer las premisas del posterior análisis estructural:

➤ La interacción vía-estructura es un fenómeno específico de los puentes de ferrocarril, susceptible de ser considerado en el análisis del reparto de esfuerzos longitudinales y por lo tanto en el cálculo de sollicitaciones de la subestructura. Las bases del fenómeno se establecen en la ficha UIC 774-3 de la Unión Internacional de Ferrocarriles y en el Eurocódigo 1. La interacción se tiene en cuenta en el análisis estructural a partir de un modelo en el que la vía se vincula a la estructura a través de ligaduras no lineales que reproducen el comportamiento del balasto (figura 3). Se trata de una ley fuerza -desplazamiento horizontal bilineal, cuyas características se muestran en la figura 4.

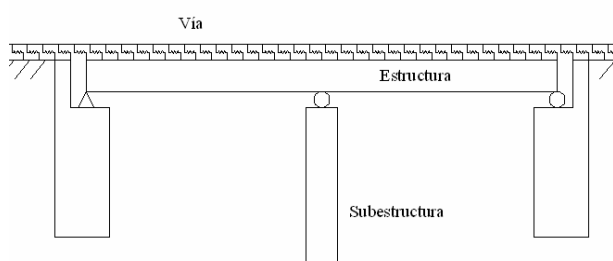


Fig 3 Esquema de cálculo de la interacción vía-estructura

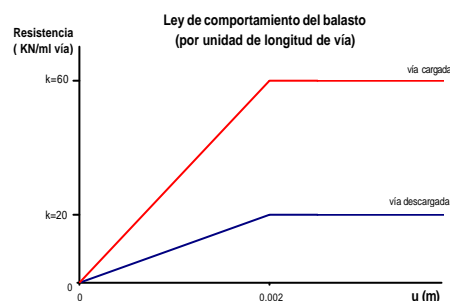


Fig 4 Ley de comportamiento del balasto

➤ Los aparatos de apoyo de neopreno confinado o tipo POT (fijos o deslizantes) son los habitualmente utilizados en puentes de LAV por su alta capacidad de soportar cargas y eventualmente de deformarse. Los aparatos POT-PTFE (POT deslizantes) en particular, tienen una lámina de teflón en contacto con un espejo de acero inoxidable que permite el deslizamiento con un bajo coeficiente de fricción (figura 5). Dicho coeficiente de fricción μ depende de variables como la temperatura, la velocidad de deslizamiento o la carga vertical, y suele variar entre 0,01 y 0,05. Para simplificar el cálculo se puede trabajar con estos dos valores, considerándolos como cotas superior e inferior. De todos modos, la modelización del POT-PTFE requiere un modelo no lineal que reproduzca una ley de fricción de Coulomb (figura 6).

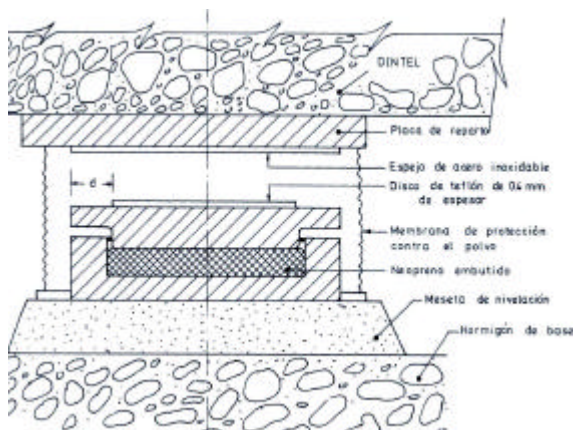


Fig 5 Sección de un POT con teflón

$|F| < mV \rightarrow d = 0$ No hay movimiento
 $|F| = mV \rightarrow d \neq 0$ Hay movimiento
 $|F| > mV$ Imposible

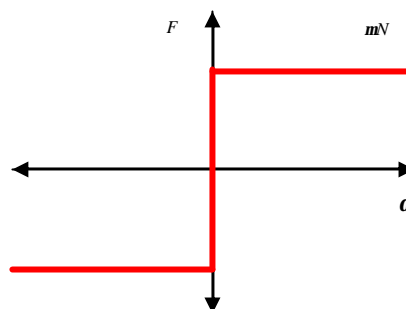


Fig 6 Ley teórica fuerza-desplazamiento del teflón

Metodología propuesta para el análisis estructural de la subestructura de puentes de LAV

Partiendo del trabajo bibliográfico realizado, se ha planteado una metodología para abordar el análisis del reparto de esfuerzos longitudinales en puentes de LAV y el cálculo de sollicitaciones de la subestructura. La descripción de dicha metodología incluye:

➤ Caracterización del modelo en pórtico plano (figura 7), mediante elementos de barra y ligaduras que representan el conjunto estructural formado por vía, estructura y subestructura (incluido el comportamiento del terreno de forma simplificada). Dicho modelo debe tener en cuenta el fenómeno de interacción vía-estructura (comportamiento del balasto) y el comportamiento de los aparatos de apoyo.

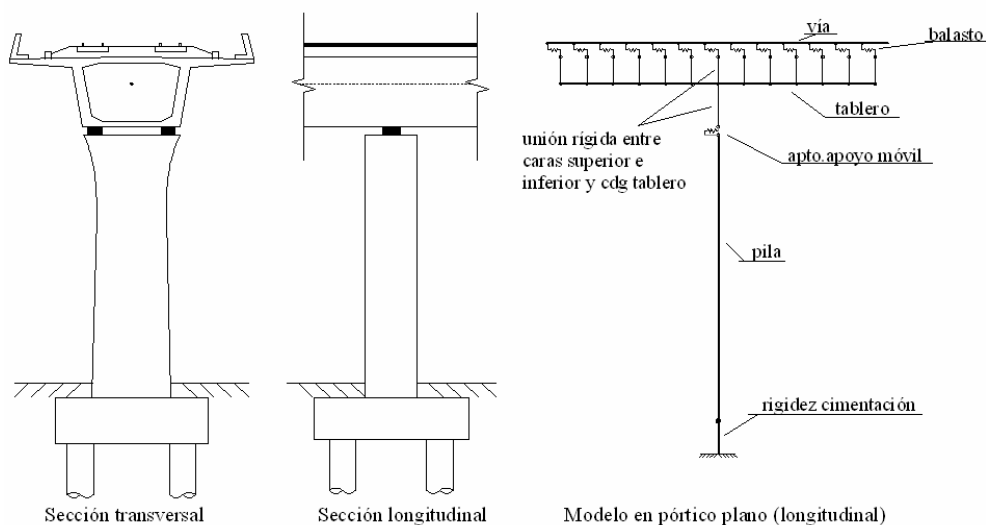


Fig 7 Modelo de cálculo para un puente de vanos continuos

➤ Definición de las acciones que intervienen y de su combinación más desfavorable para una pila o estribo determinado. Se consideran todas aquellas acciones que movilizan los mecanismos de interacción ya sea por provocar deformaciones horizontales o deformaciones debidas a flexión. Ello significa combinar las sobrecargas permanentes, las sobrecargas de uso verticales y horizontales (frenado y arranque de trenes), los efectos térmicos y los fenómenos reológicos del hormigón del tablero (retracción y fluencia). El barrido de los casos estudiados tiene en cuenta la evolución temporal de las acciones y de la configuración estructural del conjunto.

Análisis estructural de 4 viaductos reales con la metodología propuesta

A partir de la metodología planteada se ha efectuado un análisis del reparto de esfuerzos longitudinales y el cálculo de las solicitaciones de una pila característica en cuatro casos reales. Se trata de viaductos de la línea de alta velocidad Madrid-Barcelona-Frontera Francesa, que son ejemplos representativos de las configuraciones habituales: viaductos continuos (de corta, mediana y gran longitud) y viaductos de vanos isostáticos. Para llevar a cabo el cálculo se ha utilizado el programa comercial de análisis estructural SAP2000v8.16 porque permite realizar el análisis no lineal que requiere la metodología propuesta.

Los viaductos estudiados han sido los siguientes:

- Viaducto de Riera Seca: viaducto continuo de corta longitud sin aparato de dilatación de vía (figura 8).



Fig 8 Esquema de la configuración estructural del viaducto de Riera Seca

- Viaducto sobre el río Selles: viaducto continuo de longitud media con aparato de dilatación de vía (figura 9).

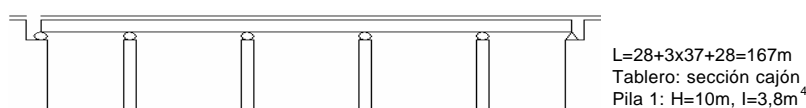


Fig 9 Esquema de la configuración estructural del viaducto sobre el río Selles

- Viaducto de Avernó (Sant Sadurní d'Anoia): viaducto continuo de gran longitud con aparato de dilatación de vía (figura 10).

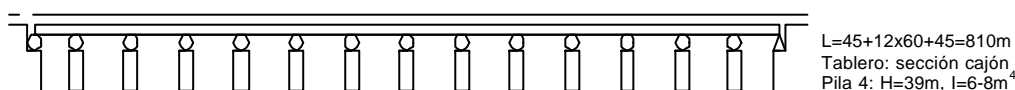


Fig 10 Esquema de la configuración estructural del viaducto de Avernó

- Viaducto sobre llanura inundación del río Anguera (Montblanc): tramos isostáticos sin aparato de dilatación de vía (figura 11).

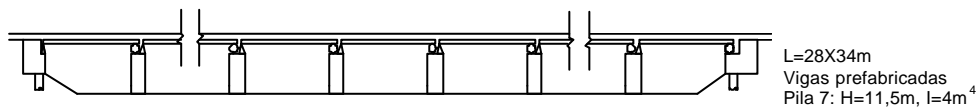


Fig 11 Esquema de la configuración estructural del viaducto sobre la llanura de inundación del Anguera

Los resultados obtenidos permiten conocer el reparto de esfuerzos horizontales entre las pilas, estribos y plataforma adyacente al puente a través de la continuidad de vía. De este modo, se obtiene información sobre la evolución temporal de las solicitaciones a la que la subestructura está sometida, considerando la interacción existente entre vía, estructura y subestructura. Además, se comparan las solicitaciones de la subestructura obtenidas a partir de la metodología planteada con los valores que se obtienen por los procedimientos habituales de cálculo.

En el caso del cortante en la coronación de las pilas, se ha establecido una comparación entre:

- Los resultados obtenidos del cortante $Q_{\text{cálculo}}$ en la coronación de la pila, como resultado de un análisis estructural a partir de la metodología propuesta en este trabajo.

- Los resultados que se obtendrían si se aplicase el criterio habitual de cálculo. Este criterio consiste en considerar que el cortante en la coronación de la pila equivale a la fricción aparecida en el aparato de apoyo provocada por las cargas permanentes cuando hay deslizamiento: $\mu N_{g_1+g_2}$.
- Los resultados que se obtendrían si se considerase que el cortante en la coronación de la pila equivale a la fricción aparecida en el aparato de apoyo provocada por las cargas permanentes y la sobrecarga de uso cuando hay deslizamiento: $\mu N_{g_1+g_2+q}$.

Para el cálculo del esfuerzo cortante en la coronación del estribo se ha establecido una comparación entre:

- Los resultados obtenidos del cortante $Q_{\text{cálculo}}$ en la coronación del estribo, como resultado de un análisis estructural a partir de la metodología propuesta en este trabajo.
- Los resultados que se obtendrían si se aplicase el criterio habitual de cálculo. Este criterio supone que el punto fijo debe contrarrestar la fricción generada en los apoyos móviles si deslizan bajo cargas permanentes ($\mu N_{g_1+g_2}$) y además absorber la totalidad de las fuerzas exteriores (F_{ext}): $F_{\text{ext}} + \mu N_{g_1+g_2}$. Las fuerzas exteriores son las cargas equivalentes al frenado y aceleración de trenes.
- Los resultados que se obtendrían suponiendo que el estribo absorbe la totalidad de las fuerzas exteriores (F_{ext}) y debe contrarrestar la fricción generada en los apoyos móviles bajo cargas permanentes y sobrecarga ($\mu N_{g_1+g_2+q}$) cuando hay deslizamiento: $F_{\text{ext}} + \mu N_{g_1+g_2+q}$.
- Los resultados que se obtendrían aplicando el método simplificado de la ficha UIC 774-3 para encontrar la fuerza transmitida al punto fijo (F_H). Este método está sujeto a ciertos condicionantes por lo que no siempre es aplicable.

Conclusiones

De los resultados del análisis estructural se han extraído conclusiones para cada viaducto estudiado. En la tabla 1 se realiza una recapitulación de estas conclusiones, según la tipología de viaducto: continuo o de vanos isostáticos.

Tabla 1 Cuadro resumen de las conclusiones del análisis estructural de 4 viaductos reales

TABLA RESUMEN		TIPO DE VIADUCTO	
		CONTINUO	VANOS ISOSTÁTICOS
PILAS	Cálculo del cortante máximo	$\mu N_{g_1+g_2}$ lado inseguridad $\mu N_{g_1+g_2+q}$ cota superior	$F_{H,\text{simplificado}}$ conservador
	Cortante debido a acciones diferidas	$Q_{\text{def imp.}} \approx 70\% Q_{\text{max}}$	$Q_{\text{def imp.}} \approx 0$
	Absorción fuerza frenado/arranque	Reducida (máximo 55% en viaductos con muchas pilas)	Muy elevada (hasta 90%)
ESTRIBO FIJO	Cálculo del cortante máximo	$F_{\text{ext}} + \mu N_{g_1+g_2}$ $F_{\text{ext}} + \mu N_{g_1+g_2+q}$ } conservadores $F_{H,UIC}$	$F_{H,\text{simplificado}}$ conservador
	Absorción fuerza frenado/arranque	Elevada (15-70%)	Reducida (5-15%)
PLATAFORMA ADYACENTE / CONTINUIDAD VIA	Generación esfuerzos por def. impuestas	Elevados (estribo fijo)	Notables (extremos viaducto)
	Absorción fuerza frenado/arranque	Elevada (hasta 50%)	Reducida (hasta 0%)

El trabajo realizado ha permitido obtener las conclusiones presentadas en la tabla para cada uno de los viaductos estudiados. Pero, por encima de todo, ha puesto de relieve la importancia que tiene la consideración de la interacción existente entre la vía, la estructura y la subestructura de los puentes de LAV en el cálculo de esfuerzos. En este sentido, se han propuesto finalmente futuros desarrollos para mejorar la metodología propuesta y resolver algunos puntos débiles identificados. Los futuros desarrollos deberían estar orientados hacia la incorporación del comportamiento no lineal de pilas de gran altura, la consideración en cálculo de las variables que influyen en el coeficiente de deslizamiento de los POT-PTFE y la obtención de una ley de comportamiento del balasto que regule la interacción vía-estructura diferenciando entre respuesta frente a acciones inmediatas y diferidas.