# CONSIDERACIONES EN EL DISEÑO DE PUENTES DE HORMIGÓN PARA LÍNEAS DE ALTA VELOCIDAD FERROVIARIA

(CONSIDERATIONS IN THE DESIGN OF CONCRETE BRIDGES FOR HIGH SPEED RAILROADS)

Juan José Cartagena Abella, Ingeniero de Caminos Jefe de las Obras de Ciudad Real y Puertollano, AVE

520-4

Fecha de recepción: 22-VI-92

#### RESUMEN

Los puentes y viaductos sirven de alternativa a las obras de tierra cuando es necesario permitir transversalmente el paso de alguna vía de comunicación o un curso de agua, salvar una singularidad morfológica, o bien simplemente disminuir el efecto barrera mejorando el Impacto ambiental de una obra lineal.

En el artículo se revisan las acciones a tener en cuenta en los cálculos estructurales, haciendo hincapié en las acciones dinámicas.

#### SUMMARY

Bridges and viaducts are an alternative to ground works when the tracks must pass over a road or body of water, or when a rare morphological phenomenon must be preserved, or simply to diminish the barrier effect, there by enhancing the environmental impact of the railroad.

The article reviews the actions to be considered in structural calculations, with an emphasis on dynamic actions.

### **ANTECEDENTES**

El 21 de abril de 1992, se puso en explotación comercial la primera línea ferroviaria española de Alta Velocidad, uniendo las ciudades de Madrid y Sevilla mediante una doble vía de 471 kilómetros de longitud.

Los trabajos de construcción han durado cuatro años y medio, siendo de destacar en su infraestructura la existencia de treinta y un viaductos, con una longitud total de 9.845 metros.

#### DISEÑO

La tipología estructural empleada ha sido muy diversa, ya que existen viaductos hiperestáticos e isostáticos. La sección se consigue en unos casos a base de vigas prefabricadas y en otros mediante una viga cajón. La altura de pilas oscila entre 7 y 78 m. Las longitudes varían entre 53 y 936 metros.

La sección tipo empleada tiene 11,60 m de ancho, alojando dos vías cuya distancia de carriles y entre caras

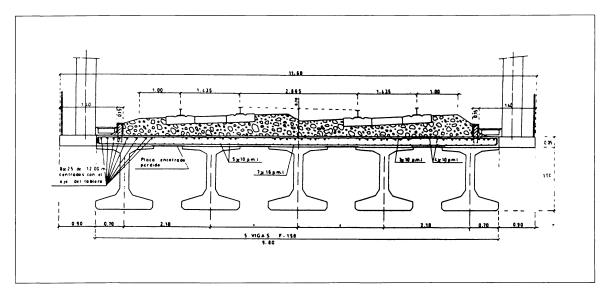


Fig. 1.—Sección tipo con vigas prefabricadas.

activas es de 1,435 m. Los ejes de estas vías están separados 4,30 m, perfilándose el balasto de la superestructura con un hombro de banqueta de 1,00 m. Completan la sección dos paseos laterales de 1,50 metros (Fig. 1).

En las primeras (UIC 776-1) se define un coeficiente  $\varphi$  en función de la luz del elemento estructural básico, variando su valor desde 1,00 hasta 1,67.

Por otra parte, teniendo en cuenta que las cargas reales son menores que las definidas en el tren de cargas, el Comité ORE realizó unos ensayos y estudios teóricos, para definir otro coeficiente  $\varphi$ , de manera que el producto « $\phi$ \* TREN DE CARGAS UIC» cubre, con una seguridad suficiente, el producto « $(1+\varphi)$ \* TREN DE CARGA REAL».

 $\varphi = \varphi' + \varphi''$  (Suma de componentes relativas a vía perfecta y a las irregularidades de la vía respectivamente).

$$\varphi' = \frac{K}{1 - K + K^4}$$
;  $K = \frac{V}{2n_0L}$ 

$$\varphi$$
" =  $\frac{a}{100}$  [56 e<sup>- $\frac{L^2}{100}$</sup>  + 50 ( $\frac{n_0 L}{80}$  - 1) e<sup>- $\frac{L^2}{400}$</sup> ]

Vemos que, al igual que en la normativa española, los coeficientes dependen de la velocidad, de la luz del elemento en cuestión y de la frecuencia propia de la estructura no cargada (Fig. 2).

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc) Resumiendo, tenemos dos maneras de ponderación dinámica de las cargas verticales del tren de cargas:

- a) Coeficiente de impacto y tren de cargas dado por la Instrucción Española. Aunque solamente es aplicable para V ≤ 200 km/h lo extrapolamos para V > 200 km/h.
- b) Coeficiente de impacto y tren de cargas dado por la UIC.

Consideramos una estructura tipo y calculamos los diferentes parámetros para las luces más corrientes (15, 20 y 30 m) aplicándolos a los trenes de carga respectivos, obteniendo los siguientes resultados:

## 1º Datos de la Instrucción Española (IE)

Tren de cargas (tipo B): 12 t/m.

Coeficiente de impacto:

$$i = \frac{114 \sqrt{L}}{3,10 - 1,76 \sqrt{L} + L}$$

Aunque la Instrucción advierte que esta fórmula es válida solamente para  $V \le 200$  km/h, la usaremos por ver el efecto de su extrapolación.

http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es

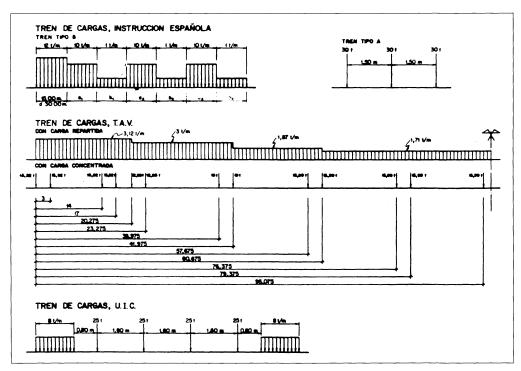


Fig. 2.—Distintos trenes de carga considerados en el cálculo.

Fuerza centrífuga:

$$F_c = 12 \cdot \frac{V^2}{127 \text{ R}}$$

Carga media para un tramo de 15 m:

$$\frac{4 \times 25 + 8,60 \times 8}{15} = 11,25 \text{ t/m}$$

Carga media para un tramo de 20 m:

$$\frac{4 \times 25 + 13,60 \times 8}{20} = 10,44 \text{ t/m}$$

Carga media para un tramo de 30 m:

$$\frac{4 \times 25 + 23,60 \times 8}{30} = 9,63 \text{ t/m}$$

(A efectos de las intenciones de este estudio es suficiente operar con estas cargas medias.)

$$1,21 \text{ para } L = 15 \text{ m}$$
 Coeficiente de impacto  $\phi_2 = 1,16 \text{ para } L = 20 \text{ m}$ 

1,09 para L = 30 m

(utilizamos el coeficiente  $\phi_2$  por considerar que es el más significativo).

Fuerza centrífuga: 
$$F_c = p \cdot \frac{V^2}{127 \text{ R}} \cdot f$$

#### Datos de las Fichas UIC

Tren de cargas: 4 puntales de 25 t separadas 1,60 m + carga uniforme de 8 t/m en el resto.

Valores de f:

L	V (km/h)			
(m)	160	200	250	300
15	0,85	0,74	0,63	0,55
20	0,83	0,71	0,60	0,50
30	0,81	0,68	0,55	0,45

## Producto Carga (t/m) x Coeficiente de Impacto

L (m)	INSTRUC. ESPAÑOLA (IE)	UIC	RELACION IE / UIC
15	1,39×12=16,68	1,21×11,25=13,61	1,22
20	1,33×12=15,96	1,16×10,44=12,21	1,32
30	1,27×12=15,24	$1,09 \times 9,63 = 10,50$	1,45

http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es

## 4.º) Producto radio X fuerza centrifuga =

$$= \frac{P \cdot V^2}{127} \cdot f \cdot (t)$$



	V			
	160	200	250	300
15	2.419	3.780	5.905	8.504
13	1.928	2.622	3.488	4.385
20	2.419	3.780	5.905	8.504
	1.747	2.335	3.083	3.699
30	2.419	3.780	5.905	8.504
	1.572	2.062	2.607	3.071

Coeficiente 
$$\frac{R \cdot F_c (IE)}{R \cdot F_c (UIC)} :$$

L	V (km/h)			
	160	200	250	300
15	1,25	1,44	1,69	1,94
20	1,38	1,62	1,92	2,30
30	1,54	1,83	2,27	2,77

Del estudio anterior se deduce la gran diferencia que existe entre los resultados obtenidos si aplicáramos la normativa española manteniendo el valor de la expresión para velocidades mayores de 200 km/h, y aquellos que resultan de la normativa UIC. Esta diferencia se va incrementando de acuerdo con luces crecientes, siendo mucho más significativa para el caso de la fuerza centrífuga.

Luego el procedimiento de cálculo podría ser, mientras no se disponga de una normativa española reformada y adaptada al caso de circulaciones a alta velocidad:

- a) Considerar la Instrucción Española para velocidades menores de 200 km/h.
- b) Considerar las recomendaciones UIC para velocidades mayores de 200 km/h, tanto para el cálculo del coeficiente de impacto como para el de la fuerza centrífuga, ya que aunque la Instrucción Española no limite la velocidad por esta última, hemos visto la

gran diferencia que existe con las recomendaciones © Consejo Superior de Investigaciones Científicas Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc) UIC, llegando incluso a alcanzar valores de casi un 300%.

No obstante, parecería un contrasentido si al utilizar este procedimiento de cálculo nos encontramos con esfuerzos menores de los que nos decía la Instrucción Española para V < 200 km/h.

Definidas las acciones y los esfuerzos máximos, se procede al cálculo de la estructura, de acuerdo con la normativa vigente particular para cada caso. (EH-91; EP-80; PDS-1-74; etc.).

Para evitar problemas de resonancia en los vehículos, se debe tender hacia tableros rígidos de hormigón armado o pretensado, así como que las frecuencias propias de vibración en los tableros contiguos sean diferentes.

Una vez calculado el viaducto, es conveniente realizar un estudio de comportamiento dinámico de la estructura, calculando la flecha máxima que aparece en el centro de cada viga para distintas velocidades del tren de cargas considerado y comparándola con la obtenida en el cálculo estático y en el que se ha considerado el coeficiente de impacto.

El procedimiento puede consistir en calcular la solución analítica de una viga biapoyada, cuya solicitación consiste en un tren de cargas repartidas móvil.

El modelo de comportamiento que se puede utilizar es el de Bernouilli, considerándose la deformación por flexión y el efecto de la masa del puente. La solución final se obtiene por superposición de la respuesta a sucesivas cargas uniformes de duración infinita.

La ecuación general de la deformada de una viga es:

$$\frac{d^2}{dx^2} \quad (EI \quad \frac{d^2 \psi}{dx^2} \quad ) = P$$

Si  $\psi_i$  (x) es una solución que cumple con las consideraciones de contorno, aplicando trabajos virtuales tendremos:

$$\int_{o}^{L} \psi_{i}$$
" (x) EI y" (x, t) dx =  $\int_{o}^{L} P \psi_{i}$  (x) dx i = 1...u http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es

Desarrollando la carga «P» como

$$P = q - m \dot{y}(x, t) - C y(x, t)$$

Teniendo en cuenta que «q» toma dos valores diferentes, según que la carga repartida ocupe parcial o totalmente el vano y que los modos de vibración de una viga biapoyada son ortogonales y del tipo

$$\psi_i(x) = Sen \frac{i \pi x}{I}$$

la solución será de la forma y (x • t) ≅

$$\cong \sum_{j=1}^{n} aj(t) \psi_{j}(x),$$

comprendiendo dos campos diferentes de definición, es decir, dos funciones, una dependiente del espacio y otra del tiempo, considerada como superposición de la respuesta de los distintos modos de vibración.

No creemos oportuno, fundamentalmente por problemas de espacio, incluir en este artículo el desarrollo matemático para la resolución del planteamiento anterior, pudiéndose encontrar información al respecto en publicaciones como «Vibrations of solids and structures mader moving loads» de Ladislav Frýba y en «The dinamical Behaviour of Structures» de G.B. Burton.

La solución general de la ecuación será de la forma:

$$a_i(t) = e^{-\alpha_i w_i t} (B_i Cos w d_i t + C_i Sen w d_i t) + ap_i$$



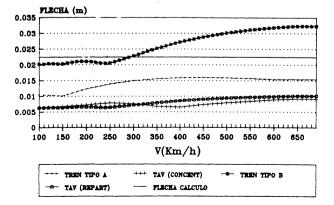


Fig. 3.—Flecha máxima en el centro de cada viga y para distintas hipótesis.

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc) Donde «ap<sub>i</sub>» es la solución particular debida a la carga aplicada y «B<sub>i</sub>, C<sub>i</sub>» son las constantes de integración de la solución homogénea, obteniéndose a partir de las condiciones iniciales.

En la figura 3 se representa gráficamente la evolución de las flechas respecto del tiempo para el caso particular.

APLICACIÓN A : 
$$L = 28,35 \text{ m}$$
;  $R = 2.000 \text{ m}$ ;  $V = 200 \text{ km/h}$ 

Carga × Coeficiente de impacto:

IE: 
$$1,275 \times 12 = 15,30 \text{ t/m}$$

UIC: 
$$1,10 \times 9,72 = 10,69 \text{ t/m}$$

IE / UIC = 
$$\frac{15,30}{10.69}$$
 =  $\frac{1,43}{10.69}$ 

Fuerza centrífúga:

IE: 
$$F_c = \frac{12 \times 200^2}{127 \times 2.000} = 1,89 \text{ t/m}$$

UIC : 
$$F_c = \frac{9.72 \times 200^2}{127 \times 2.000} \times 0.685 = 1.05 \text{ t/m}$$

$$\frac{F_c \text{ (IE)}}{F_c \text{ (UIC)}} = \frac{1,89}{1,05} = \frac{1,80}{1}$$

Se aprecia fácilmente la diferencia de respuesta según se aplique el tren de cargas de la Normativa española o el del tren de alta velocidad.

#### **DEFORMACIONES MÁXIMAS**

Otra de las características fundamentales, a la hora del diseño y cálculo de un viaducto para alta velocidad ferroviaria, es la de tener en cuenta que los movimientos de la estructura son transmitidos directamente o a través del balasto a la vía. Tratándose de vías para circular a alta velocidad, es evidente que la calidad que se las exige es muy alta, por lo que toda deformación a ella inducida debe ser compatible con dicha calidad.

Pero no solamente estas deformaciones actúan de una forma negativa en el confort del viajero, sino que pueden dar lugar a tensiones adicionales en los carriles con http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es peligro de rotura de juntas soldadas, así como amplificar los efectos dinámicos previstos, de manera que aunque sin dañar a la estructura lleguen a desestabilizar la cama de balasto.

Las deformaciones en el plano vertical están constituidas por las flechas en las vigas principales y las deformaciones en los aparatos de apoyo, debidas al tren de cargas, a las cargas permanentes y a los efectos dinámicos.

Las deformaciones en el plano horizontal son motivadas por el efecto viento, la fuerza centrífuga y el gradiente de temperatura entre la cara superior e inferior de la estructura.

Las acotaciones de la flecha vertical, según la UIC, se encuentran dentro de un huso limitado por:

$\delta_L \ = \ 0.034927 \ L^{1,49614}$	para 4 m $<$ L $\leq$ 25 m
$\delta_u = 0,049 \ L^2$	para 4 m < L < 20 m
$\delta_{L}$ = Sin limitación	para L > 25 m
$\delta_{} = 0.564 L^{1.8443}$	para 20 m ≤ L ≤ 100 m

Si la flecha se encuentra dentro de este huso, se asegura que la frecuencia propia de vibración cumple con los valores citados en este artículo.

Por confort estas flechas deben cumplir además otra limitación, de acuerdo con la luz del elemento y del número de vanos contiguos.

Independientemente de lo anterior, las deformaciones no deben dar lugar a alabeos en vía con valores mayores de 7,5 mm (bogies de ejes separados 3 m).

Los ángulos en el plano vertical de los apoyos, debidos a sobrecargas y a efectos térmicos, no deben superar el valor de  $10^{-2}$  rad. Por este motivo se debe evitar que existan soldaduras de carril a menos de 2,50 m de la línea de apoyos.

Según la UIC y el Comité de expertos ORE, la tensión máxima de trabajo en el carril debida a deformaciones

estructurales no debe separar los 80 N/mm², si bien la normativa alemana apunta un valor de 72 N/mm² para compresión y de 92 N/mm² para tracción.

En el caso de que se originen tensiones mayores, podríamos disminuirlas mediante «acoplamientos de fuga» situados en el eje de gravedad del tablero, derivando los esfuerzos longitudinales a los estribos. Estos acomplamientos consisten fundamentalmente en apoyos horizontales situados entre vigas y entre vigas y estribo, de esta manera un sistema de vigas biapoyadas se comporta, a estos efectos, prácticamente igual que una viga continua.

Otra manera de evitar estas sobretensiones en los carriles, sería colocando aparatos de dilatación que permitan el juego de la vía.

En un plano horizontal y para velocidades mayores de 200 km/h, la UIC limita el giro en apoyos a  $15 \times 10^{-5}$  rad. o bien a una deformada de 14.000 m de radio, con el fin de que la curva que adopte la vía en función de la esviación del tablero no dé lugar a una falta de confort en la circulación, motivada por puntas de la aceleración sin compensar.

#### PUESTA A TIERRA DE LA ESTRUCTURA

El retorno de la energía eléctrica, que sirve de alimentación a los elementos motrices del material motor, se realiza a través de puestas a tierra del carril, con el fin de no crear diferencias de potencial importantes entre éste y el terreno.

Las estructuras del tipo puentes y viaductos también se deben proteger contra estas posibles diferencias de potencial. Para ello se procede al cosido de las armaduras mediante flejes de  $30 \times 4$  mm, uniéndolos con los carriles exteriores de la vía junto a cada poste de electrificación en el caso de que la longitud del viaducto así lo permita.

Si se trata de hormigón pretensado no se deben poner las armaduras a tierra.

\* \* \*