

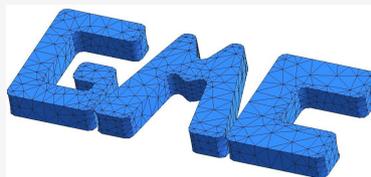
# Efectos Dinámicos en Puentes de Ferrocarril. Repercusión sobre la Normativa y el Proyecto.

*3.er Encuentro Anual sobre PUENTES*

José M.<sup>a</sup> Goicolea

Grupo de Mecánica Computacional, <http://w3.mecanica.upm.es>  
E.T.S. Ingenieros de Caminos, Univ. Politécnica de Madrid

IIR España, Madrid, 31 mayo 2006



Efectos Dinámicos en Puentes de Ferrocarril; Normativa y Proyecto

José M.<sup>a</sup> Goicolea

## Índice

- 1 ACCIONES DINÁMICAS EN PUENTES DE FFCC
  - Comentarios Iniciales
  - Efectos Dinámicos. Resonancia.
  - Trenes reales, trenes tipo y barridos
- 2 MÉTODOS DE CÁLCULO Y PROYECTO
  - Coeficiente de Impacto
  - Cálculo Dinámico
  - Envolvertes
  - Trenes
- 3 APLICACIONES A PUENTES
  - Influencia de la tipología
  - Algunas aplicaciones
  - Observaciones Finales

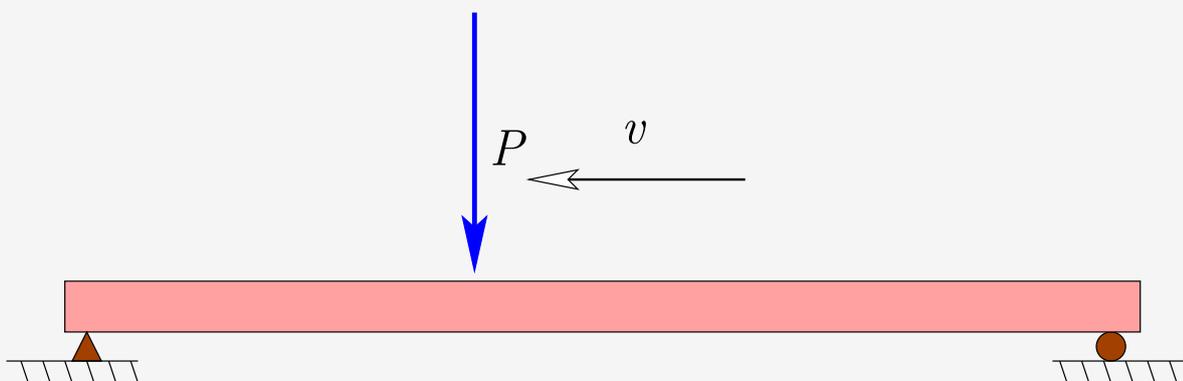


# Comentarios Iniciales

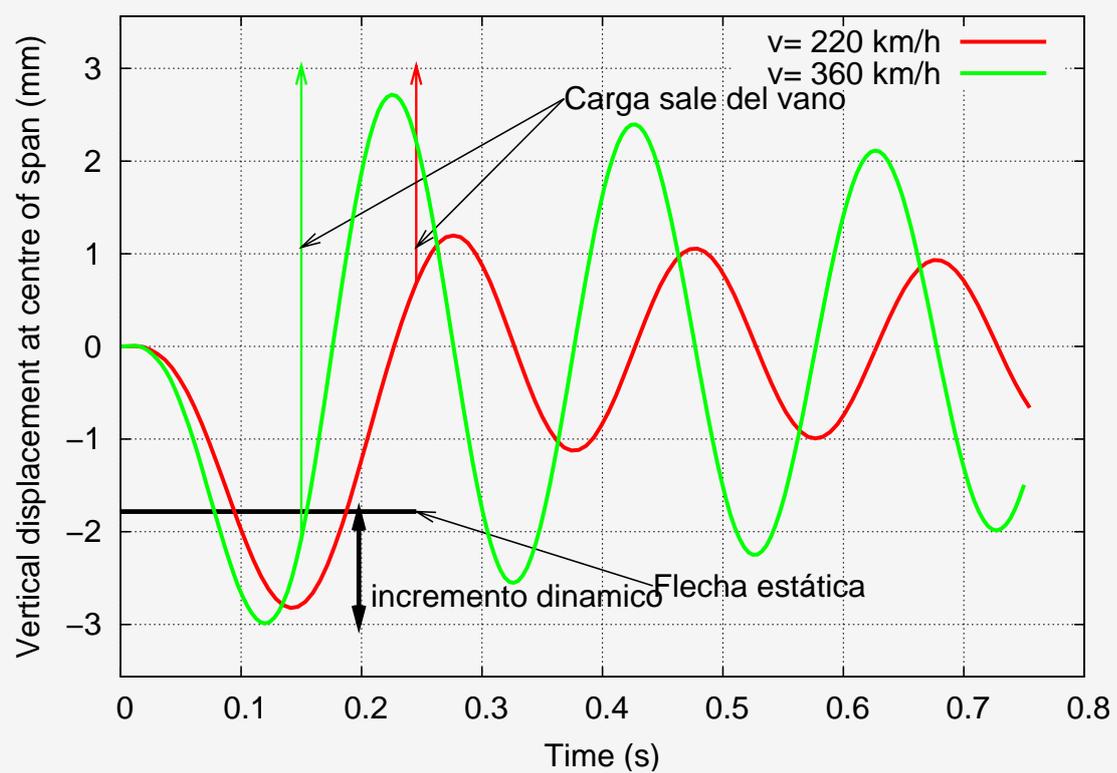
- Problemática específica de puentes de ferrocarril:
  - Mayores cargas de tráfico y carga permanente (balasto)
  - **Efectos Dinámicos**
  - Interacción vía–tablero
  - Requisitos de comodidad y seguridad de la vía (ELS)
- Elevada inversión en infraestructura y material móvil
- **Escasísima** inversión en I+D
- Falta conocimiento suficiente
- ⇒ Criterios de proyecto, construcción y mantenimiento



# Carga Móvil



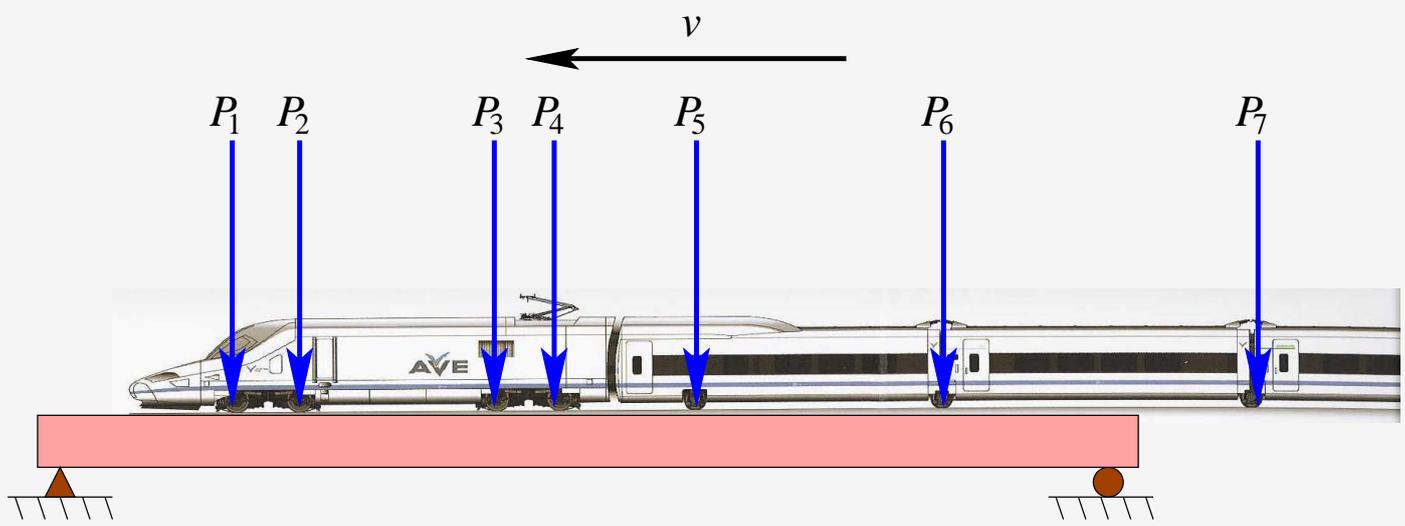
# Efecto Dinámico de Carga Móvil



$L = 15 \text{ m}, \bar{m} = 15 \text{ t/m}, f_0 = 5 \text{ Hz}, P = 195 \text{ kN}, \zeta = 2\%$ .

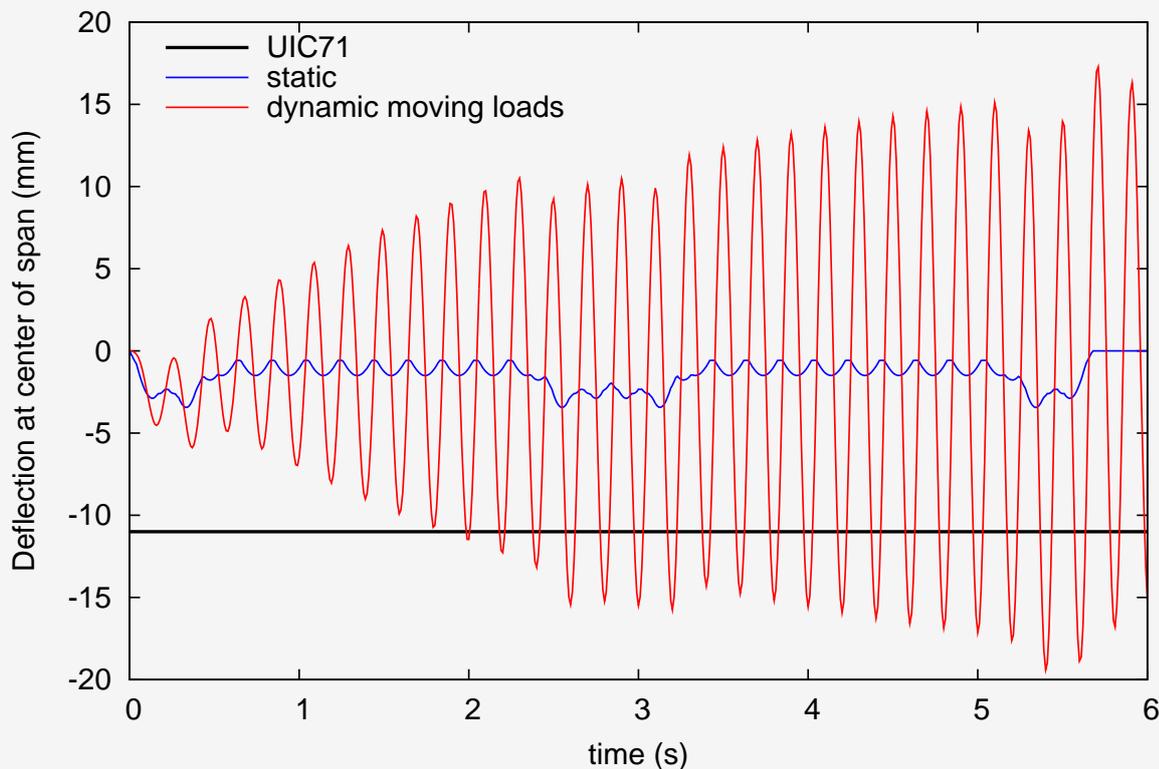


# Efecto Dinámico de Tren de Cargas: Resonancia



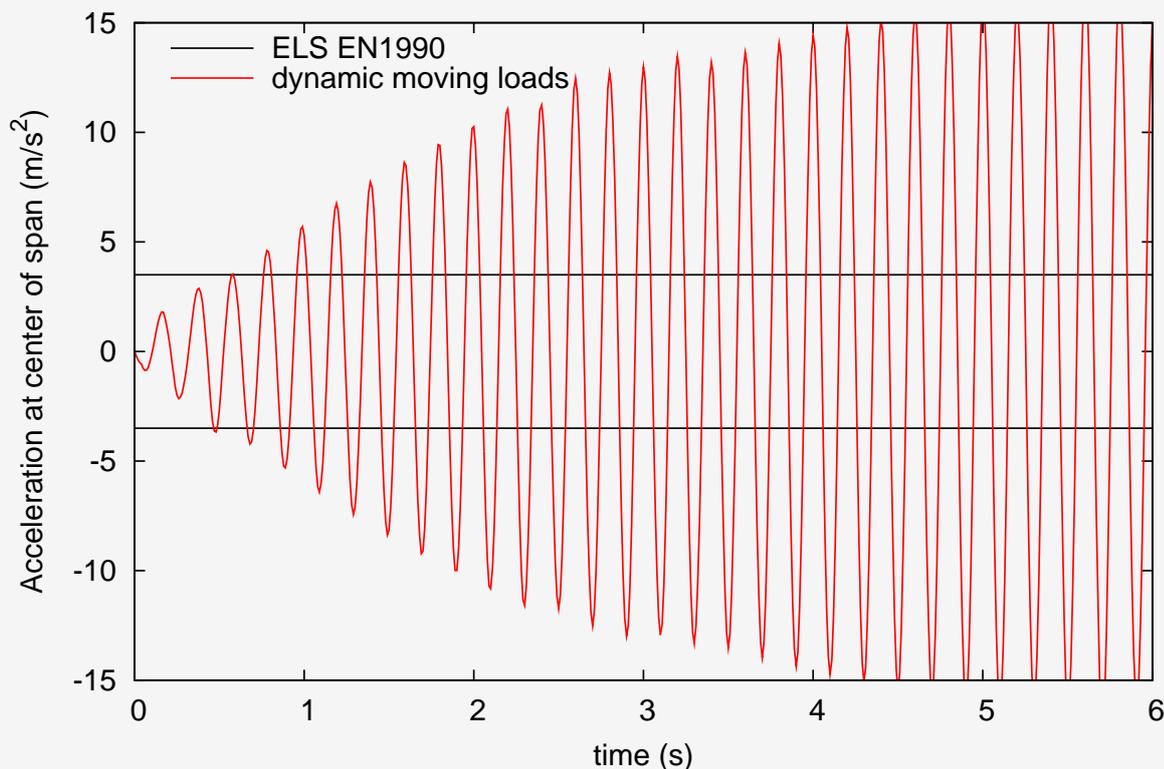
# Efecto Dinámico de Tren de Cargas: Resonancia

TALGO AV  $v=236.5$  km/h, ERRI Bridge  $L=15$ m,  $\zeta=0,01$ ;  $f_0=5$  Hz,  $\lambda=13.14$  m = D



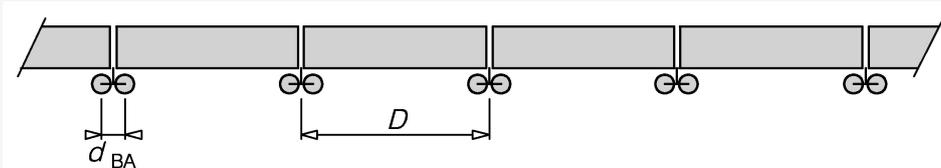
# Historia temporal resonante: aceleraciones

TALGO AV  $v=236.5$  km/h, ERRI Bridge  $L=15$ m,  $\zeta=0,01$ ;  $f_0=5$  Hz,  $\lambda=13.14$  m = D

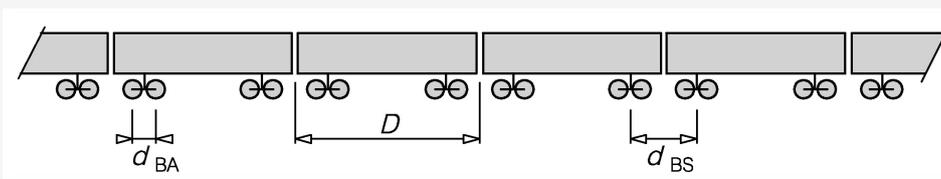




# Tipos de trenes de Alta Velocidad



*Articulados: Thalys, AVE-1 y Eurostar.*

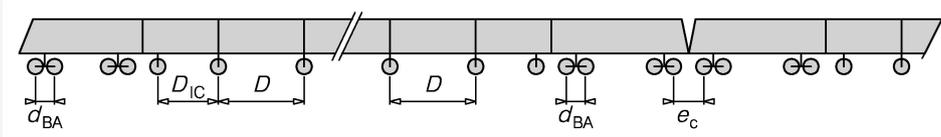


*Convencionales: Ice2, AVE-3, Etr-y, Virgin.*

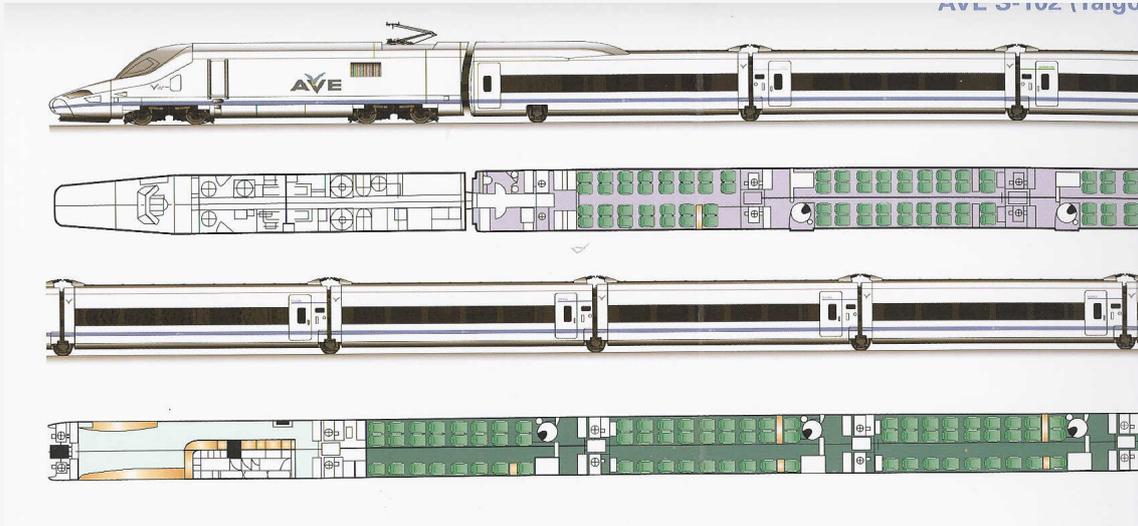


AVE S-103 (Siemens)





Regulares: AVE-2 (TALGO).



# Consecuencias para el Proyecto

**NECESIDAD** de considerar:

- Efectos dinámicos
- Todas las velocidades de circulación, con margen de 20 %
- Todos los posibles trenes (interoperabilidad)



# Eurocódigos y otras Normativas

## Eurocódigos

- EN1991-2, section 6: *Rail traffic actions . . .*, 2003
- EN1990-prA1: Annex A2, *Application for bridges: . . .* 2004.
- NAD's: *National Application Documents*

## UIC / ERRI

- ERRI D214: Final report, *Design of railway bridges for speed up to 350 km/h; Proposition de fiche UIC*, 2002
- UIC 776-1 R: *Charges. . . calcul des ponts-rails*, 1979

## Códigos Españoles

- IAPF (Borrador, 2003): *Acciones en Puentes de Ferrocarril*
- IAPF 1975: *Instrucción antigua*



# Coeficiente de Impacto

- Incremento dinámico de la respuesta del puente

$$\varphi' = \frac{K}{1 - K + K^4}; \quad K = \frac{v}{2L_{\Phi}f_0}$$

- Coeficiente dinámico para *trenes reales*:

$$(1 + \varphi' + \varphi'')E_{stat,real}$$

- *Envolvente*, para vía con buen mantenimiento:

$$\Phi_2 = \frac{1,44}{\sqrt{L_{\Phi}} - 0,2} + 0,82 \not\leq 1$$



# Coeficiente de Impacto

Uso del coeficiente envolvente  $\Phi$

- Multiplica a solicitaciones debidas a  $\alpha \times LM71$

$$\Phi E_{stat,LM71} \geq E_{dyn,real}$$

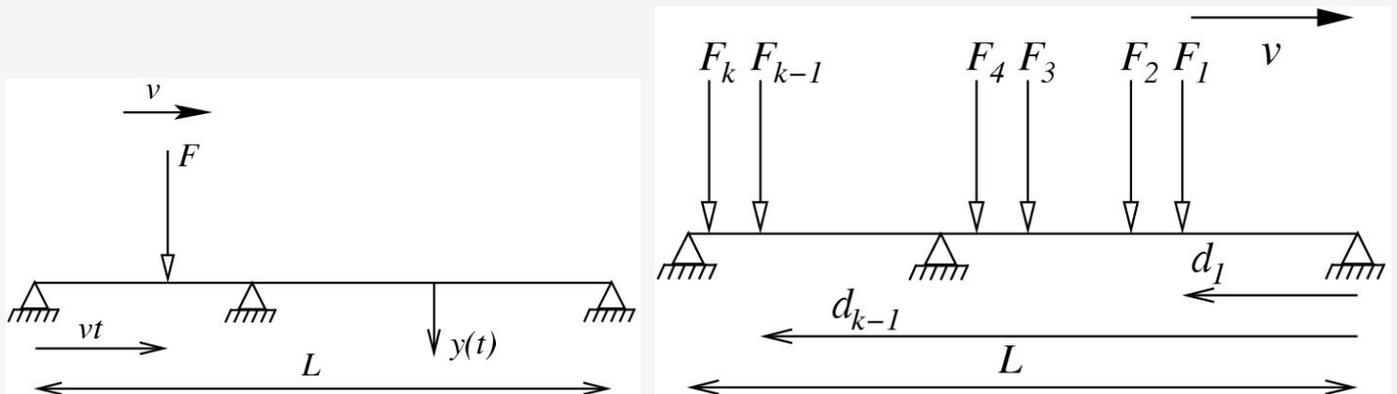
- limitaciones:  $v \leq 200 \text{ km/h}$ , frecuencia  $f_0 \in \text{band}(L)$ .

## Observación Importante

LM71  $\approx$  3 veces más pesado que trenes de pasajeros de AV:  
 Coeficiente de impacto real pudiera ser  $< 1$ , pero debe tomarse  $\Phi \not\leq 1$



# Modelos de Cargas Móviles



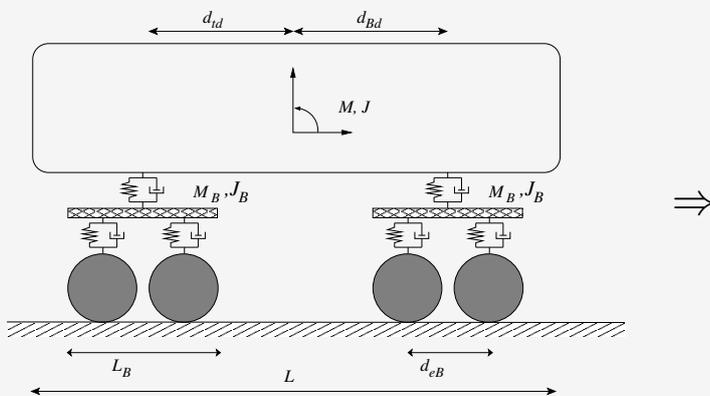
- **Análisis Modal:**  $\rightarrow \{\omega_i, \phi_i(x)\}$
- Una ecuación para cada modo  $\phi_i$ :

$$M_i \ddot{y}_i + 2\zeta_i \omega_i M_i \dot{y}_i + \omega_i^2 M_i y_i = \sum_{k=1}^{n_{ax}} F_k \langle \phi_i(vt - d_k) \rangle.$$

$$\text{siendo } \langle \phi(x) \rangle = \begin{cases} \phi(x) & \text{si } 0 < x < L \\ 0 & \text{en caso contrario.} \end{cases}$$



# Interacción Vehículo-Estructura

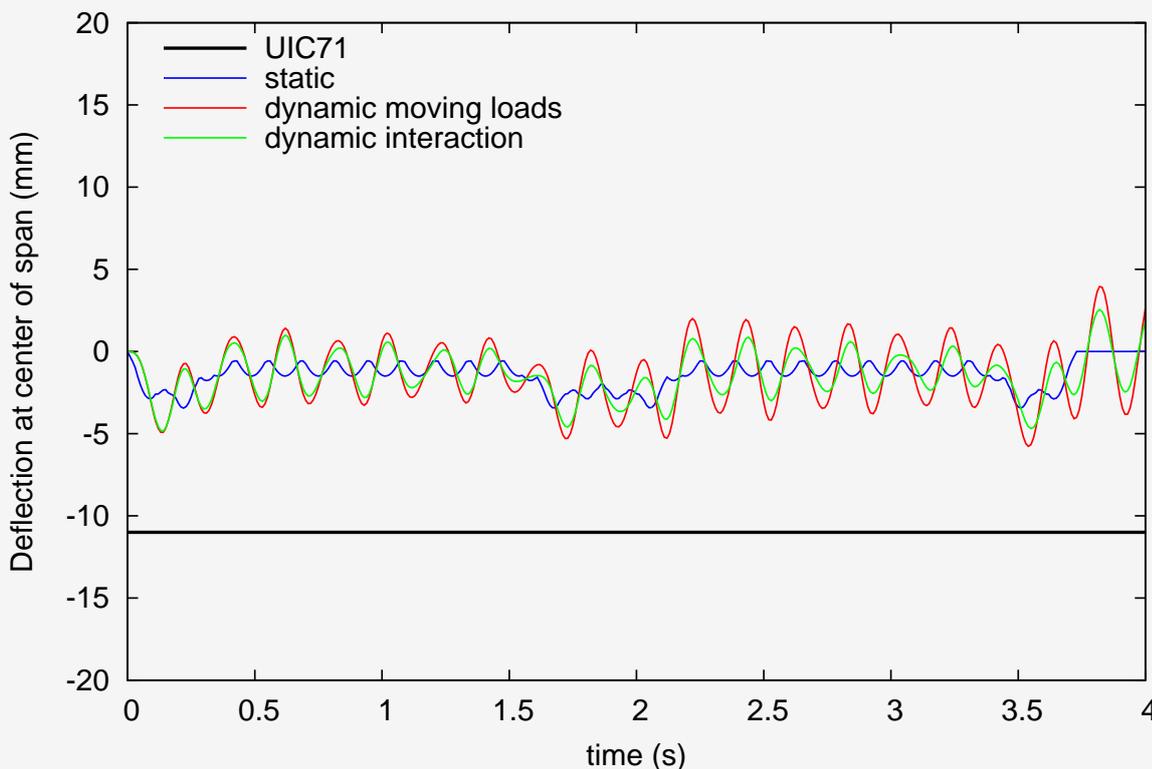


- ♠ Considera energía de vibración de los vehículos
- ♠ Permite una reducción en situaciones resonantes para puentes cortos ( $L \leq 30$ ) m de hasta 45 %
- ♠ Menor repercusión para puentes de mayor luz o continuos



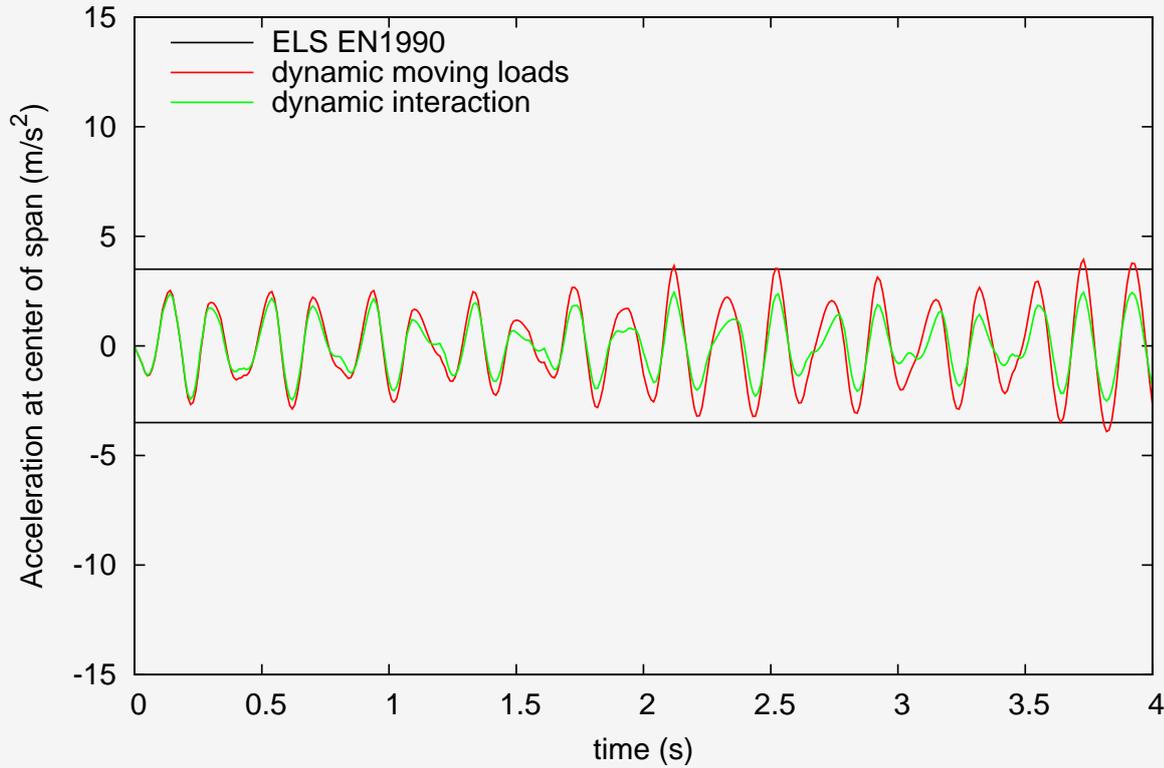
# Efecto Dinámico de Tren de Cargas (sin resonancia)

TALGO AV  $v=360$  km/h, ERRI Bridge  $L=15$  m,  $\zeta=0,01$ ;  $f_0=5$  Hz,  $\lambda=13.14$  m = D



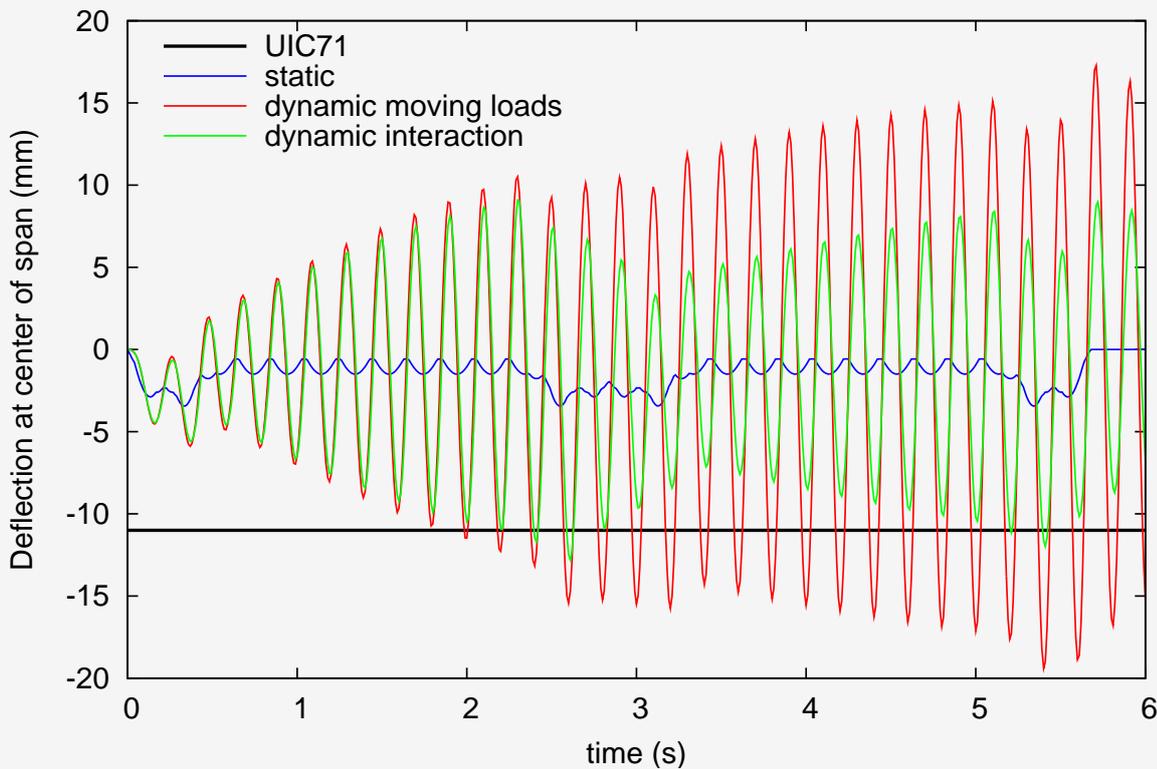
# Historia temporal no resonante: aceleraciones

TALGO AV v=360 km/h, ERRI Bridge L=15m,  $\zeta=0,01$ ;  $f_0=5$  Hz,  $\lambda=13.14$  m = D

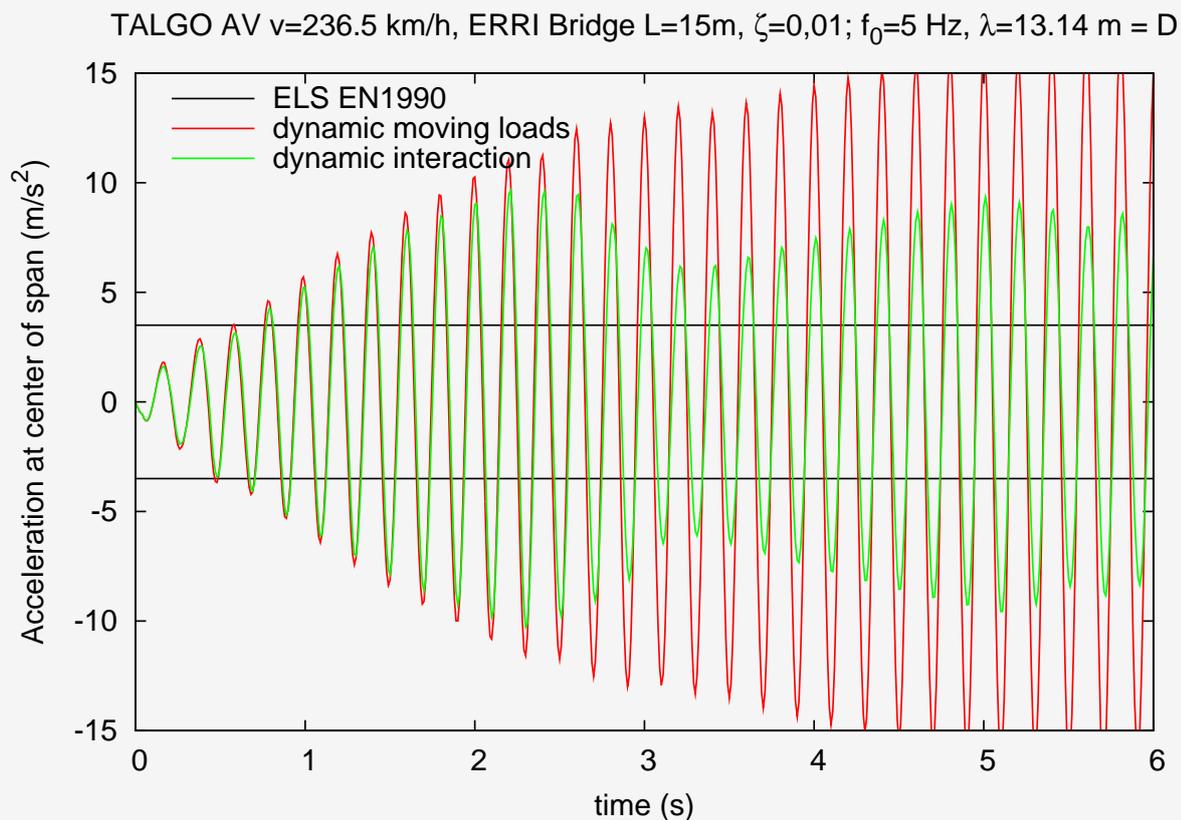


# Efecto Dinámico de Tren de Cargas (resonancia)

TALGO AV v=236.5 km/h, ERRI Bridge L=15m,  $\zeta=0,01$ ;  $f_0=5$  Hz,  $\lambda=13.14$  m = D



# Historia temporal resonante: aceleraciones



## Cálculo de Efectos Dinámicos para distintas Solicitaciones

- Un cálculo dinámico riguroso debería calcular la respuesta dinámica de cada sollicitación en estudio, de forma independiente.
- Se suele considerar una medida *característica* única de la flecha dinámica del puente  $\delta(x, t)$  como representativa de la respuesta dinámica del conjunto del mismo.  
**Ejemplo:** Flecha en la mitad del vano para puente isostático
- La respuesta dinámica para distintas sollicitaciones (momento flector, cortante, componente de tensión) o en otros puntos no tiene porqué variar proporcionalmente a un único valor característico
- Generalmente la simplificación de tomar una única respuesta dinámica como representativa es válida, salvo casos especiales.



## Ejemplo: Cálculo de Reacciones / Cortantes

Puente simplemente apoyado, carga instantánea  $P$  en el centro (escalón)

Solución analítica en función de los modos de vibración:

$$Q(0, t) = \frac{-2P}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{1}{(2n-1)(-1)^{n-1}} \frac{\cos(\omega_{2n-1} \sqrt{1-\zeta_{2n-1}^2} t)}{(2n-1)(-1)^{n-1}} e^{-\zeta_{2n-1} \omega_{2n-1} t} + \frac{\frac{\zeta_{2n-1}}{\sqrt{1-\zeta_{2n-1}^2}} \sin(\omega_{2n-1} \sqrt{1-\zeta_{2n-1}^2} t)}{(2n-1)(-1)^{n-1}} e^{-\zeta_{2n-1} \omega_{2n-1} t} \right]$$

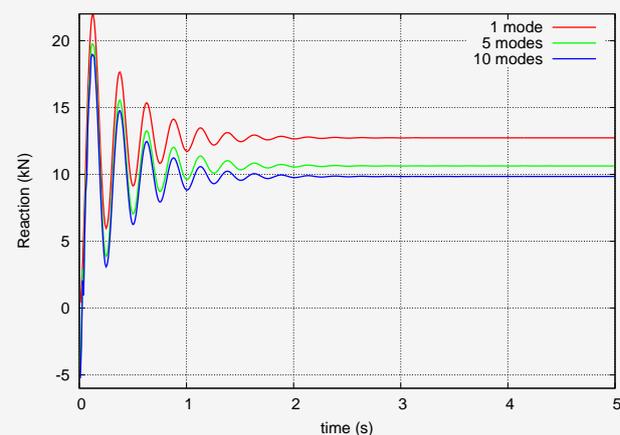
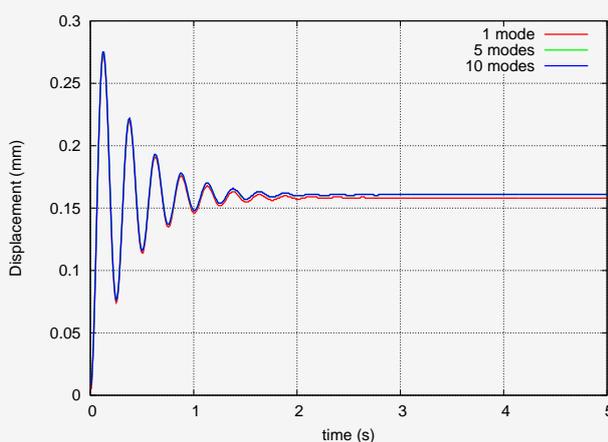
Límite y suma para estado estacionario (carga estática):

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)(-1)^{n-1}} = \frac{\pi}{4} \Rightarrow Q(0) = \frac{P}{2}$$



(Similarmente para desplazamientos  $\delta(L/2)$  y momentos  $M(L/2)$ )

## Comparación de Respuestas Desplazamientos y Reacciones

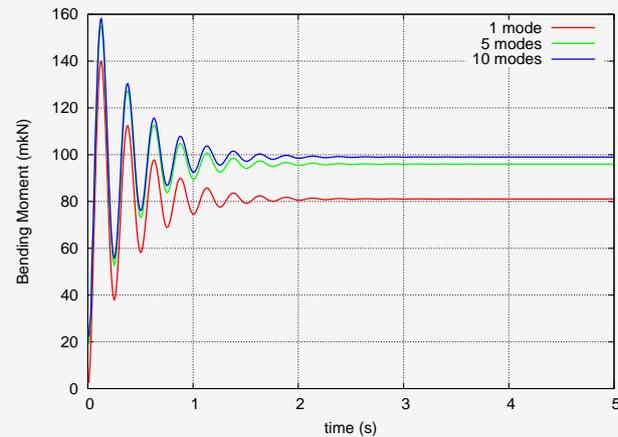
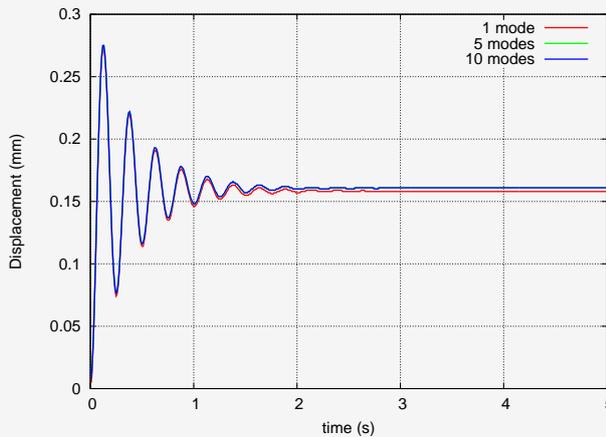


### Observación

- Un único modo de vibración resulta suficiente para los *desplazamientos* en vigas simplemente apoyadas
- Las **reacciones y cortantes** necesitan considerar un número mayor de modos de vibración



# Comparación de Respuestas Desplazamientos y Flectores

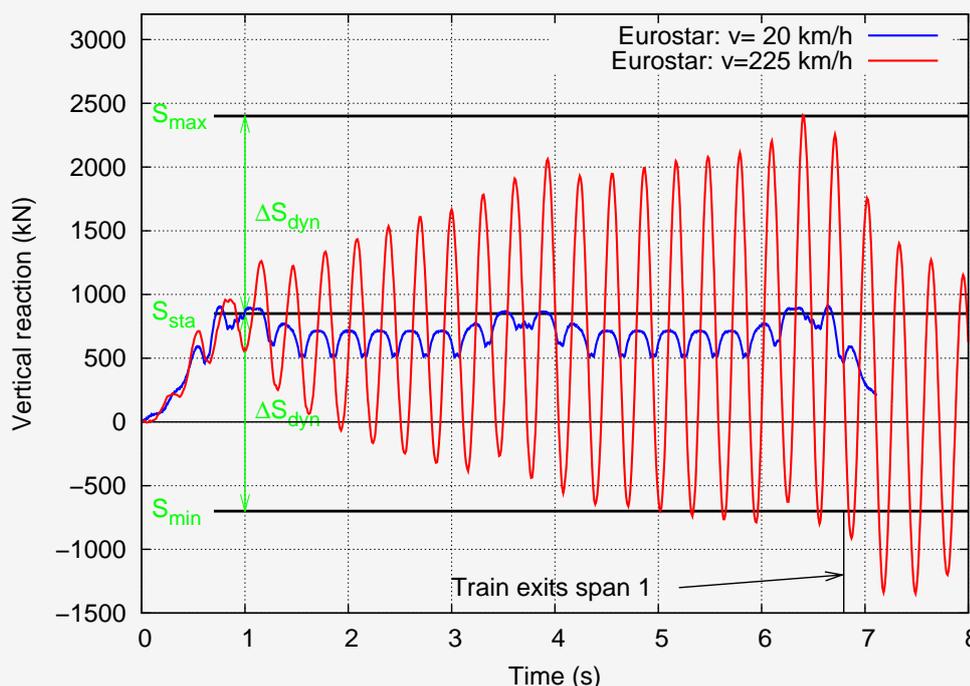


## Observación

- Los **momentos flectores** necesitan considerar un número mayor de modos de vibración



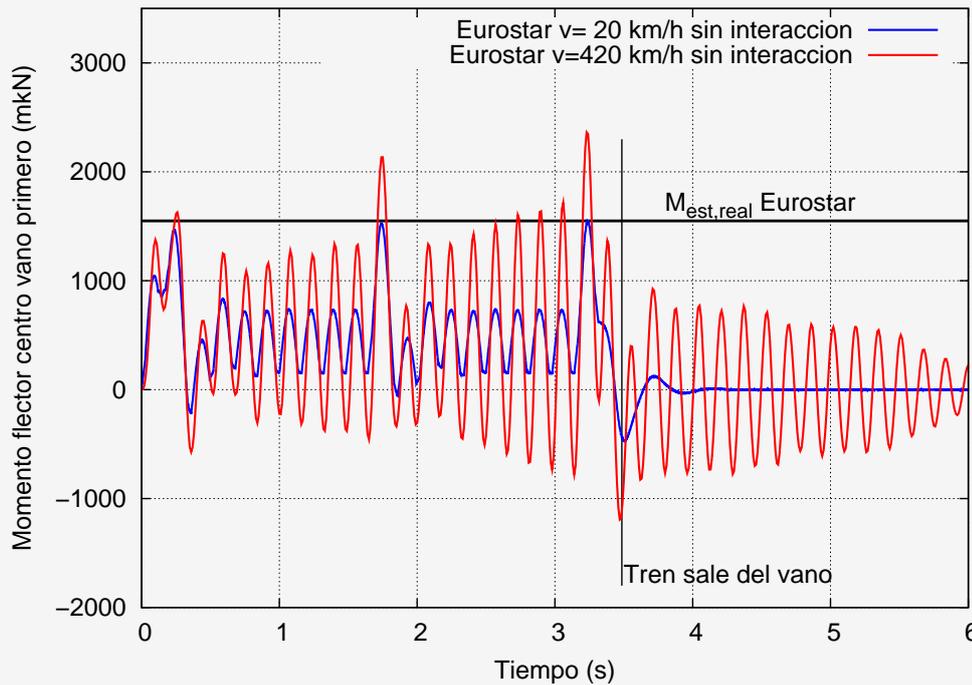
# Levantamiento Dinámico: Reacción en apoyo



Historia temporal de reacciones en apoyo intermedio del viaducto del Tajo. Eurostar,  $v = 225 \text{ km/h}$ .



# Levantamiento Dinámico: Momento Flector



*Historia temporal de flectores en vano 1 intermedio del viaducto del río Cabra. Eurostar, v = 225 km/h.*



# Propuesta normativa para descarga dinámica

- Comprobación de *estabilidad lateral*
- Eurocode EN-1991-2:  
*tren descargado*,  $q_{vk} = 10 \text{ kN/m}$
- IAPF:

$$\Phi_{\min} = 2f_e - \Phi_r; \quad \Phi_{\min} \leq 0,$$

(1)

- $f_e = E_{\text{sta,real}}/E_{\text{sta,LMd}}$ , relación entre la respuesta estática para trenes reales y la del tren de carga tipo ( $\text{LM71} \times \alpha$ ), Valores usuales:  $0,25 \leq f_e \leq 0,35$
- $\Phi_r = E_{\text{max}}/E_{\text{sta,LMd}}$ , coeficiente de impacto real.

$\Phi_{\min}$  puede ser negativo (levantamiento)



# Requisitos para cálculo dinámico adicional

EN1991-2, section 6.4.4: flow chart in fig. 6.9

## Se requiere cálculo dinámico cuando:

- $V > 200$  km/h, estructura simple<sup>(\*)</sup>,  $L < 40$  m, si  $f_0$  fuera de límites, ó si  $f_T \leq 1,2f_0$
- $V > 200$  km/h, estructura no simple<sup>(\*)</sup>, siempre
- $V \leq 200$  km/h, estructura simple, cualquier  $L$ ,  $f_0$  fuera de límites

## No se requiere cálculo dinámico si:

- $V > 200$  km/h, estructura simple<sup>(\*)</sup>,  $L \geq 40$  m,  $f_0$  dentro de límites
- $V \leq 200$  km/h, tablero continuo, siempre

(\*): simplemente apoyada, sin esviaje, apoyos rígidos



# Impronta Dinámica ( $\zeta = 0$ )

Aceleración  $\Gamma$  en el centro del vano:  $\Gamma = C_{\text{accel}} \cdot A(K) \cdot G(\lambda)$

$$C_{\text{accel}} = \frac{1}{M}; \quad \lambda = \frac{v}{f_0},$$

$$A(K) = \frac{K}{1 - K^2} \sqrt{2 \left[ 1 + \cos \left( \frac{\pi}{K} \right) \right]},$$

$$G(\lambda) = \max_{i=1}^N \sqrt{\left[ \sum_{x_1}^{x_i} F_i \cos(2\pi\delta_i) \right]^2 + \left[ \sum_{x_1}^{x_i} F_i \sin(2\pi\delta_i) \right]^2}$$

siendo  $\delta_i = (x_i - x_1)/\lambda$ ,  $i = 1 \dots N$ : distancia adimensional eje  $i$

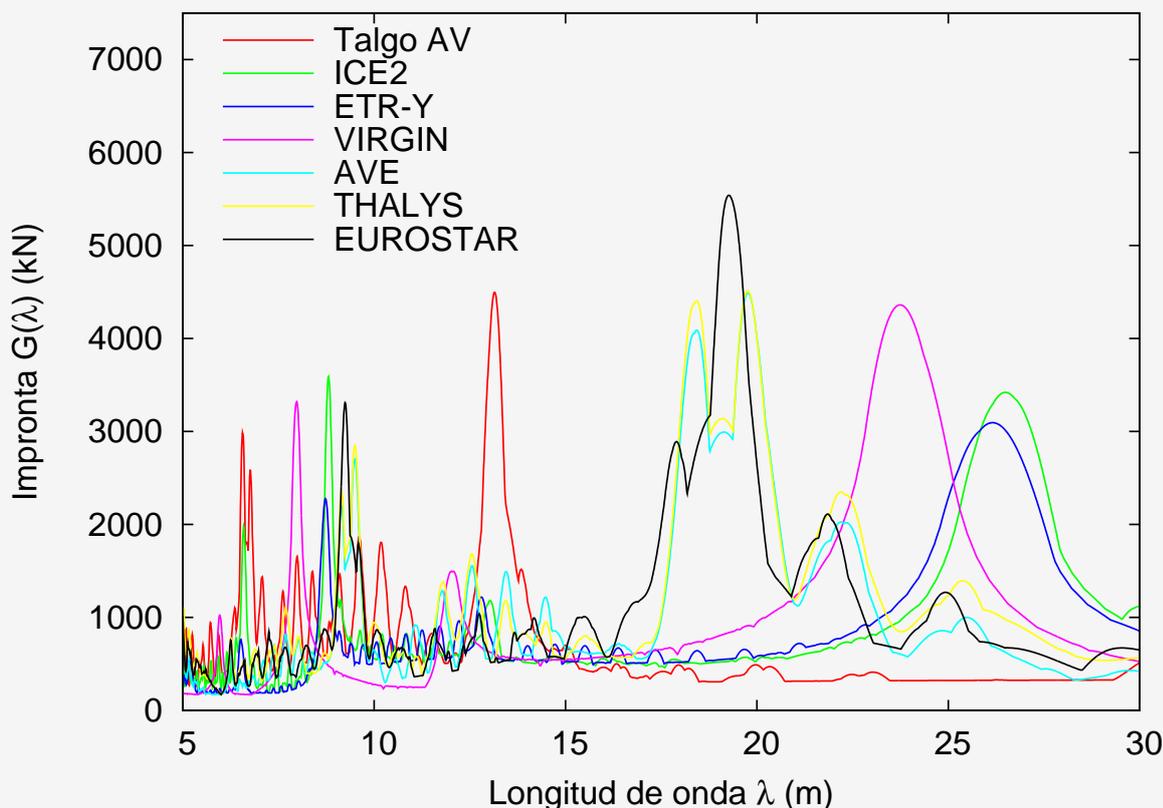
## Conceptos

$A(K)$ : Línea de Influencia Dinámica del **puente**

$G(\lambda)$ : Impronta Dinámica del **tren**



# Improntas dinámicas de trenes de alta velocidad



# Trenes de Carga Universales de Alta Velocidad HSLM-A

- ♠ Familia de 10 trenes articulados (ficticios), que proporcionan una *envolvente* de los efectos dinámicos de los trenes reales de alta velocidad:

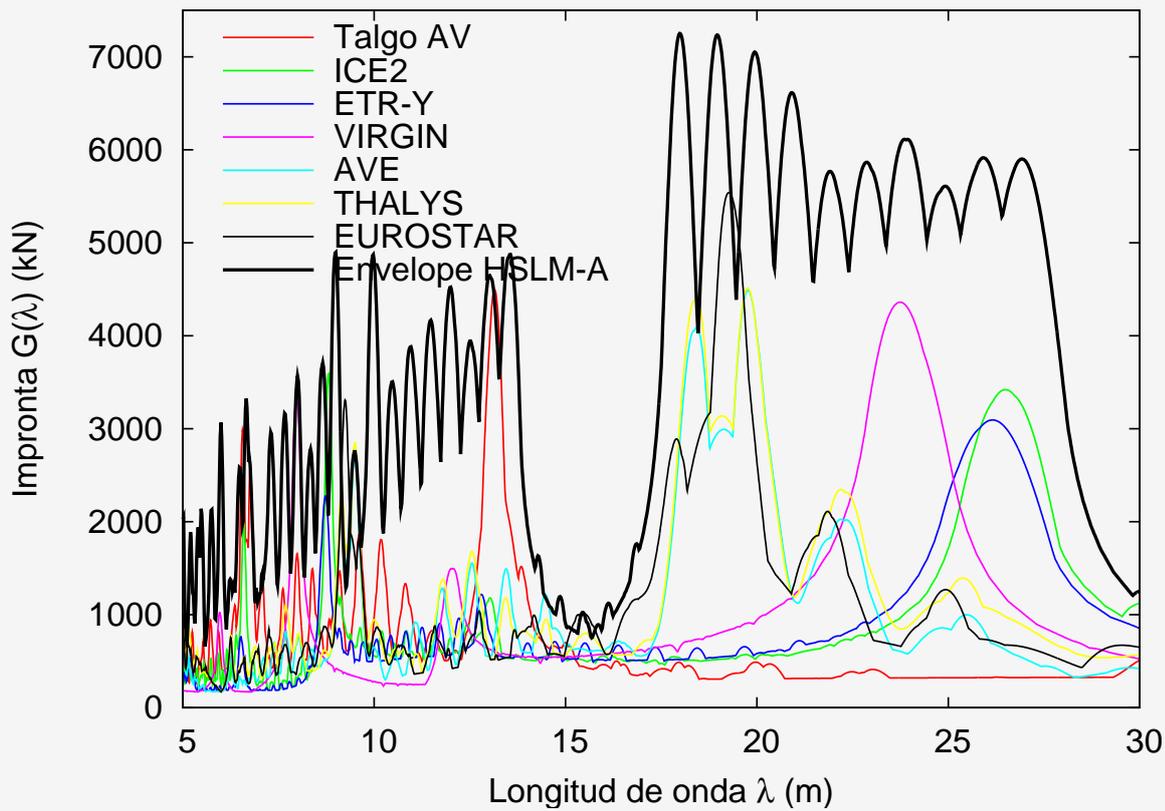
Parámetro	HSLM-A
tipo	articulado
Longitud total	≈ 400 m
Longitud coche <i>D</i>	18 m – 27 m
Carga del eje	170 kN – 210 kN
Espaciamiento de bogie <i>d</i>	2.0 m – 3.5 m
Locomotoras delantera y trasera	sí

*Características de trenes universales HSLM-A. (D214.2RP1, EN-1991-2, IAPF-03)*

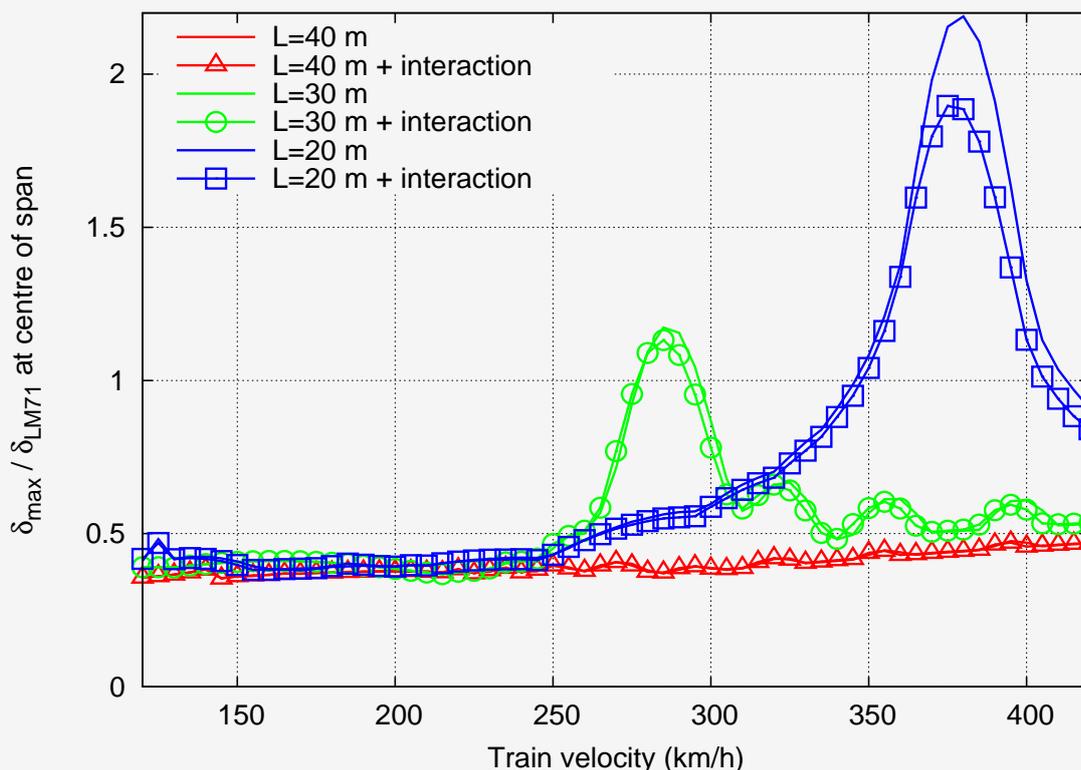
- ♠ Permite **interoperabilidad** de líneas de alta velocidad en Europa



# Envolvente Obtenida con Trenes HSLM-A

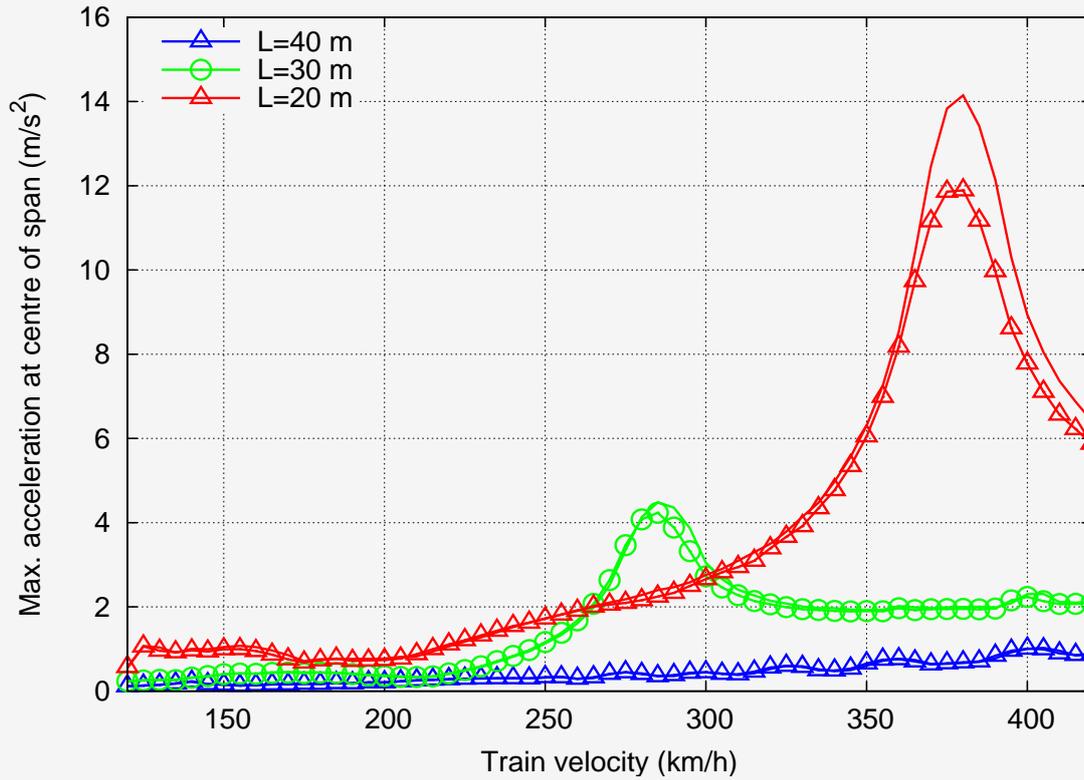


# Respuesta dinámica de puentes de distinta Luz



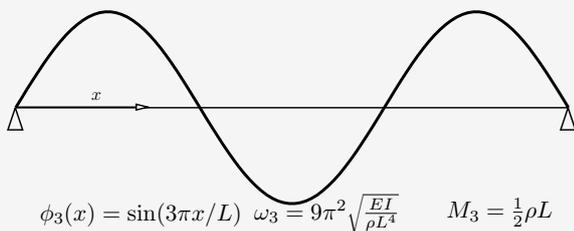
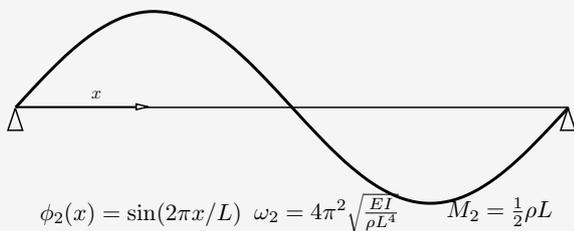
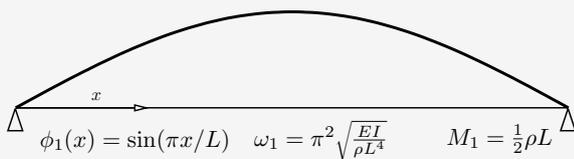
## Tren ICE2, flecha dinámica en centro de vano

# Respuesta dinámica de puentes de distinta Luz

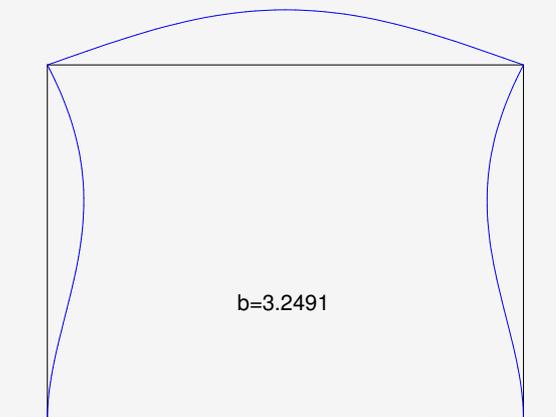


Tren ICE2, aceleración en centro de vano

# Estructuras Isostáticas / Hiperestáticas



Viga simplemente apoyada

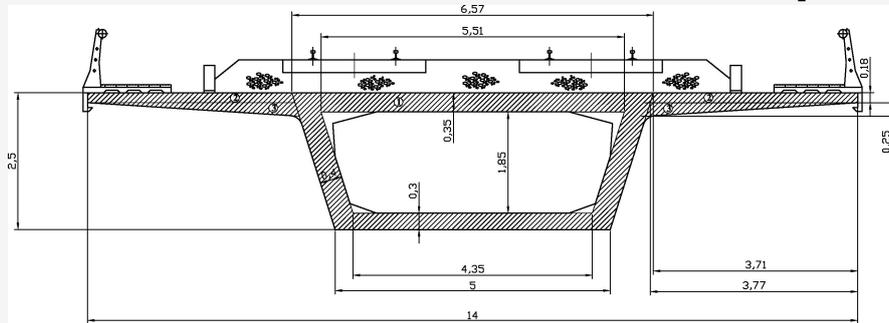


Pórtico para paso inferior



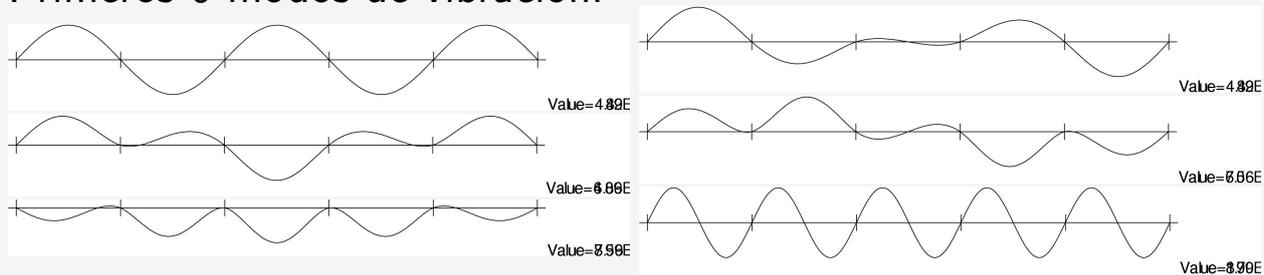
# Puentes de Tablero Continuo

Viaducto de *Arroyo del Salado*, tablero continuo, 30 vanos de 30 m, Cajón de hormigón pretensado in-situ [PFC, B. Sanz, 2005].

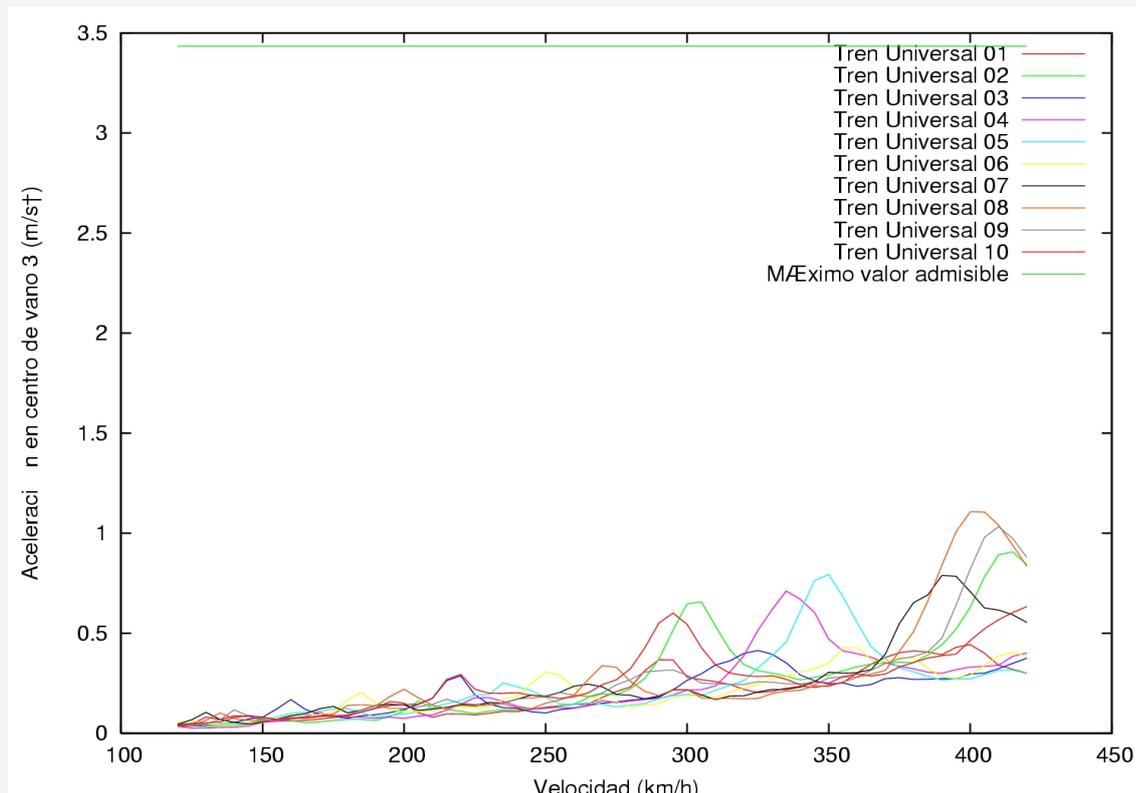


$$\frac{\text{canto}}{\text{luz}} = \frac{1}{12}$$

Primeros 6 modos de vibración:



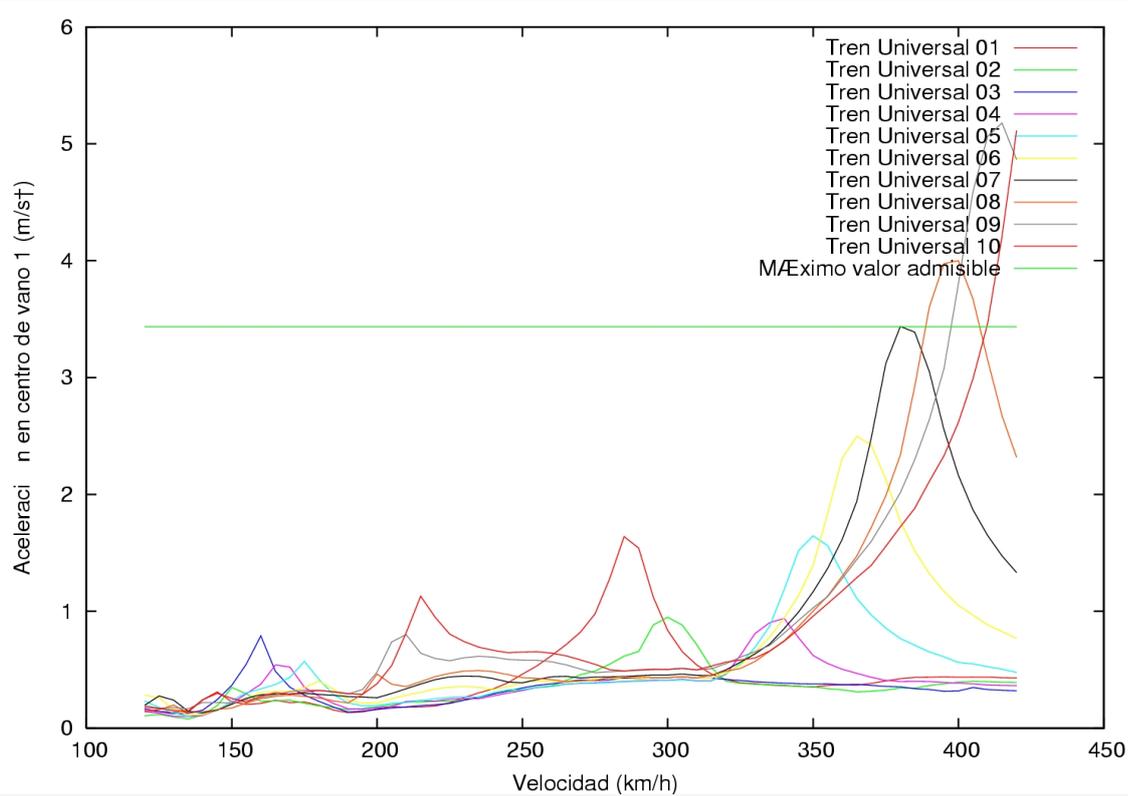
# Tablero Continuo (5 vanos): Aceleración Máxima



Satisface todos los criterios dinámicos



# Tablero Simplemente Apoyado: Aceleración Máxima



No satisface el criterio  $a_{max} \leq 3,5 \text{ m/s}^2$



# Hormigón Prefabricado: Viaducto «Río Moros» (PRAINSA)



## Características

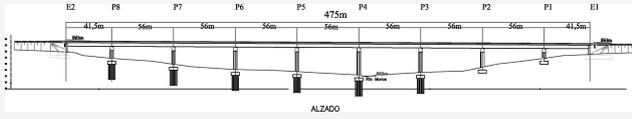
- Sección variable, pretensado
- Tablero Continuo



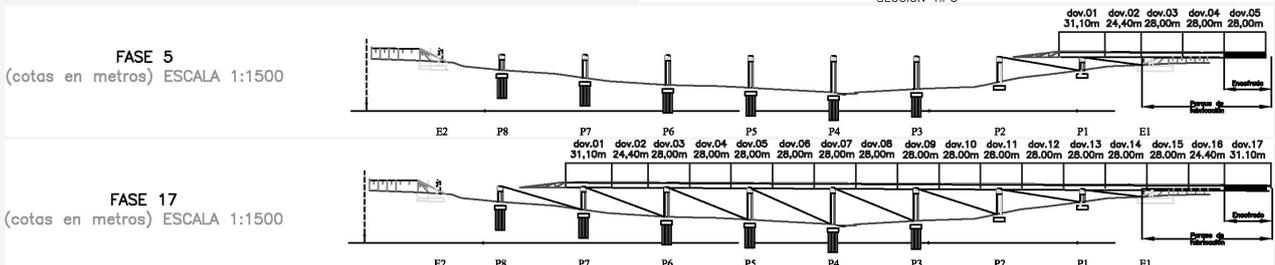
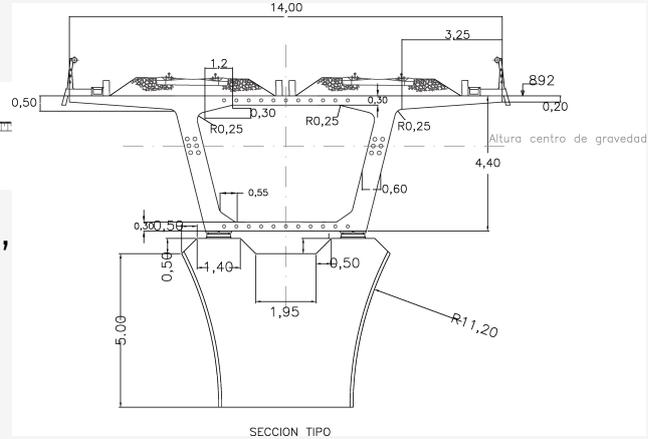
Algunas aplicaciones

# Tablero Cajón de Hormigón Pretensado; *empujado*

[F. Ruano, Río Moros, PFC 2005]

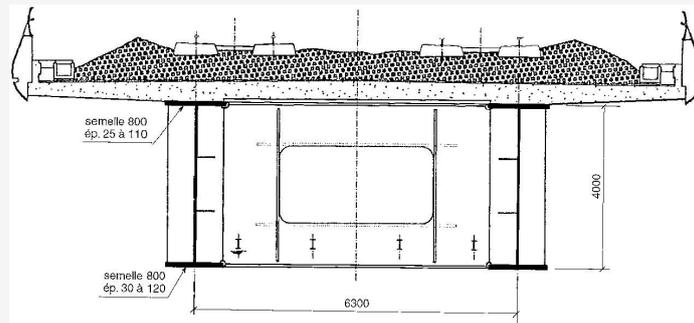


Longitud 475 m, Luces  $L = 56$  m,  
 canto  $\frac{1}{\text{luz}} = \frac{1}{12,7}$

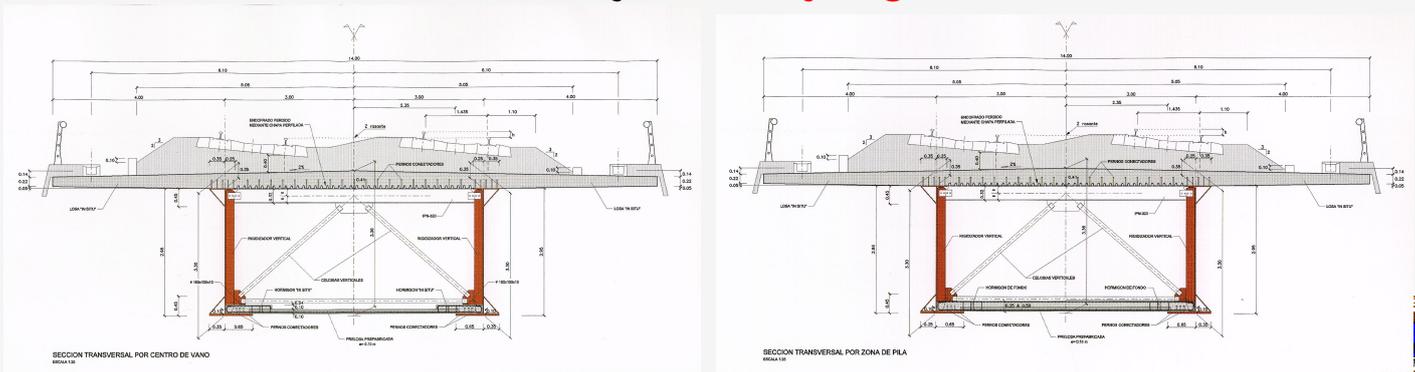


Algunas aplicaciones

# Viaducto «Las Piedras» (F. Millanes, 2004)



Sección abierta bijácena, **baja rigidez torsional**



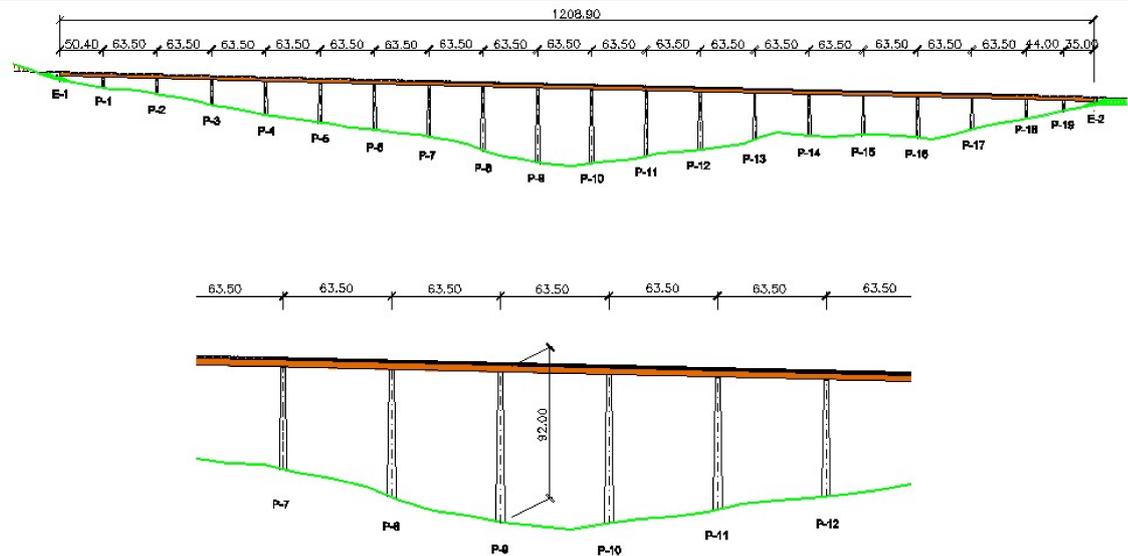
Sección parcialmente Cerrada, **rigidez torsional mayor**



Algunas aplicaciones

# Viaducto «Las Piedras» (II)

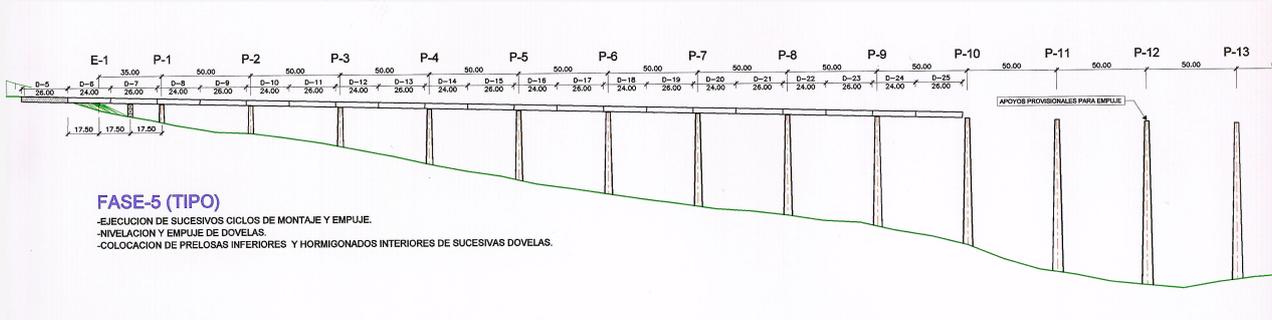
Longitud 1208,5m, luces  $L = 63,5$  m,  $d/L = 1/15$ , pilas  $h = 92$  m



Algunas aplicaciones

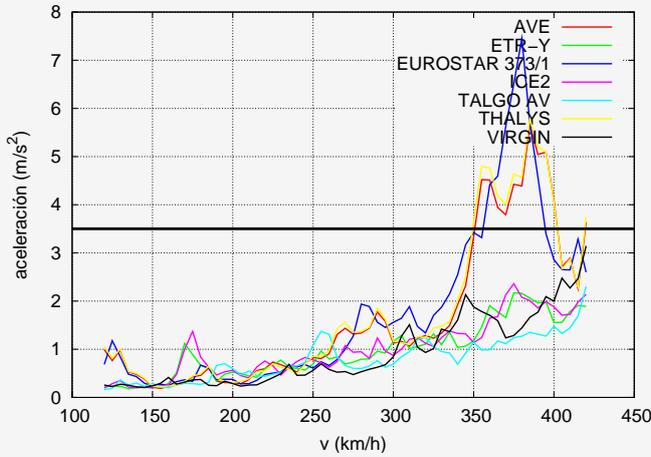
# Viaducto «Las Piedras» (II)

Construcción empujando sección de acero:

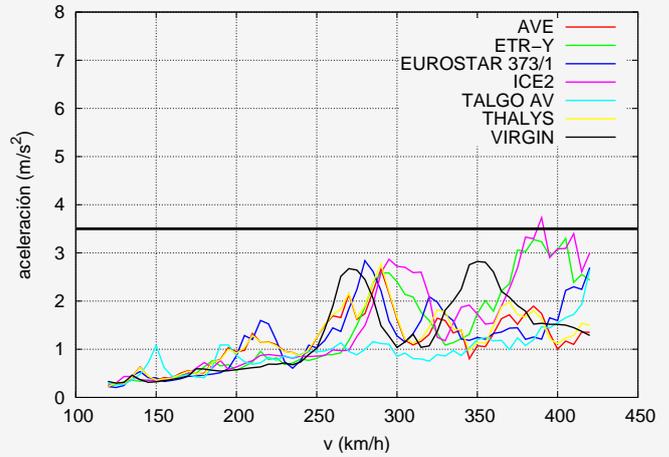


# Viaducto «Las Piedras». Envoltantes de aceleraciones

Aceleración vertical máxima, incluyendo flexión y torsión, en la mitad del vano lateral



Sección bijácena abierta

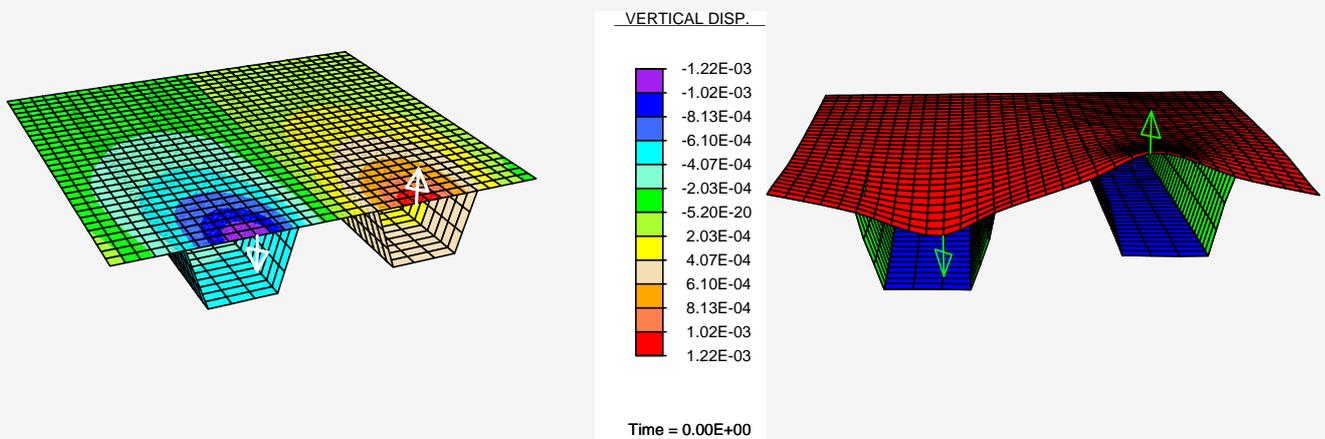


Sección bijácena semicerrada

Sección abierta: **NO aceptable**  
 Sección semicerrada: **aceptable**



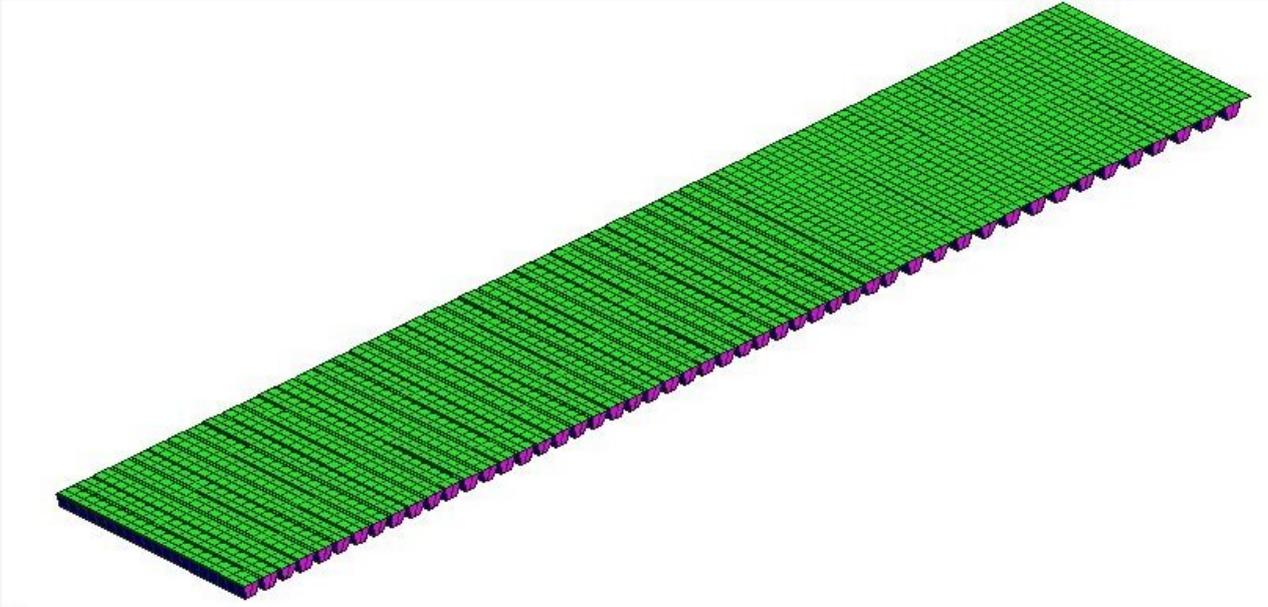
# Modelos 3D de Elementos Finitos



Viaducto (prefabricado) sobre río Milanillos (Madrid–Valladolid, PRAINSA)



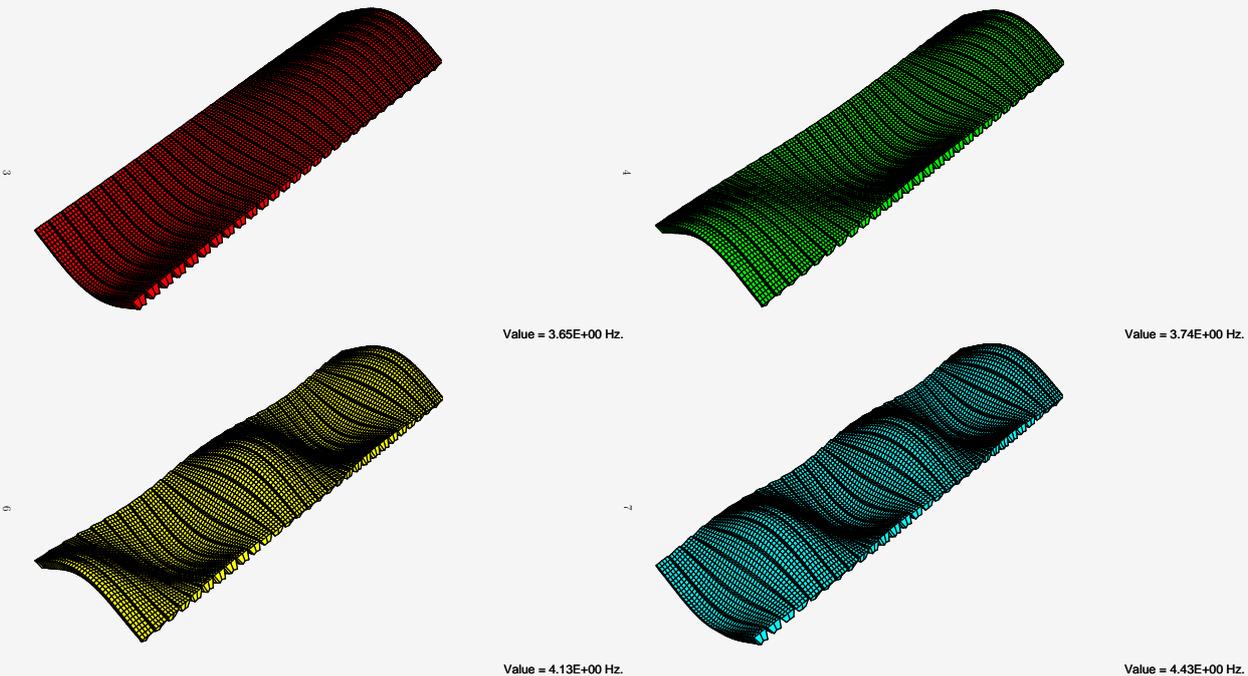
# Puente tipo pérgola: malla 3D



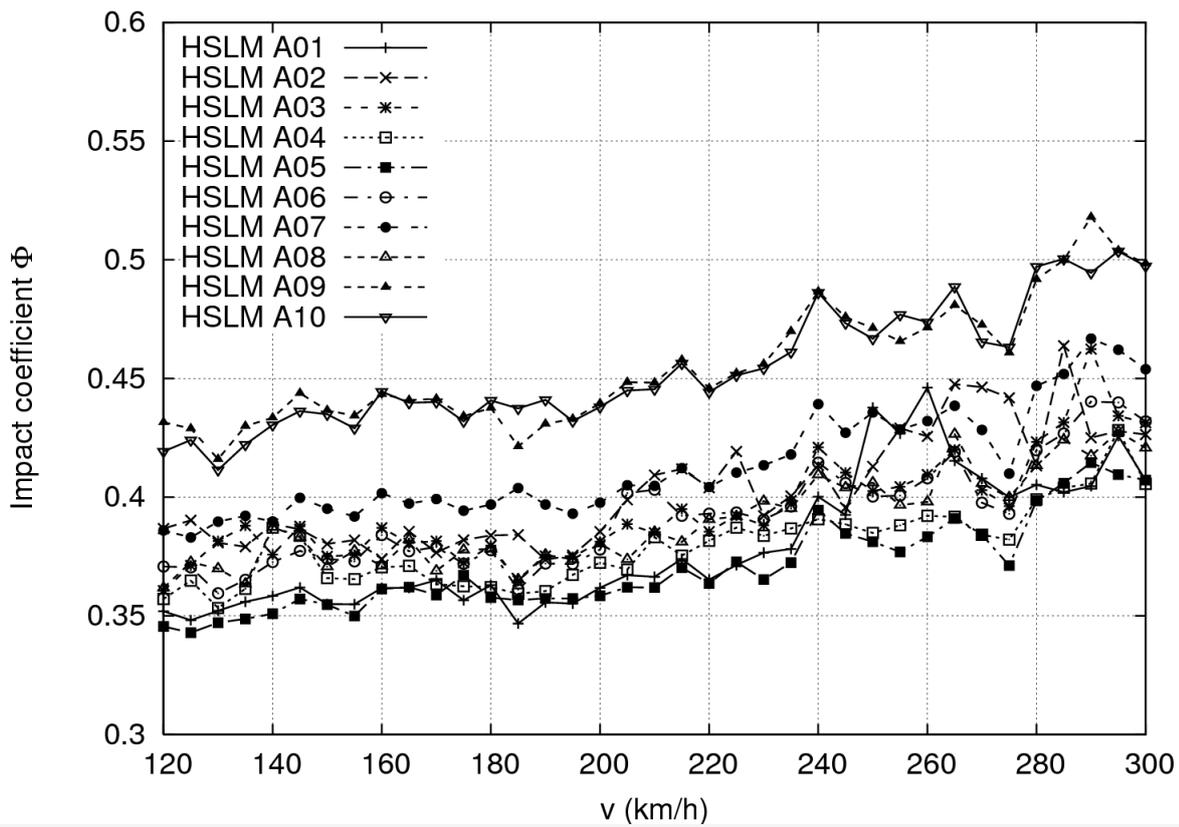
- Madrid–Valencia, Proyecto y elementos prefabricados (PRAINSA)
- Apoyo en estribos con gran esviaje: funcionamiento 3D



# Puente tipo pérgola: modos 2,3,5,6



# Puente tipo pérgola: coeficiente de impacto $\Phi$



## Observaciones Finales

- Necesidad de cálculo dinámico. Criterios de diseño.
- Aspectos abiertos en los que se necesitan criterios de proyecto:
  - Puentes de luz corta, Pórticos y marcos
  - Puentes de gran luz y estructuras especiales
  - Flexibilidad lateral viaductos ( $f_0 > 1,2$  Hz)
  - Limitaciones longitud tablero por interacción vía–tablero
  - Vía en placa / sobre balasto
  - Estabilidad a largo plazo de apoyos y otros elementos

