

Acciones dinámicas debidas al tráfico ferroviario en viaductos de alta velocidad

Efectos dinámicos, cálculo, normativa e investigación reciente

José M.^a Goicolea

jose.goicolea@upm.es (<http://www.mecanica.upm.es>)
Escuela de Ingenieros de Caminos,
Universidad Politécnica de Madrid

Seminarios Torroja, Madrid 3 feb 2011





Viaducto Landwasser. Línea Albula-Bernina



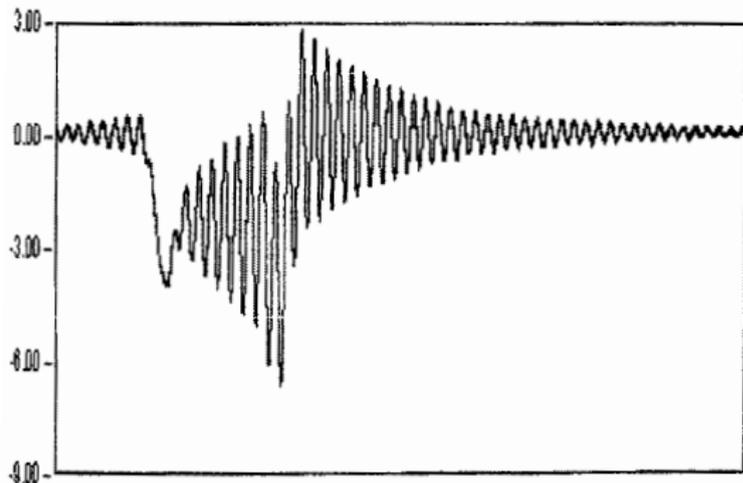


de puente (Italia, 2005, por riada)

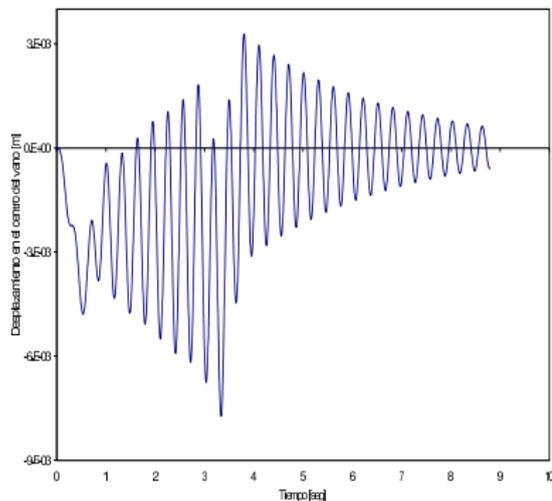


Mediciones experimentales: Viaducto del Tajo

AVE 100, composición simple, $v = 219$ km/h



Desplazamientos medidos [mfom 96]



Desplazamientos calculados [Domínguez 99]

Alta Velocidad en China

铁道部宣布 京沪高速铁路2010年投入运营

铁道部4月3日宣布,中国第一条具有世界先进水平的高速铁路——京沪高速铁路预计今年开工建设,并将于2010年投入运营。

京沪高速铁路

正线全长	约1318公里
设计时速	350公里
初期运营时速	300公里
共设站	21个客运车站

✓ 全程运行时间 5小时
年单向输送旅客 8000余万人

✓ 建设京沪高铁70%以上的技术均依靠自主创新

京沪高速铁路线路示意图
总长: 1318公里
设计时速: 350公里/小时
初期运营时速: 300公里/小时
共设站: 21个客运车站



Beijing – Shanghai: 1318 km, 400 km/h, 240 trenes/día,
86 % viaductos

Tren CRH380: 486 km/h



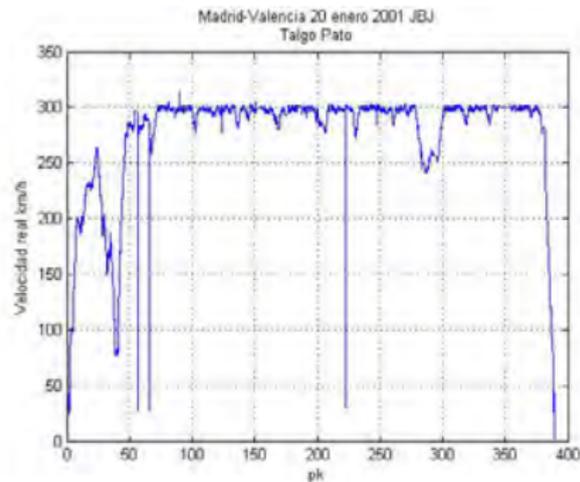
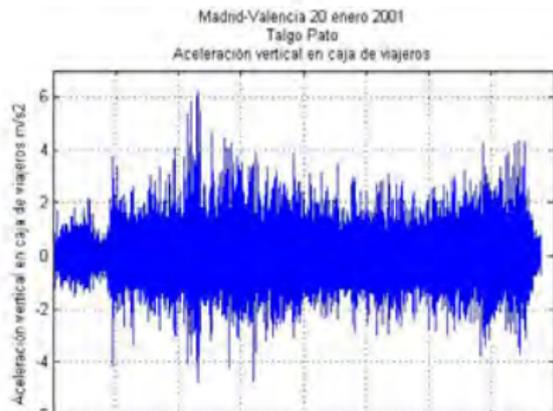
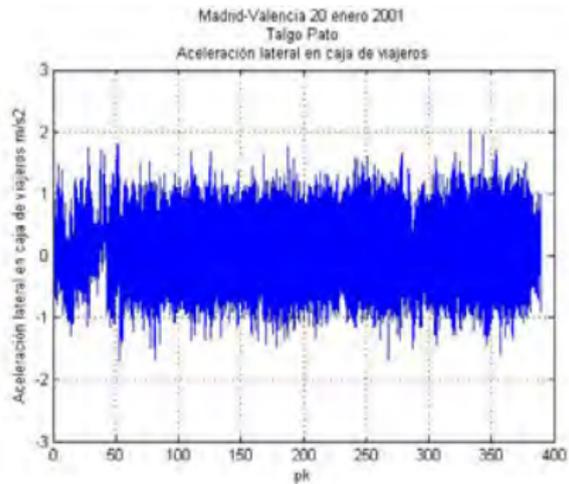


Vía en placa – losas prefabricadas



Puente sobre Yangtze en Nanjing
300 km/h

Auscultación Madrid-Valencia 20 ene 2011



Velocidad





Beijing–Tianjin 350 km/h



Viaducto de Las Piedras.
Córdoba–Málaga

- 1 Motivación
- 2 Respuesta Dinámica y Modelos de Cálculo
 - Cargas de tráfico
 - Comprobaciones y Modelos
- 3 Normativa Reciente
 - Trenes reales, HSLM y trenes tipo
 - Eurocódigos EN1991-2, EN1990/A1
 - Interoperabilidad en la Red TransEuropea: ETI-INF
 - Instrucción Española IAPF-2007 y Anejos Nacionales
- 4 Investigación sobre dinámica de estructuras y tráfico ferroviario
 - Dinámica transversal de vehículos ferroviarios sobre viaductos
- 5 Comentarios Finales

- 1 Motivación
- 2 Respuesta Dinámica y Modelos de Cálculo
 - Cargas de tráfico
 - Comprobaciones y Modelos
- 3 Normativa Reciente
 - Trenes reales, HSLM y trenes tipo
 - Eurocódigos EN1991-2, EN1990/A1
 - Interoperabilidad en la Red TransEuropea: ETI-INF
 - Instrucción Española IAPF-2007 y Anejos Nacionales
- 4 Investigación sobre dinámica de estructuras y tráfico ferroviario
 - Dinámica transversal de vehículos ferroviarios sobre viaductos
- 5 Comentarios Finales

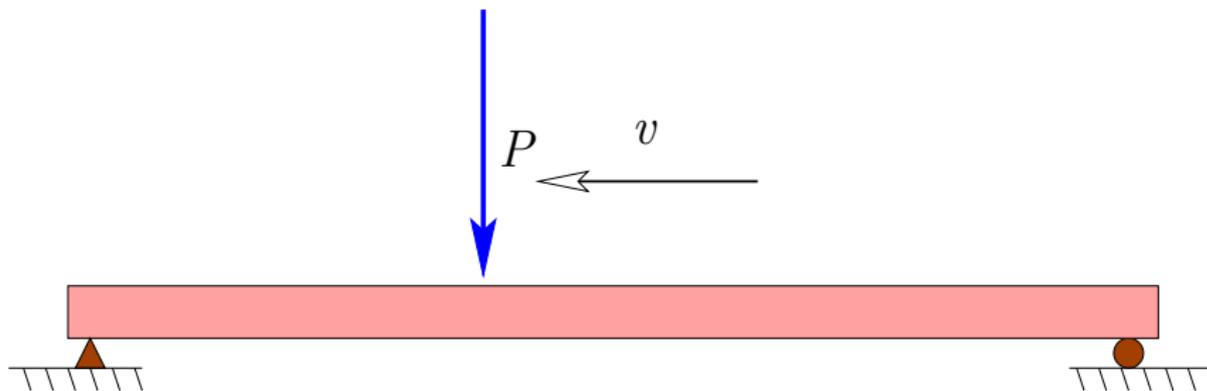
Aspectos a considerar en puentes AV debidos al tráfico

- **Cargas mayores** que carretera \Rightarrow puentes menos esbeltos
- Envolventes estáticas: **UIC71 + SW/0 (LM71)**
- Envolventes dinámicas: **HSLM**
- Tipos de tráfico: pasajeros, mercancías; locomotoras; transportes especiales
- Nuevos **automotores EMU** de pasajeros: ejes de 20 t a 200 km/h
- **Actualización de puentes existentes**: Categorías de línea EN15528 (D4, E5, ...)
- \Rightarrow **Modelos de cargas; valores de α ; tráfico real**

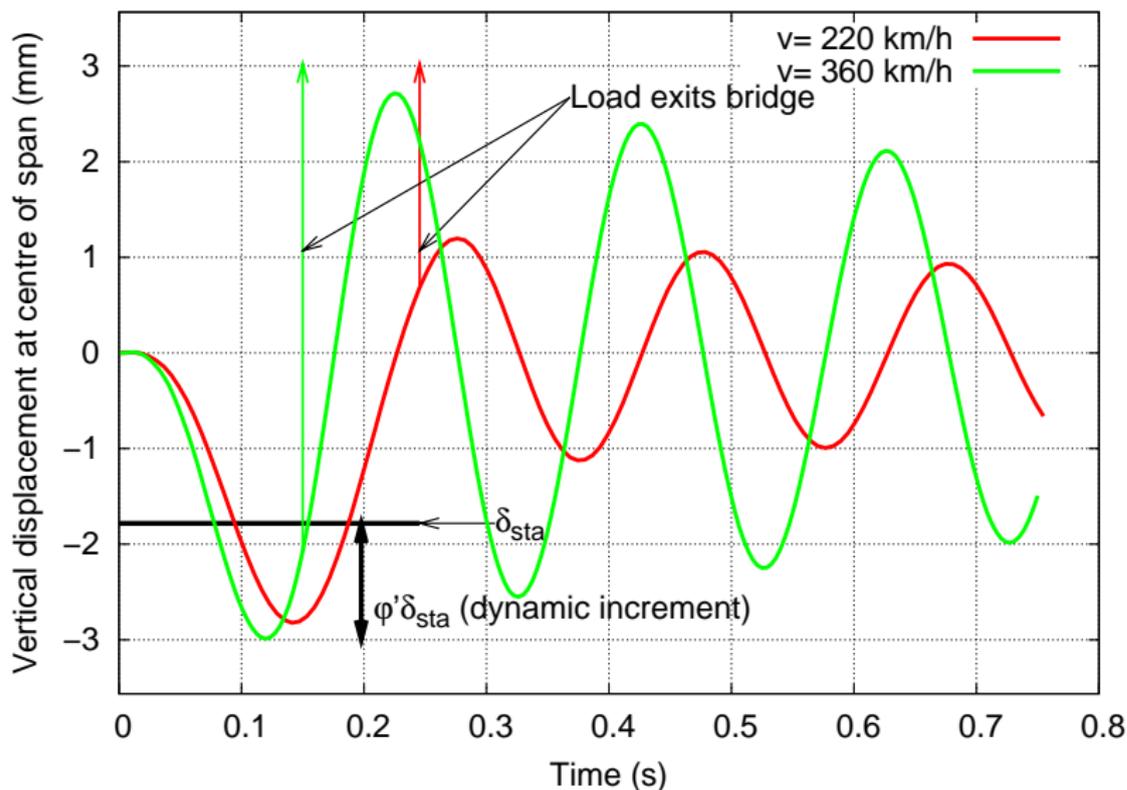


Factor de impacto y resonancia

Carga móvil sobre puente



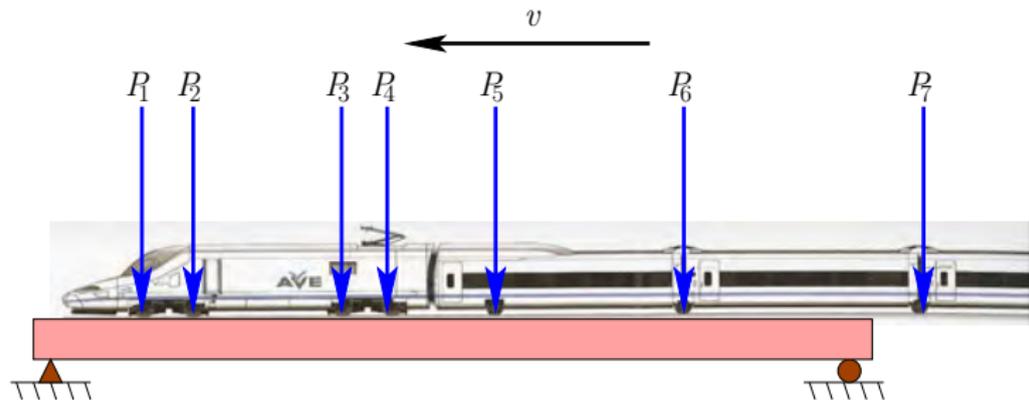
Efecto dinámico de carga móvil: $(1 + \varphi')\delta_{sta}$



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



Efecto dinámico de un tren de cargas

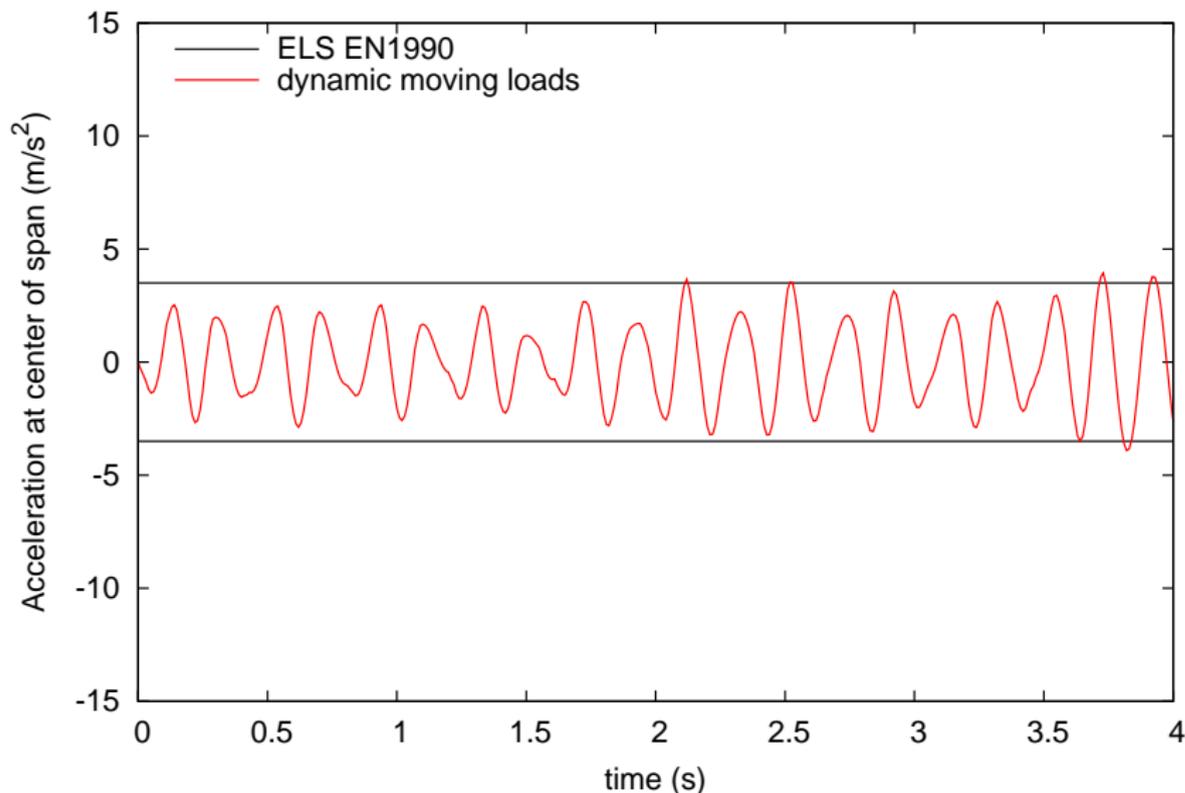


(Tren Talgo de Alta Velocidad)



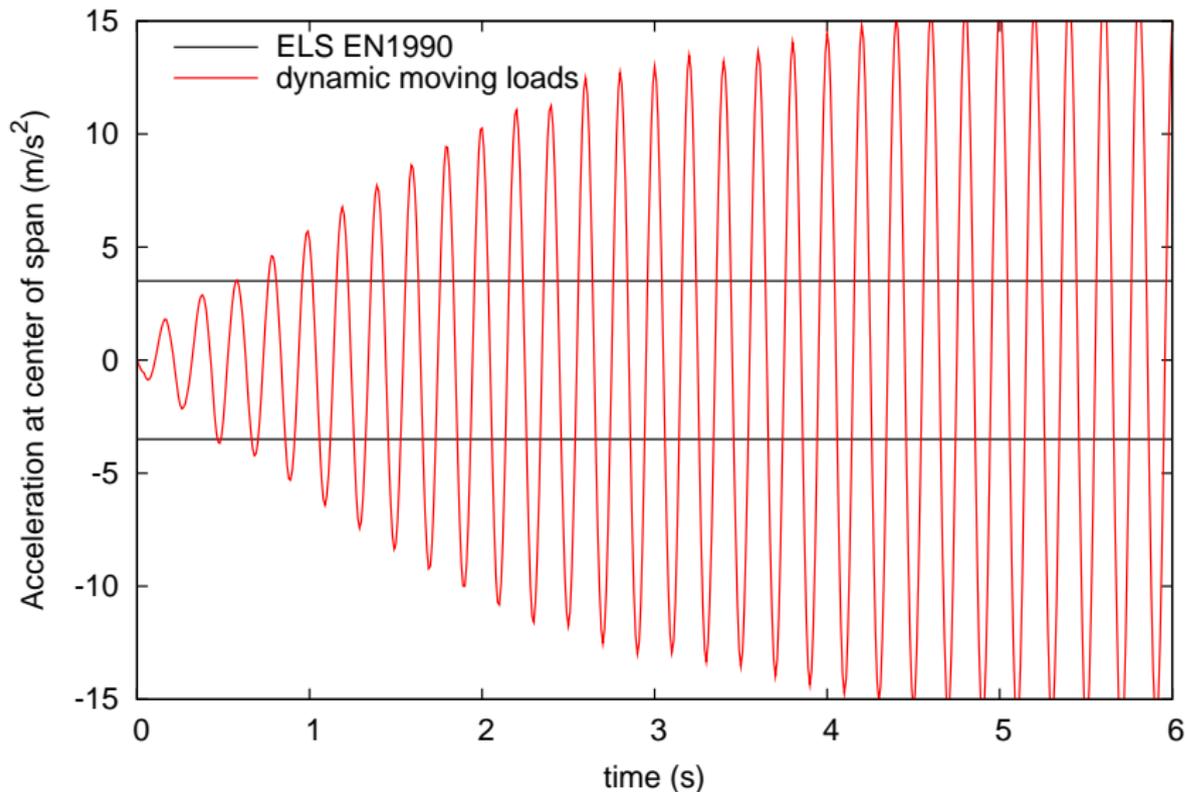
Historia temporal de aceleraciones: $v = 360 \text{ km/h}$

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



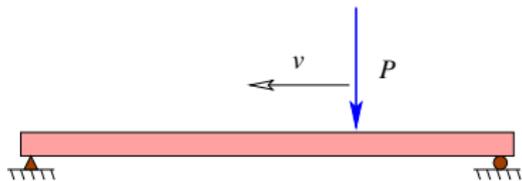
Historia de aceleraciones para $v = 236.5$ km/h ¡resonancia!

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



Ejemplo de aplicación

Coficiente de impacto Φ



Puente isostático ERRI $L = 15$ m, $E = 210$ GPa, $I = 0.03664$, $f_0 = 5$ Hz. $v = 220$ km/h

Cálculo de coeficiente de impacto

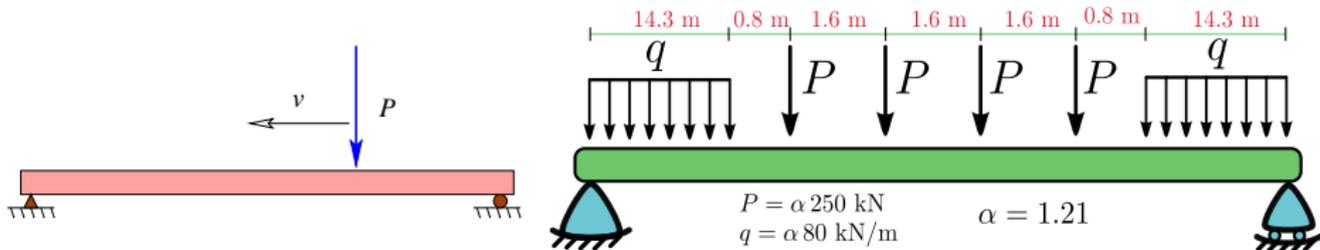
- Coeficiente de impacto envolvente

$$\Phi = \frac{1.44}{\sqrt{L_\phi} - 0.2} + 0.82 \Rightarrow \Phi = 1.212$$



Ejemplo de aplicación

Coficiente de impacto Φ



Cálculo de coeficiente de impacto

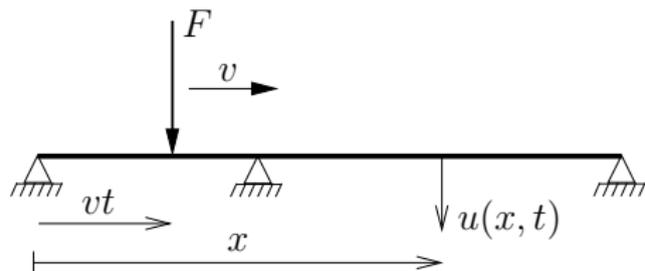
- Coeficiente de impacto para carga real: $1 + \varphi' = 1 + 0.657$,
Cálculo dinámico: $1 + \varphi'_{\text{dyn. anal.}} = 1.5843 < 1.657$

$$1 + \varphi' + 0.5\varphi'' = 1.657 + 0.5 \times 0.0412 = 1.678 \Rightarrow \Phi_{\text{real}} = 1.678$$

$$\text{Sup. } \frac{S_{\text{est, tipo}}}{S_{\text{est, real}}} = \frac{1}{3}, \Phi_{\text{real}} \times \frac{1}{3} = 0.559 \Rightarrow \Phi = 1.$$



Modelos de cargas móviles: base



Ecuación dinámica de la elástica:

$$\rho \ddot{u} + (Elu'')'' = p(x, t)$$

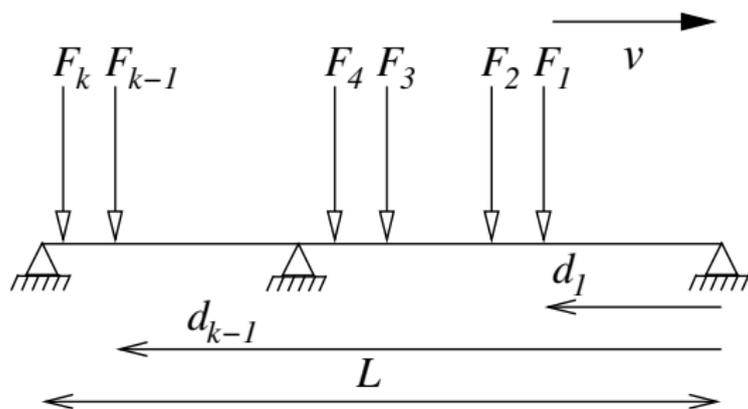
Hipótesis

- Viga de Bernouilli, recta, sin torsión (trivialmente generalizable)
- Cargas puntuales o repartidas de valor fijo

Procedimientos de solución

- Discretización (p.ej. elementos finitos) e integración directa en el tiempo del modelo completo
- Cálculo de modos normales de vibración e integración en el tiempo de los modos seleccionados
- Programas numéricos en ordenador o cálculo analítico

Modelos con cargas móviles: análisis modal



- Análisis Modal: $\rightarrow \{\omega_i, \phi_i\}$ (sólo modos $\omega_i < 30$ Hz)
- Una ecuación para cada modo $\phi_i(x)$:

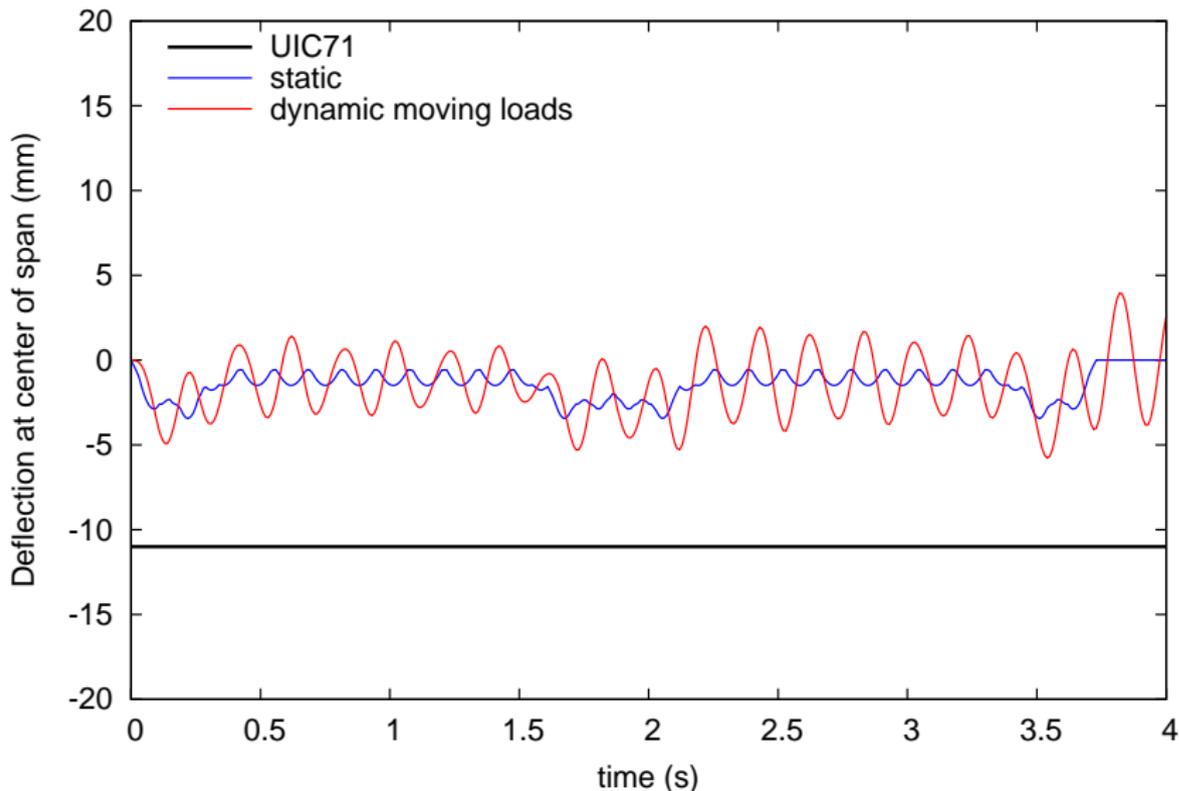
$$M_i \ddot{y}_i + 2\zeta_i \omega_i M_i \dot{y}_i + \omega_i^2 M_i y_i = \sum_{k=1}^{n_{\max}} F_k \langle \phi_i(vt - d_k) \rangle.$$

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



Modelos con cargas móviles: ejemplo

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



Impronta Dinámica ($\zeta = 0$)

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

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

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

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

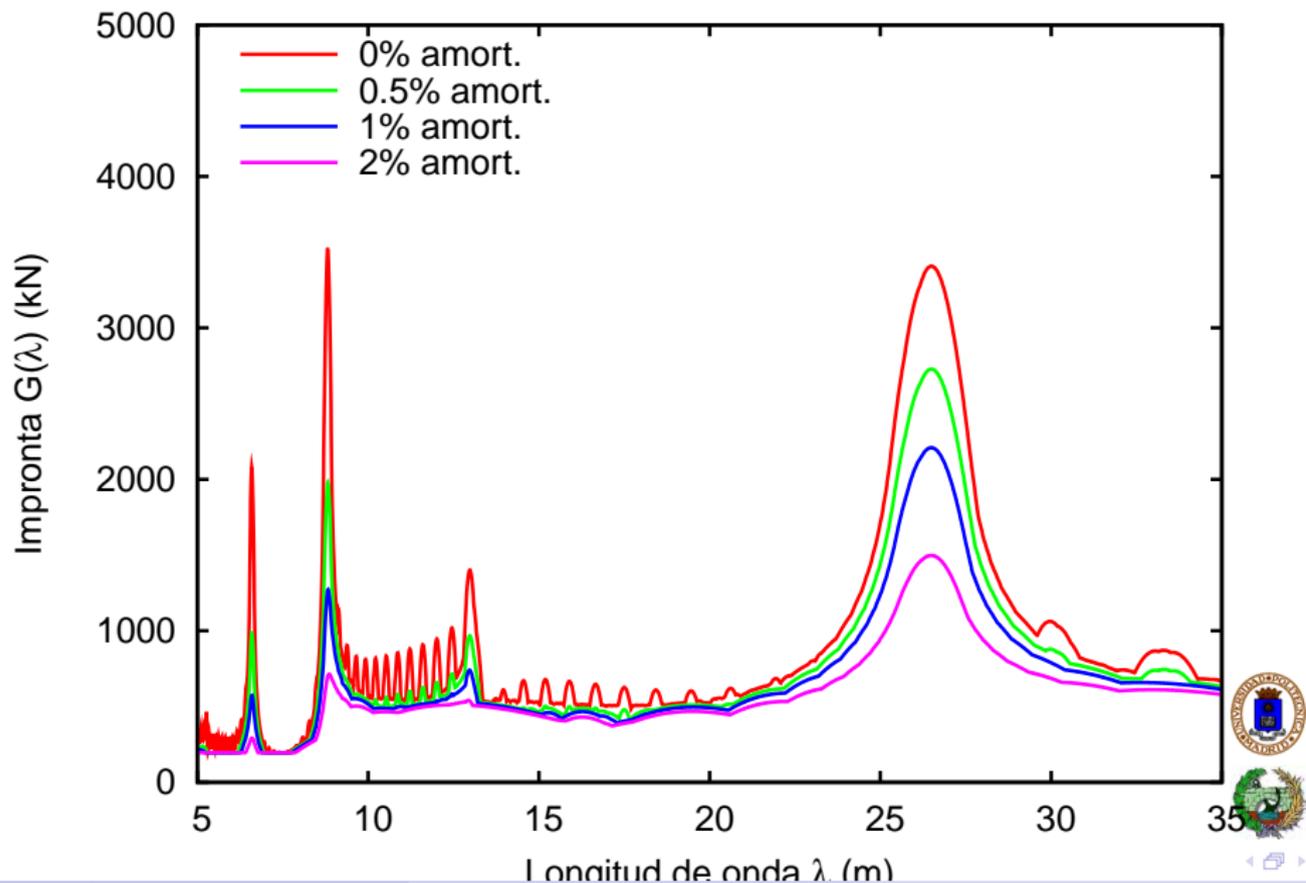
siendo $\delta_i = (x_i - x_1)/\lambda$, $i = 1 \dots N$: distancia adimensional eje i

Conceptos

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

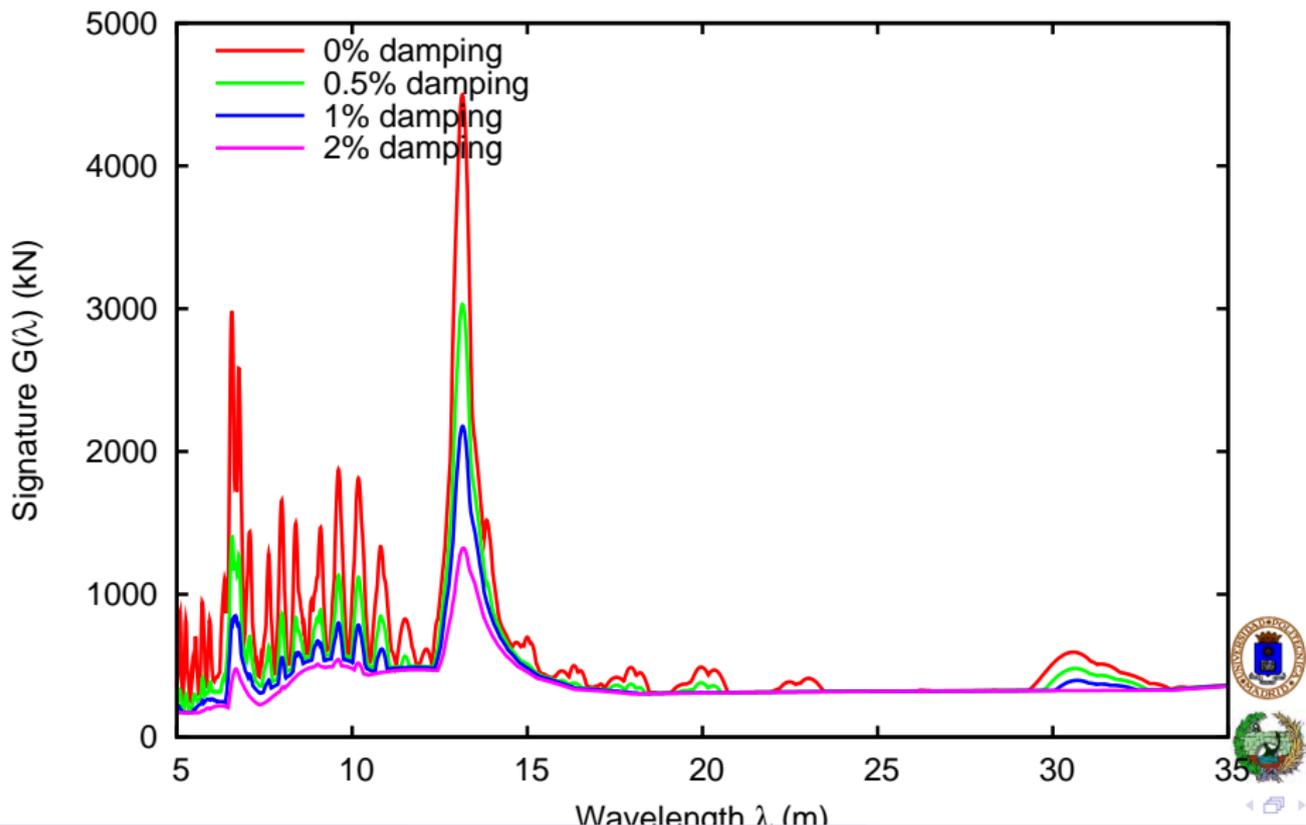
$G(\lambda)$: Impronta Dinámica del **tren**

Impronta dinámica ICE2

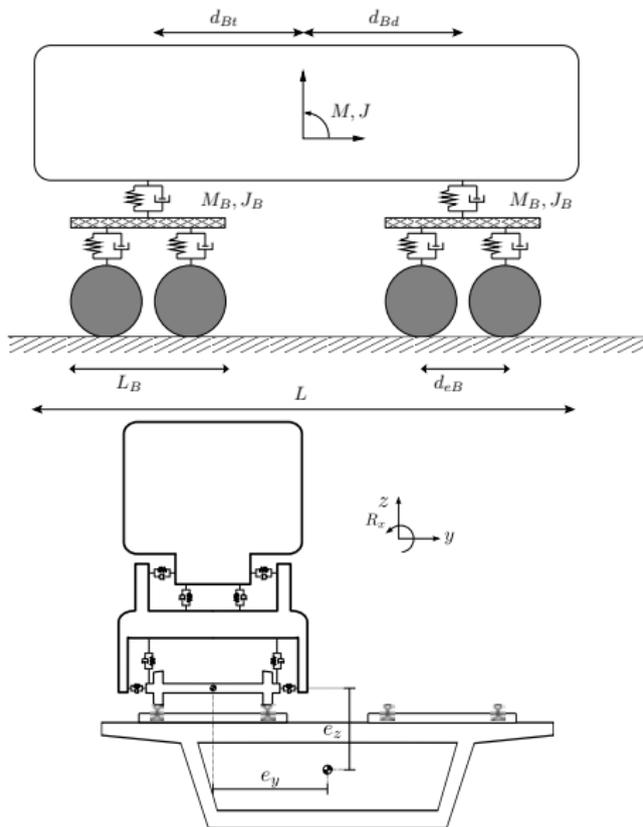


Imprenta dinámica del TALGO AV

Dynamic signature of TALGO HS train



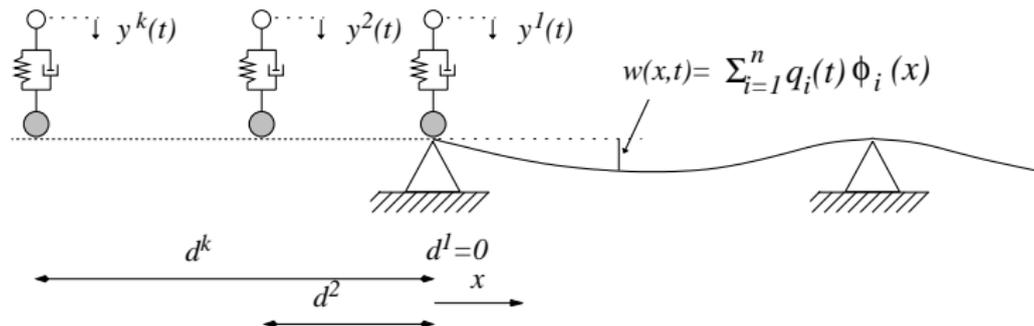
Interacción Vehículo-Estructura



- 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
- Frecuencia de susp. secundaria (caja) ≈ 1 Hz
 \Rightarrow modelos de interacción simplificados



Modelo de interacción simplificado



- Para cada modo de vibración ($i = 1 \dots n$):

$$M_i \ddot{q}_i + C_i \dot{q}_i + K_i q_i = \sum_{j=1}^k \langle \phi_i(d_{rel}^j) \rangle (g m^j + m_a^j \ddot{y}^j)$$

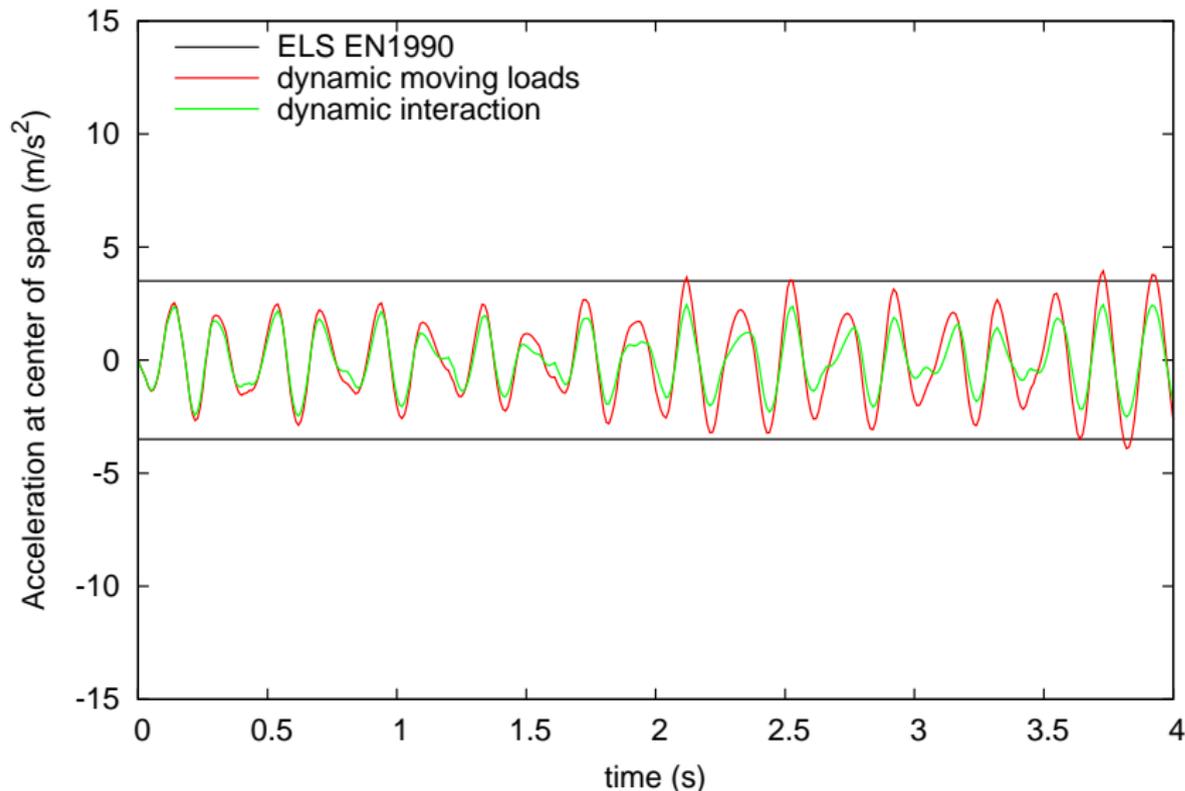
- Para cada elemento de interacción ($j = 1 \dots k$):

$$m_a^j \ddot{y}^j + k^j \left[y^j - \sum_{i=1}^n q_i \langle \phi_i(d_{rel}^j) \rangle \right] + c^j \left[\dot{y}^j - \sum_{i=1}^n \dot{q}_i \langle \phi_i(d_{rel}^j) \rangle - \sum_{i=1}^n q_i v \langle \phi_i'(d_{rel}^j) \rangle \right] = 0$$



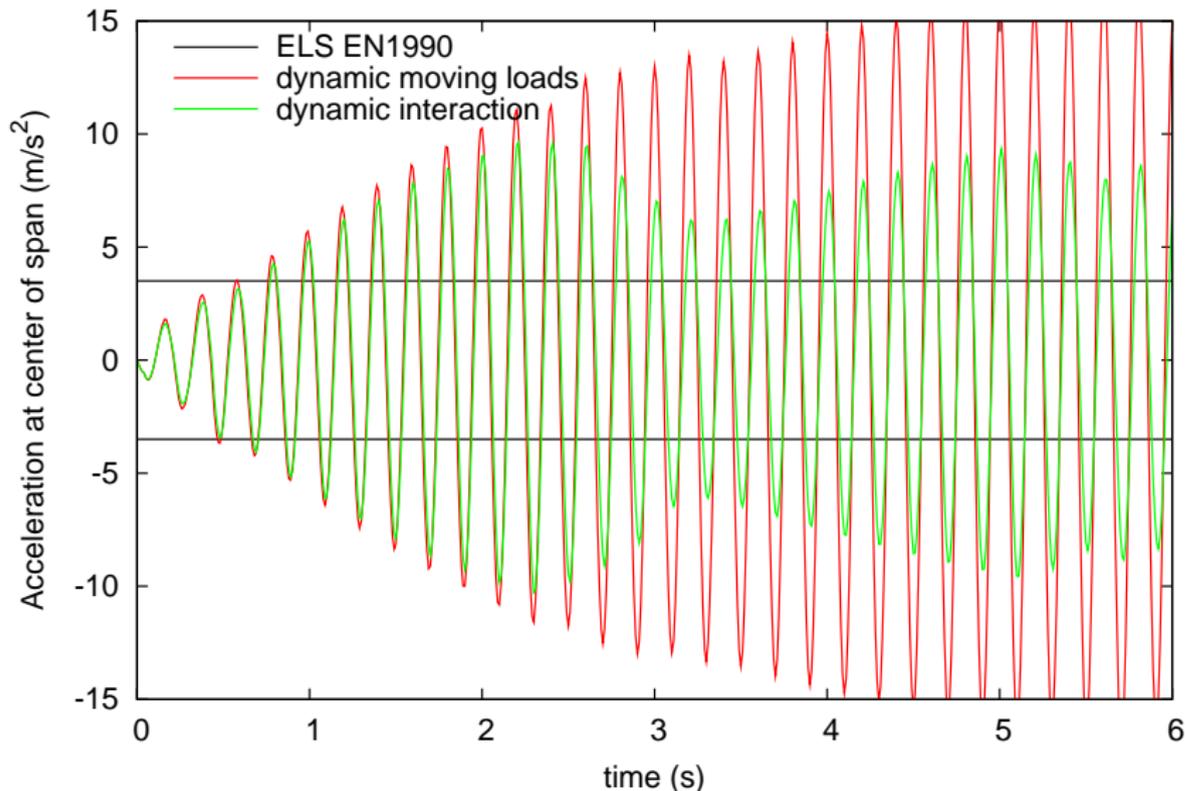
Historia temporal de aceleraciones: $v = 360 \text{ km/h}$

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

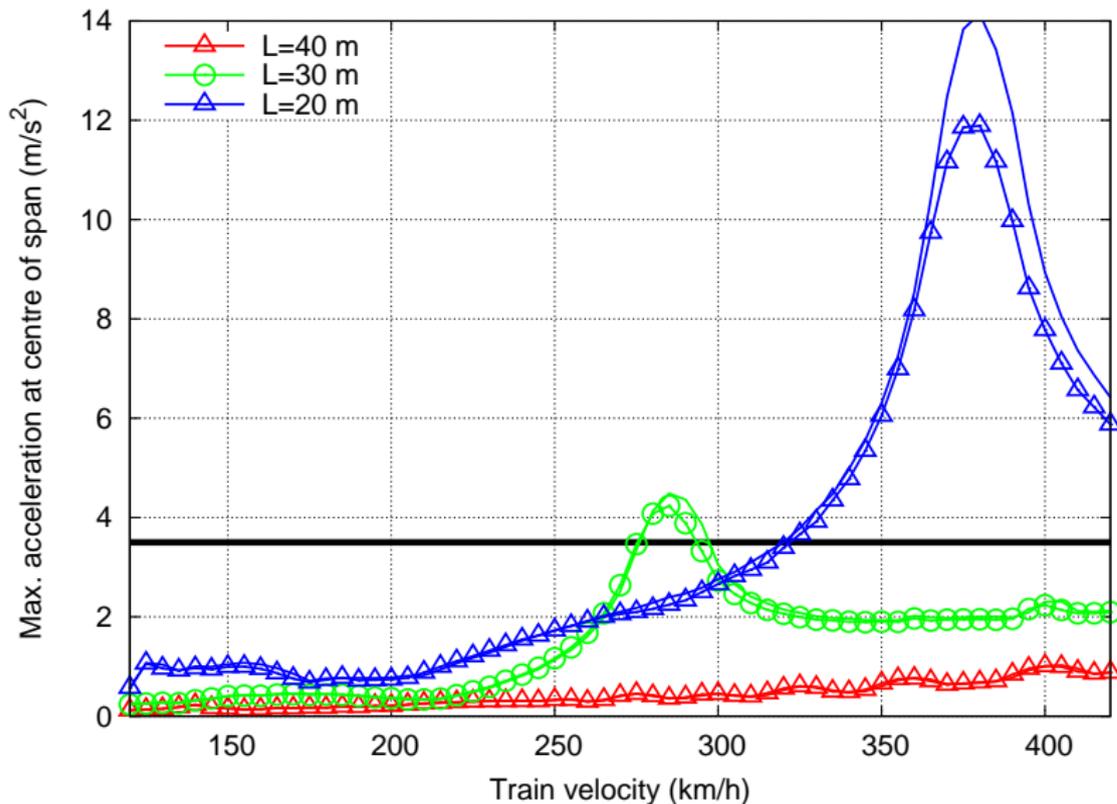


Historia de aceleraciones: $v = 236.5$ km/h **resonancia**

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



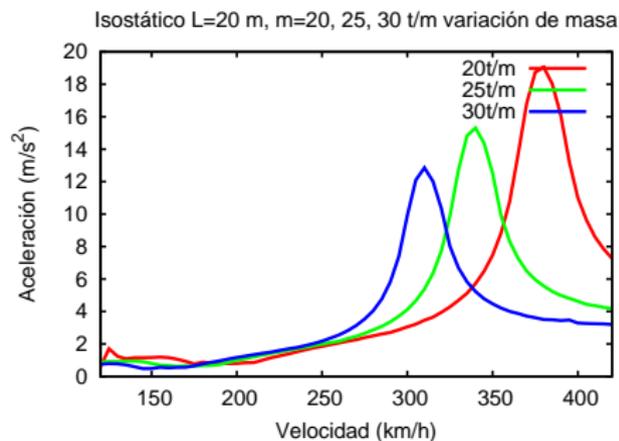
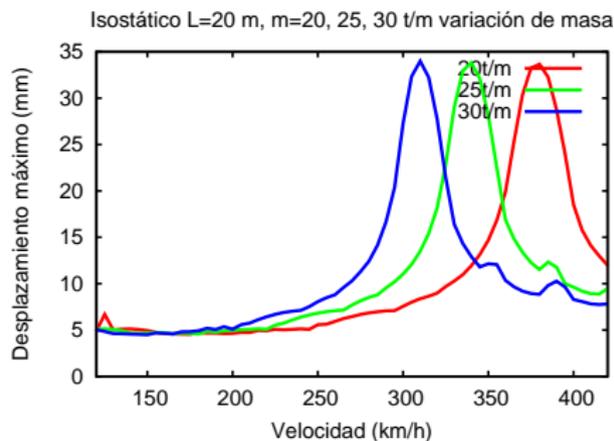
Respuesta dinámica de puentes de distinta Luz



Tren ICE2, aceleración en centro de vano



Aumento de la masa del puente



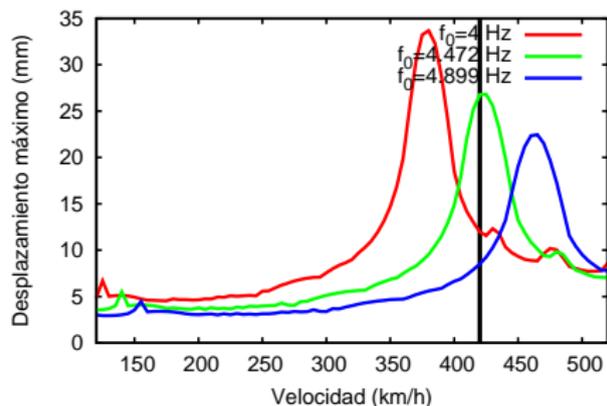
Efectos sobre respuesta resonante

- Frecuencia f_0 y velocidad crítica v_{crit} disminuyen según \sqrt{m}
- Desplazamientos máximos resonantes no varían
- Aceleraciones máximas resonantes disminuyen

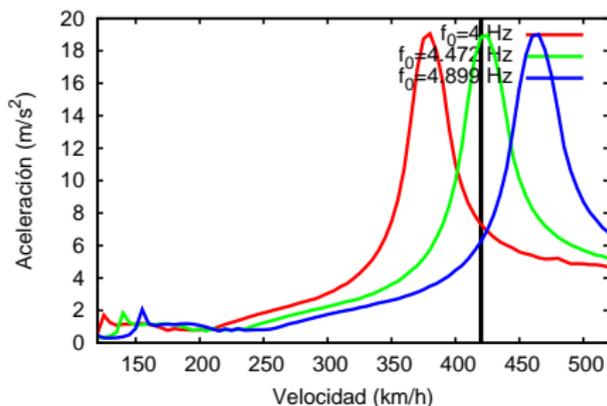


Aumento de la rigidez del puente

Isostático L=20 m, m=20 t/m variación de rigidez



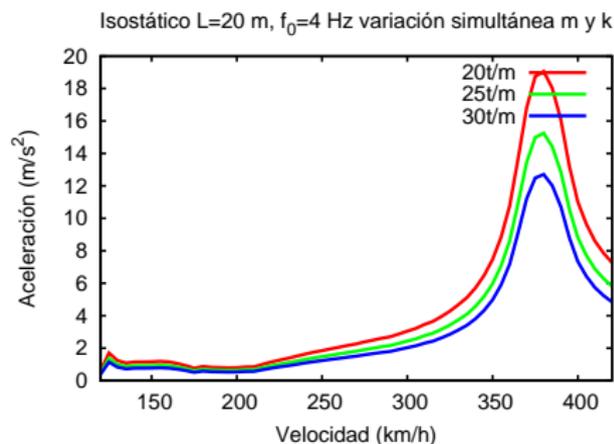
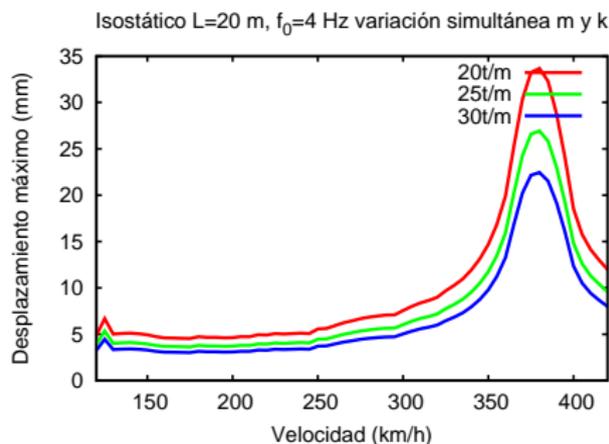
Isostático L=20 m, m=20 t/m variación de rigidez



Efectos sobre respuesta resonante

- Frecuencia f_0 y velocidad crítica v_{crit} aumentan según \sqrt{k} : "expulsa" picos resonantes del rango
- Desplazamientos máximos resonantes disminuyen
- Aceleraciones máximas resonantes no varían

Aumento proporcional de la masa y rigidez del puente



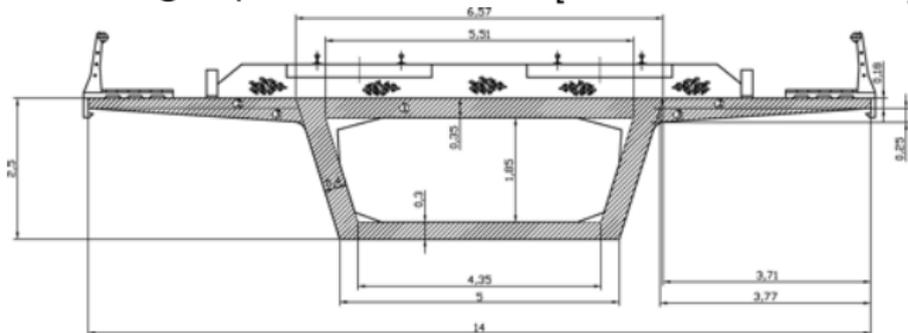
Efectos sobre respuesta resonante

- Frecuencia f_0 y velocidad crítica v_{crit} se mantienen
- Desplazamientos máximos resonantes disminuyen
- Aceleraciones máximas resonantes disminuyen



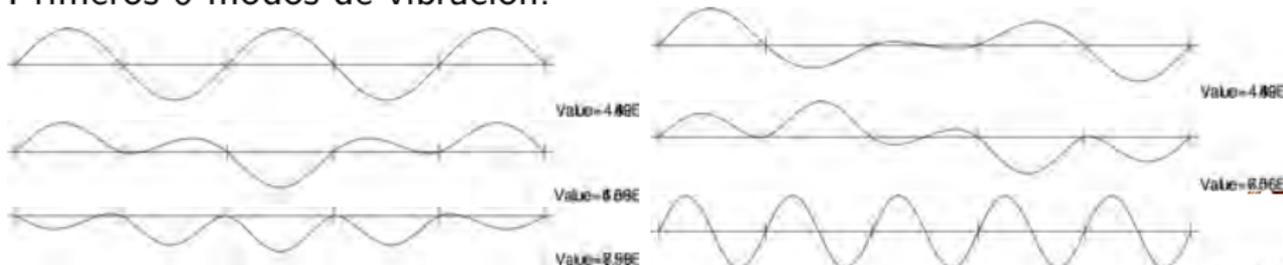
Puentes de Tablero Continuo

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



$$\frac{\text{depth}}{\text{span}} = \frac{1}{12}$$

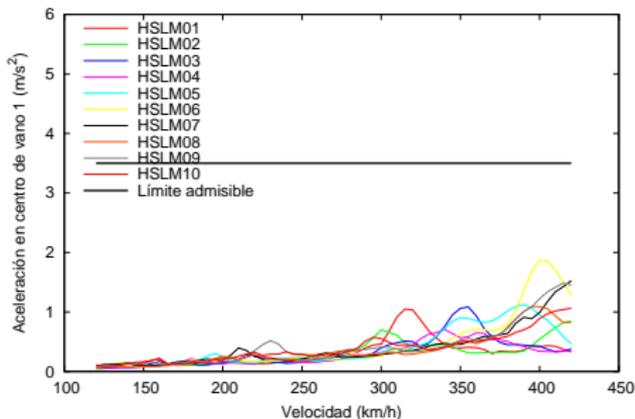
Primeros 6 modos de vibración:



Aceleraciones para tablero continuo y simplemente apoyado

Tablero continuo

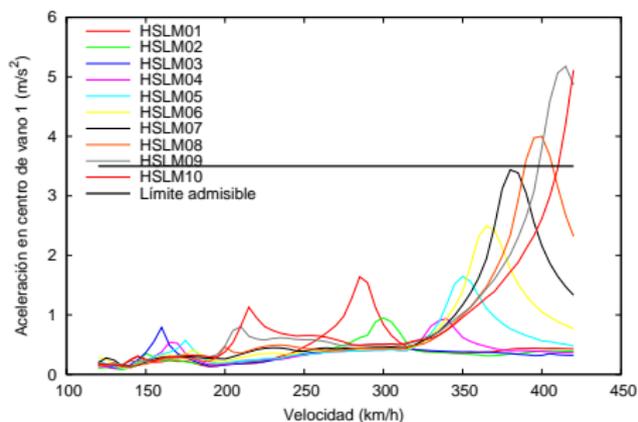
Viaducto con vanos hiperestáticos



Satisfies dynamic requirements

Simply supported

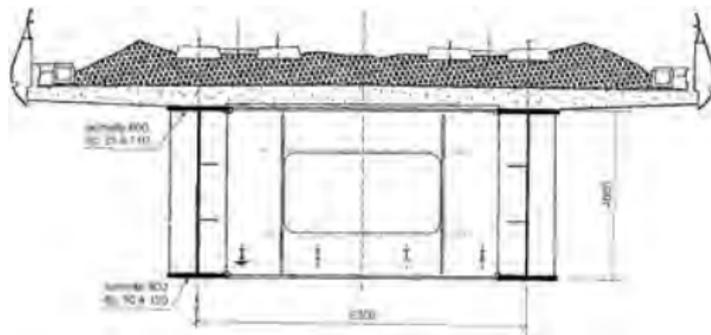
Viaducto con vanos isostáticos



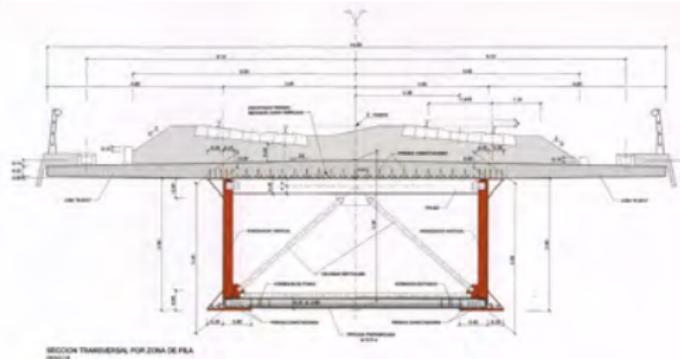
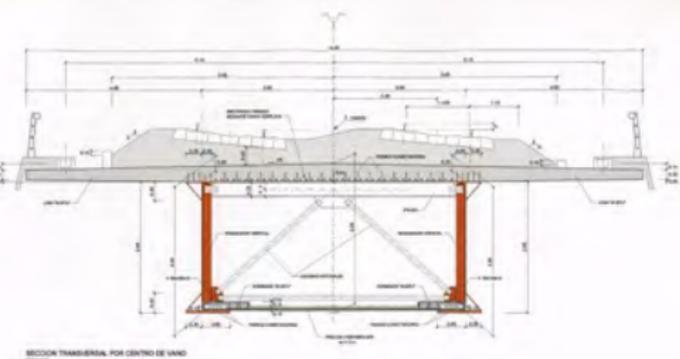
No satisfies: $a_{max} > 3.5 m/s^2$



Viaducto "Las Piedras" (F. Millanes, 2004)



Sección abierta bijácena, **baja rigidez torsional**



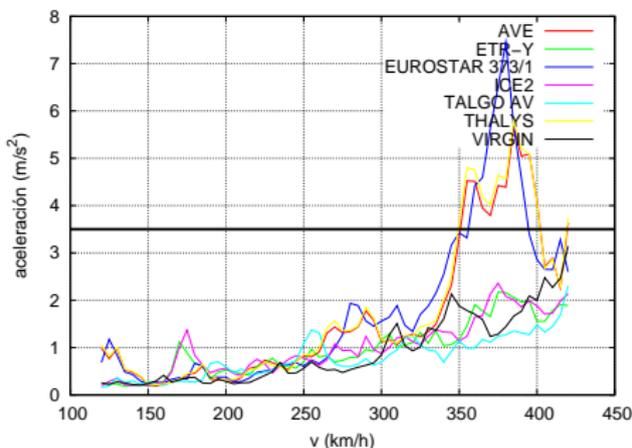
Sección parcialmente Cerrada, **rigidez torsional mayor**



Viaducto "Las Piedras" (III). Envolventes de aceleraciones

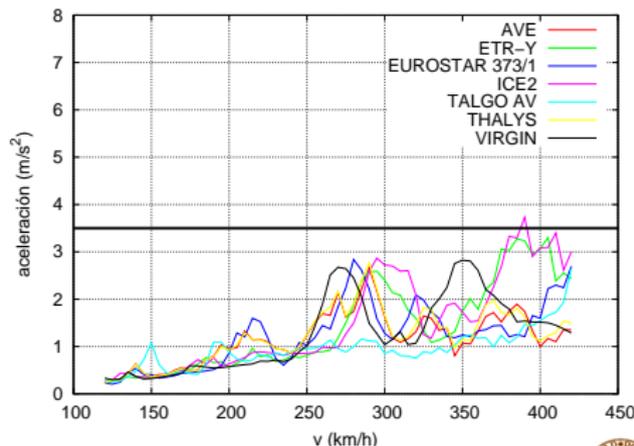
Aceleración vertical máxima, incluyendo flexión y torsión, en la mitad del vano lateral

Sección abierta bijácena



No satisface: $a_{max} > 3.5 \text{ m/s}^2$

Sección bijácena, parcialmente cerrada



Satisface requisitos dinámicos



1 Motivación

2 Respuesta Dinámica y Modelos de Cálculo

- Cargas de tráfico
- Comprobaciones y Modelos

3 Normativa Reciente

- Trenes reales, HSLM y trenes tipo
- Eurocódigos EN1991-2, EN1990/A1
- Interoperabilidad en la Red TransEuropea: ETI-INF
- Instrucción Española IAPF-2007 y Anejos Nacionales

4 Investigación sobre dinámica de estructuras y tráfico ferroviario

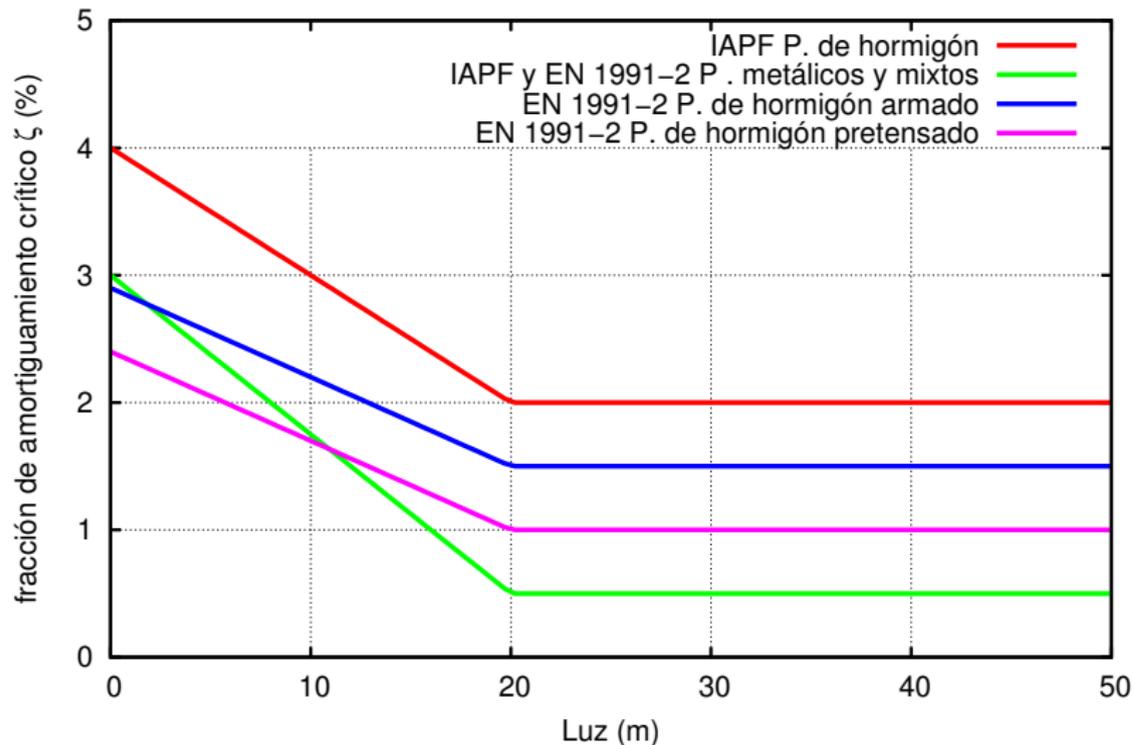
- Dinámica transversal de vehículos ferroviarios sobre viaductos

5 Comentarios Finales

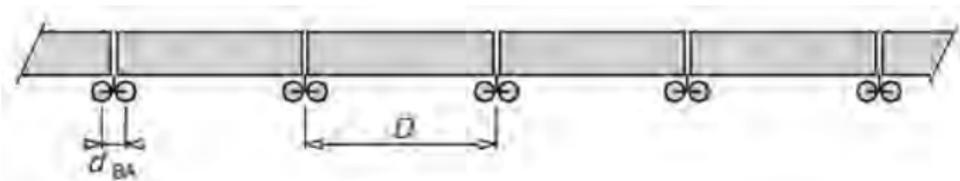
Amortiguamiento

Datos en puentes de RENFE (1999) de hormigón y metálicos

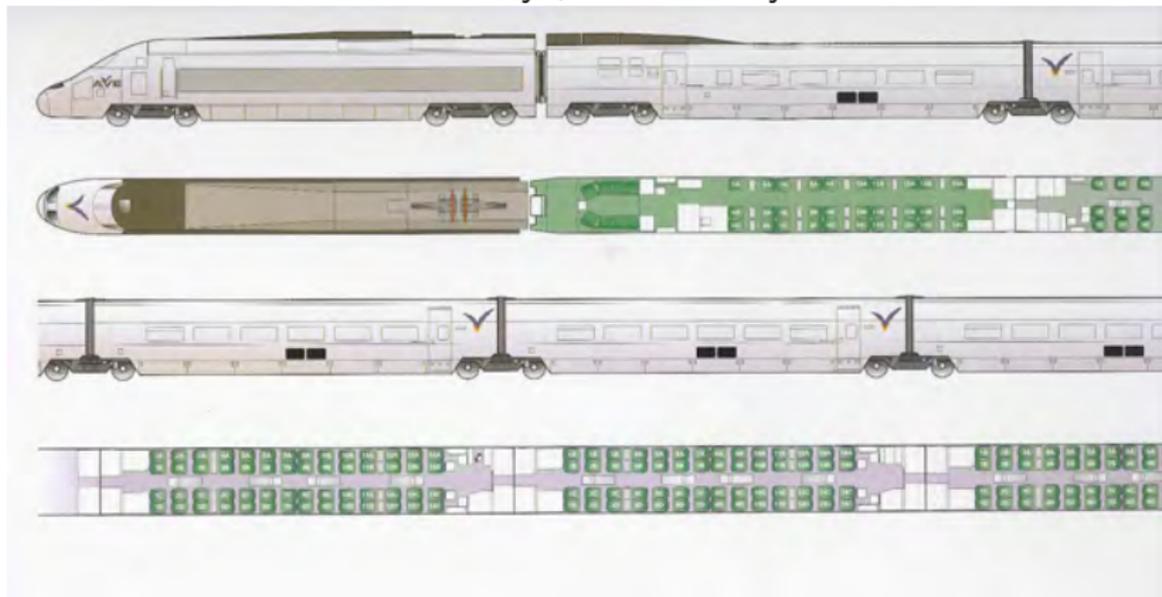
Amortiguamiento para cálculo dinámico en IAPF-07 y EN 1991-2



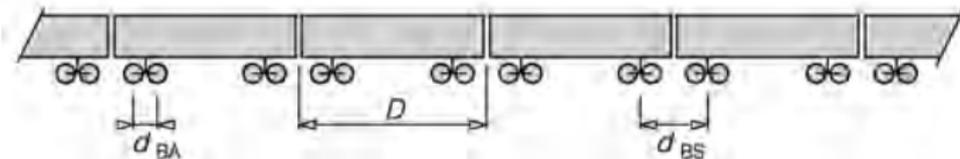
Trenes de Alta Velocidad: Articulados



Articulados: Thalys, AVE-S101 y Eurostar.



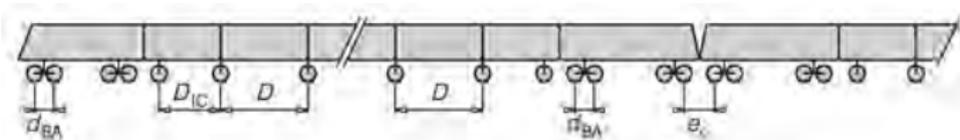
Trenes de Alta Velocidad: Convencionales



Convencionales: Ice2, AVE-S103, Etr-y, Virgin.



Trenes de Alta Velocidad: Regulares



Regulares: AVE-S102 (TALGO).



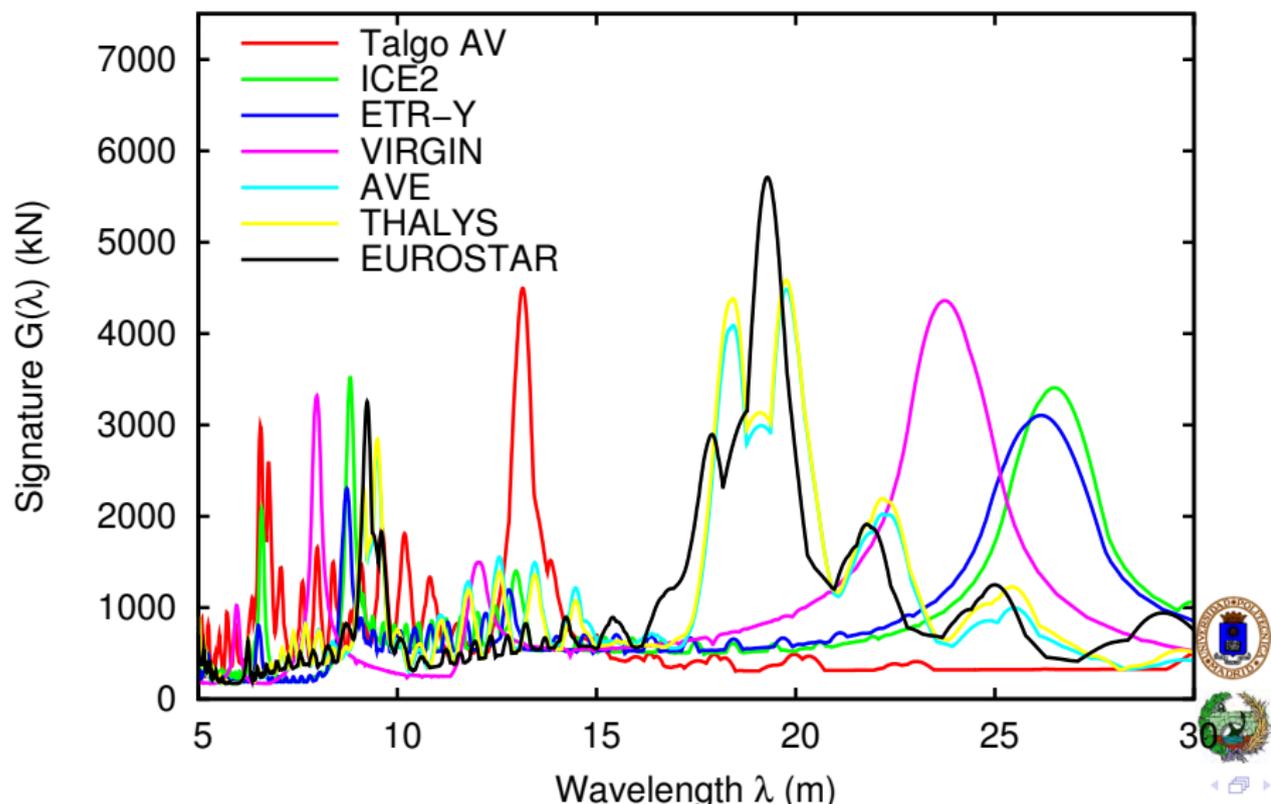
Es necesario considerar:

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



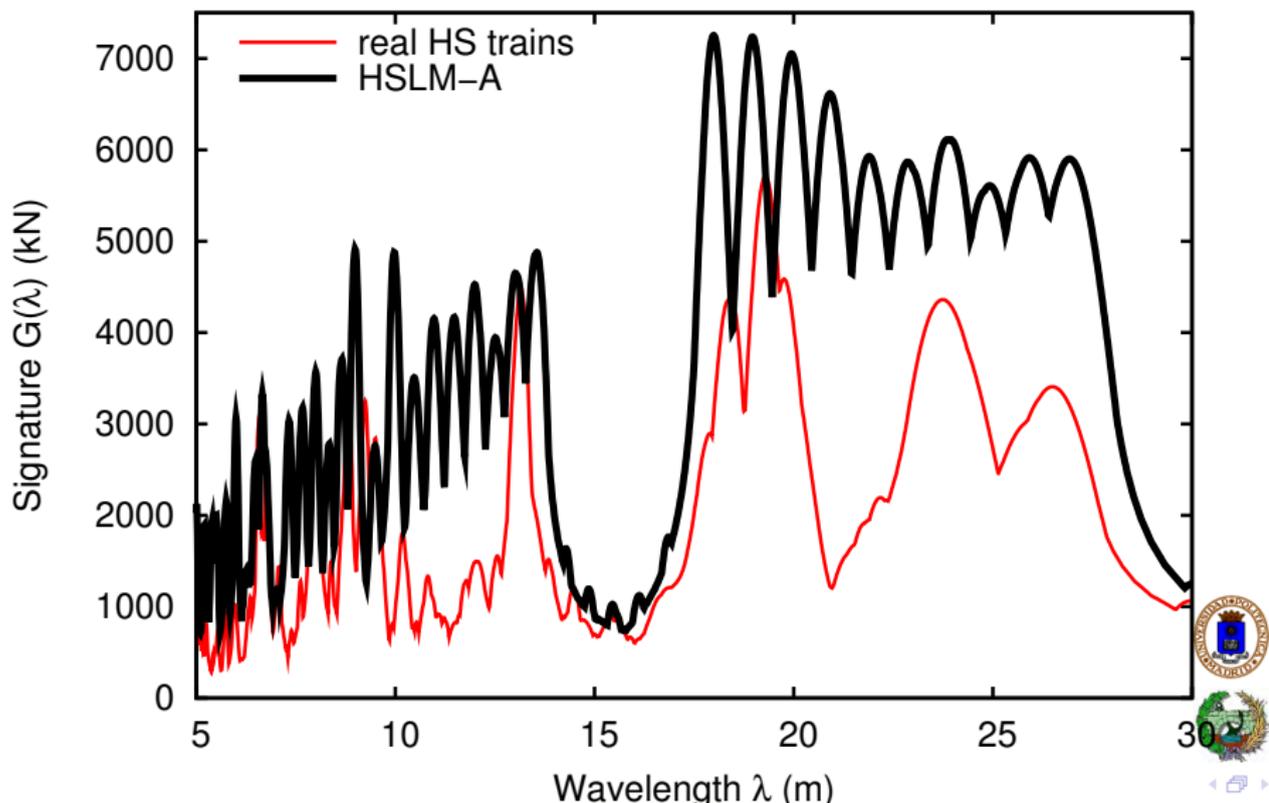
Improntas dinámicas de trenes de alta velocidad

Dynamic signatures



Envolvente Obtenida con Trenes HSLM-A

Dynamic signature envelopes



EN1991-2 – Eurocode 1 part 2

- Acciones en estructuras parte 2: aplicación a puentes (2003)
- No incluye criterios de diseño (EN1990) ni relacionados con materiales (EN1992, EN1993)
- Modelo de cargas verticales LM71 (UIC71 + SW/0)
- Requiere cálculo dinámico para algunos escenarios (resonancia)
- Cálculo dinámico: trenes reales o HSLM para líneas interoperables
- Acciones horizontales: centrífuga, lazo, frenado/tracción
- Modelos para el acoplamiento vía/estructura
- otras acciones: aerodinámicas, descarrilamiento, fatiga
- Grupos de cargas (combinaciones)
- Revision 2010–



EN1990/A1 – Eurocode 0 Annex 2

- Bases de diseño estructural – Anejo A2 Aplicación a puentes (2005)
- Estado límite últimos (ELU) y Estado límite de servicio (ELS)
- Combinaciones de acciones (factores ψ)
- Valores de cálculo de cargas ($\gamma \times$ valores característicos)
- Límites de servicio:
 - Seguridad / confort
 - Flechas verticales, laterales, alabeo, otras deformaciones
 - vibración $a < 3.5 \text{ m/s}^2$;
 - frecuencia lateral (vano) $f > 1.2 \text{ Hz}$;
- Revision 2010–



Especificaciones Técnicas de Interoperabilidad – Infraestructura

- Directiva de la UE para interoperabilidad de tráfico ferroviario a través de países Europeos: European Railway Agency (ERA)
- TransEuropean Network (TEN); Categorías de línea ETI I – III (HS), IV – VII (CR).
- ETI para infraestructura; material móvil; Energía; Control y señalización
- Requisitos mínimos para seguridad y funcionalidad básica (p.ej. peralte, ERTMS, ...)
- No se limita a líneas nuevas: incluye líneas existentes (puentes actualizados)
- Provisiones especiales para estructuras existentes: **Categorías de línea EN D4, E5, ... menos conservador que LM71**
- Puede requerir $\alpha > 1$ para ciertas categorías de línea (p.ej. $\alpha = 1.1$ para IV-F).

IAPF – Instrucción de Acciones en Puentes de Ferrocarril

- Documento completo para puentes de ferrocarril: incluye no sólo acciones, también criterios de diseño
- Incluye viento, térmico, Nieva, ...
- Compatible con Eurocódigos: base del **Anejo Nacional**
- Ejemplos de provisiones concretas:
 - define factor $\alpha = 1.21$ para LM71; no considera SW/0;
 - HSLM para todas las líneas AV (interoperabilidad)
- Revision 2010



- 1 Motivación
- 2 Respuesta Dinámica y Modelos de Cálculo
 - Cargas de tráfico
 - Comprobaciones y Modelos
- 3 Normativa Reciente
 - Trenes reales, HSLM y trenes tipo
 - Eurocódigos EN1991-2, EN1990/A1
 - Interoperabilidad en la Red TransEuropea: ETI-INF
 - Instrucción Española IAPF-2007 y Anejos Nacionales
- 4 Investigación sobre dinámica de estructuras y tráfico ferroviario
 - Dinámica transversal de vehículos ferroviarios sobre viaductos
- 5 Comentarios Finales

Efectos dinámicos laterales en puentes de ferrocarril



Viaducto Landwasser. Línea Albula-Bernina



¿Por qué?

Efectos dinámicos laterales

Estos efectos, a diferencia de los de dinámica vertical, no condicionan la seguridad de la estructura

Pero sí Condicionan:

- Seguridad del vehículo y los pasajeros
- Confort de los pasajeros

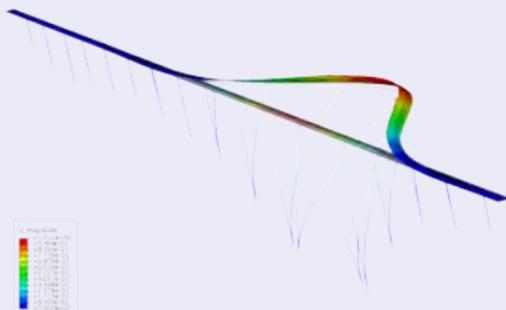
Efectos poco estudiados



¿Cómo aparecen?

En España, debido a su orografía:

- Gran número de viaductos
- Estructuras muy largas y de pilas altas
- Con bajas frecuencias de vibración lateral



0.35 Hz



- Estudia movimientos laterales en varios viaductos europeos
- Principalmente metálicos con tableros abiertos

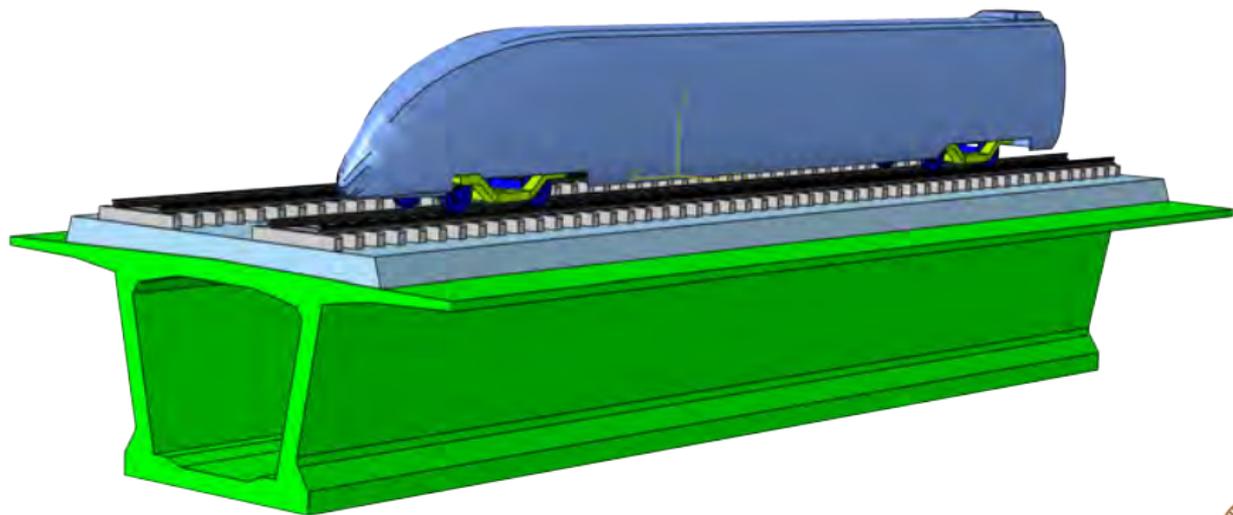


Limitaciones en las normas:

De las conclusiones de este informe se incluyen dos limitaciones en IAPF (2007) y EN 1991-2 (2003):

- 1 Frecuencia vanos puente $f \geq 1.2$ Hz
- 2 Desplazamiento horizontal máximo relativo $\delta_y < 6$ mm

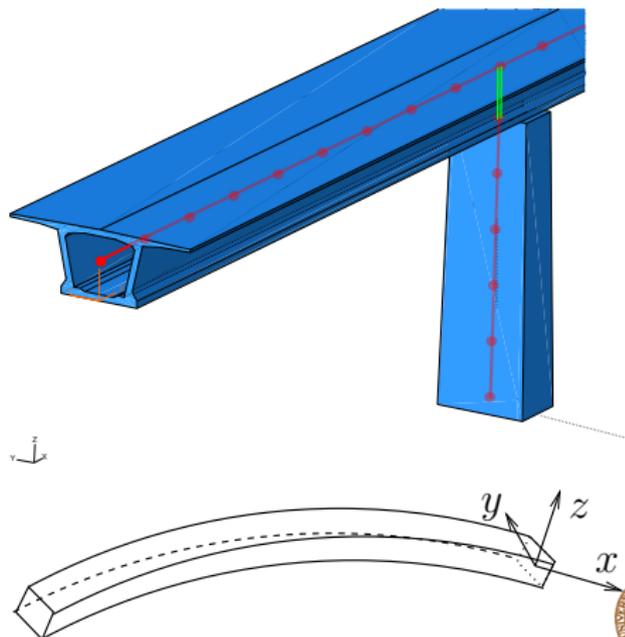
Modelos acoplados Viaducto – Vehículo



Modelos de la Estructura

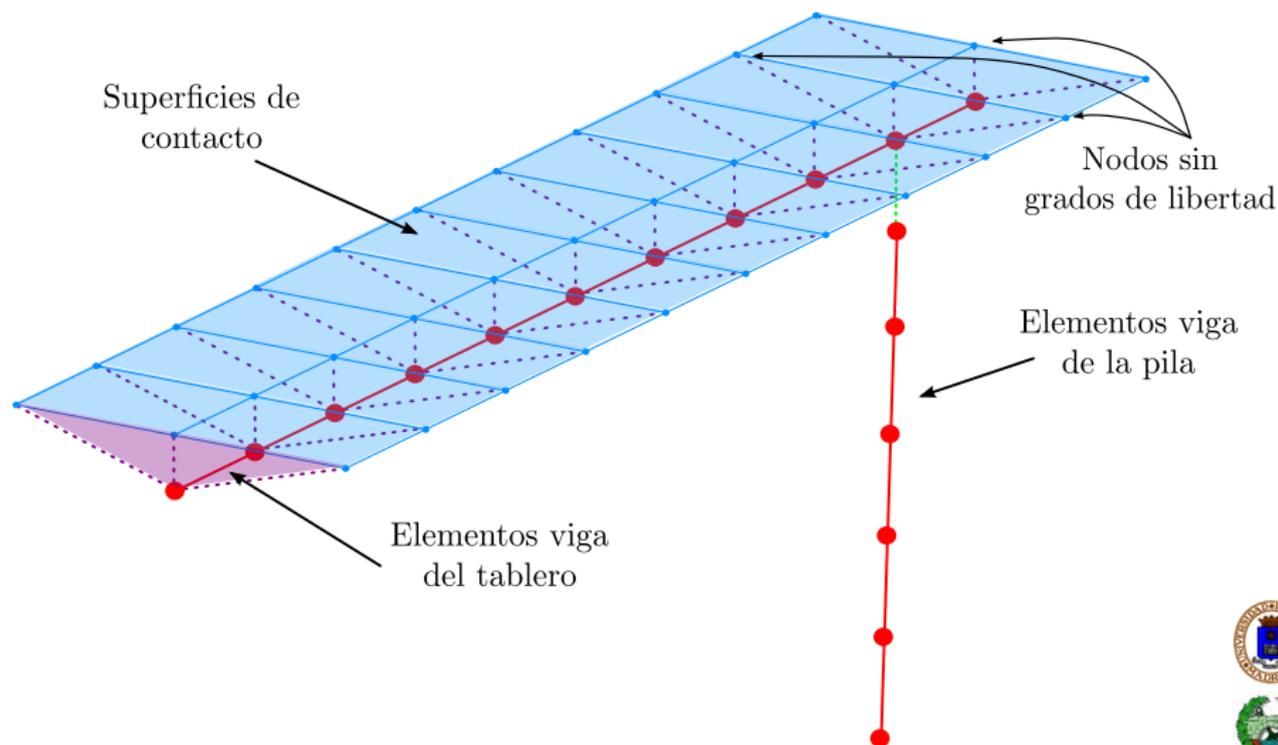
Elementos Finitos

- Modelización mediante Elementos finitos
- Elementos viga
- Material elástico lineal
- Generalizable trivialmente a modelos más detallados (láminas, continuo) y/o no lineales



Estructuras

Acoplamiento cinemático

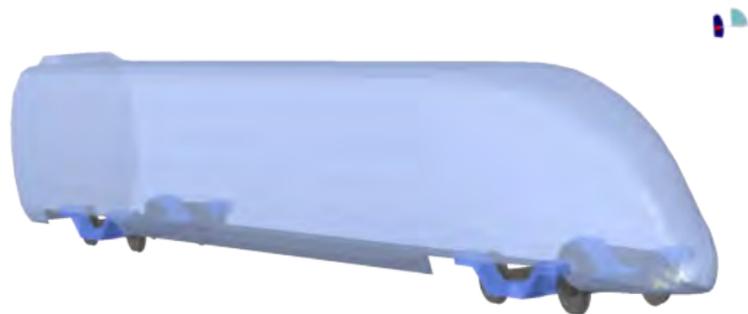


Vehículos

Colaboración con Profs. G. Giménez, A. Alonso

- Modelo de sistemas multicuerpo
- Sólidos rígidos + sistemas de suspensión + restricciones
- 2 bogies \times 2 ejes en cada coche
- Tracción distribuida
- En ABAQUS: multicuerpo (MBS) + elementos finitos (MEF)





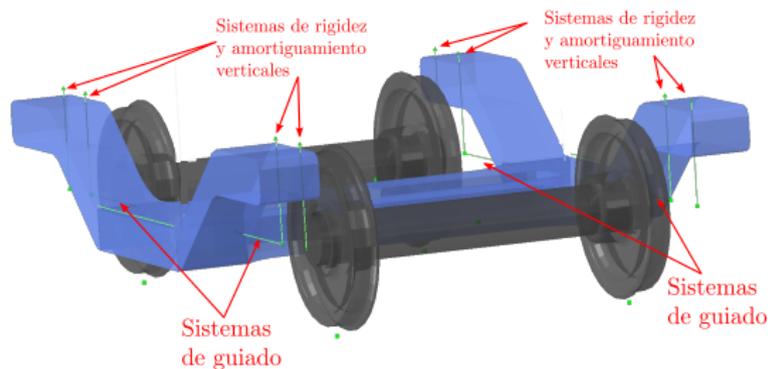
Modelo multicuerpo:

- 7 cuerpos rígidos \times 6 grados de libertad cada uno
- Masas e inercias asociadas a cada cuerpo
- Dos niveles de suspensión
 - ▶ Suspensión primaria (ejes–bogie)
 - ▶ Suspensión secundaria (bogie–caja)



Vehículos

Sistema Multicuerpo



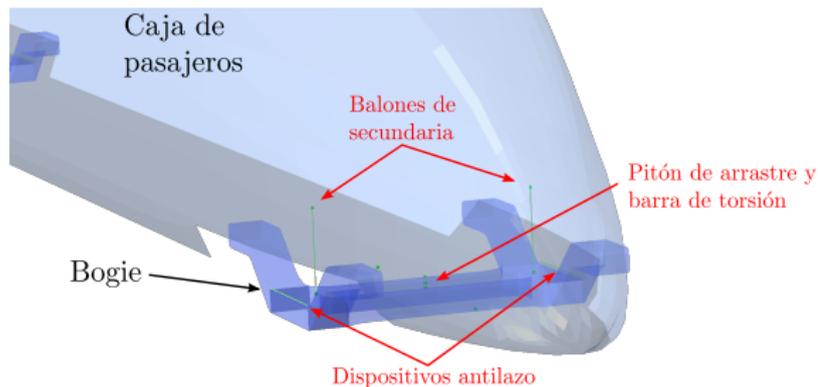
Modelo multicuerpo:

- 7 cuerpos rígidos, 6 grados de libertad cada uno
- Masas e inercias asociadas a cada cuerpo
- Dos niveles de suspensión
 - ▶ Suspensión primaria (ejes–bogie)
 - ▶ Suspensión secundaria (bogie–caja)



Vehículos

Sistema Multicuerpo



Modelo multicuerpo:

- 7 cuerpos rígidos, 6 grados de libertad cada uno
- Masas e inercias asociadas a cada cuerpo
- Dos niveles de suspensión
 - ▶ Suspensión primaria (ejes–bogie)
 - ▶ **Suspensión secundaria (bogie–caja)**

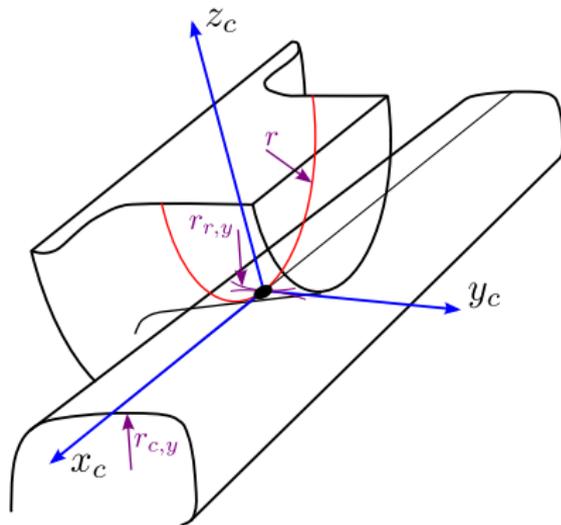


Contacto rueda-carril

Colaboración con Profs. G. Giménez, A. Alonso

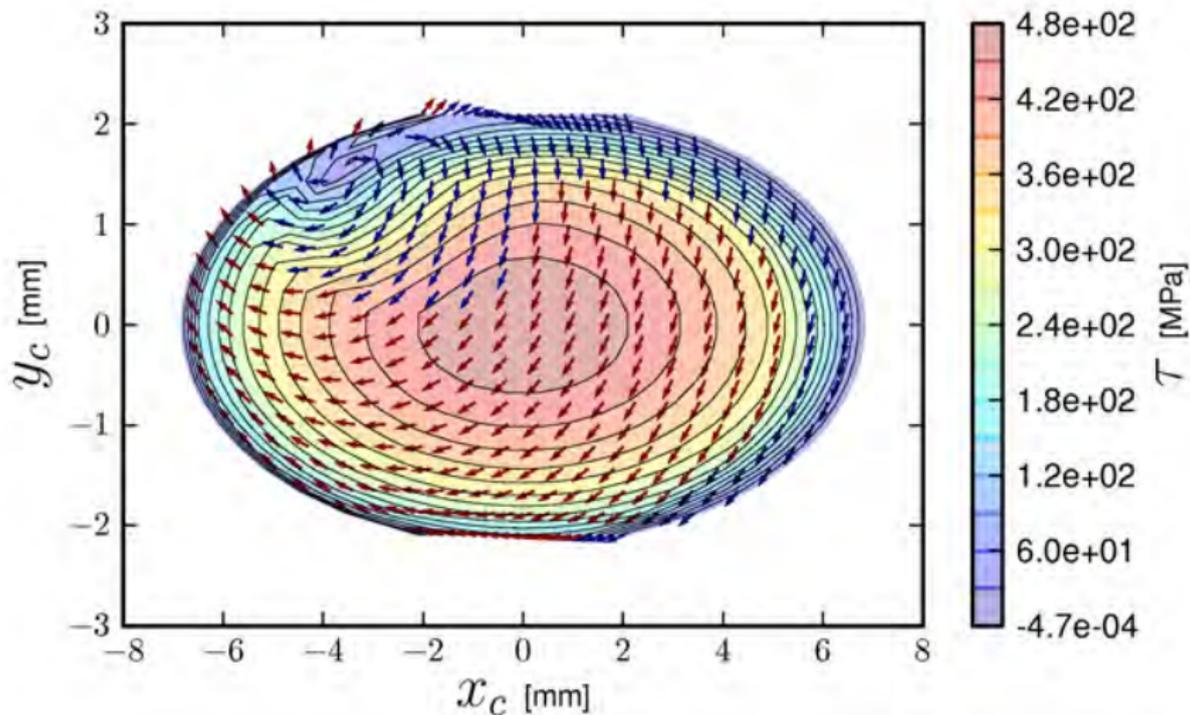
Contacto rueda-carril

- Punto crítico de la dinámica lateral de vehículos
- Se consideran perfiles reales de ruedas y carriles
- El problema se descompone en tres:
 - 1 Geométrico
 - 2 Normal
 - 3 Tangencial



Contacto rueda-carril

Contacto tangencial: FastSim (Kalker)



Vectores de fuerza tangencial y deslizamientos

Se estudiaron:

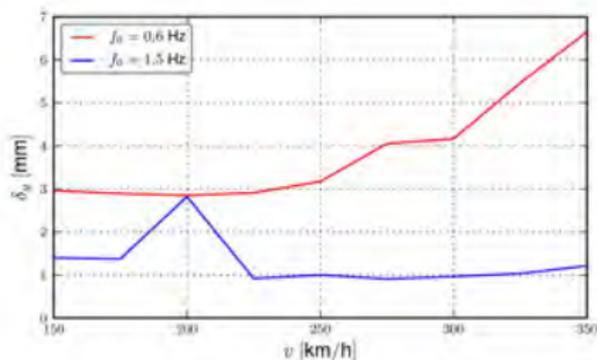
- viaductos isostáticos de 5 vanos
 - distintas longitudes
 - distintas frecuencias laterales
 - sólo flexión lateral
- Siemens ICE3 de 8 coches
- velocidades entre 150 y 350 km/h
- distintos perfiles de irregularidades

Viaductos:

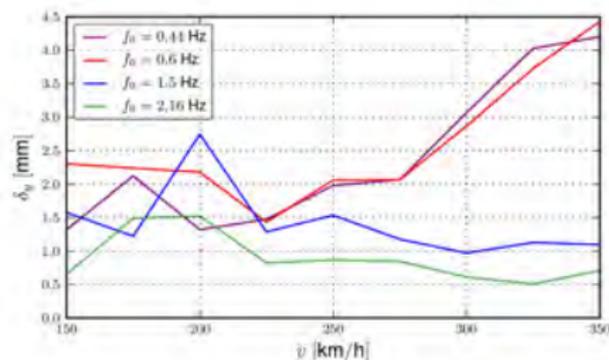
Caso	ρ^* [ton/m]	f_0 [Hz]
Vanos $L = 30$ m		
1	6.0	0.60
2	6.0	1.50
Vanos $L = 40$ m		
3	11.0	0.44
4	6.0	0.60
5	6.0	1.50
6	11.0	2.16



Desplazamientos laterales máximos de centros de vano Para frecuencias menores de 1.2 Hz crecen con la velocidad



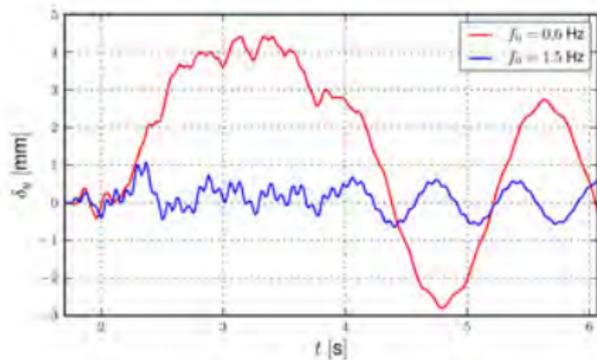
$L = 30$ m



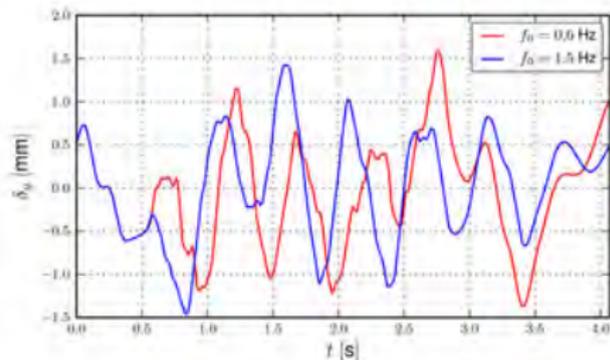
$L = 40$ m



Historias temporales de desplazamientos laterales para $v = 350$ km/h,
 $L = 40$ m y perfil de irregularidades 5



Centro del vano 4



Caja del vehículo 6

Puente sobre el río Gouhe – China

En colaboración con Profs. H Xia y N Zhang, de Beijing Jiaotong University

Características principales

- Línea Qinhuangdao–Shenyang, China
- Viaducto de 28 vanos isostáticos de 24 metros de longitud
- Tren Chino Pioneer circulando a 270 km/h
- Se instrumentó uno de los vanos del viaducto

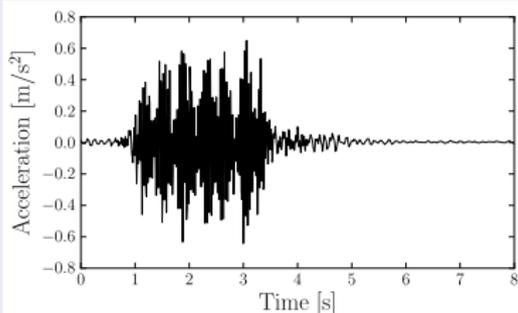


Puente sobre el río Gouhe – China

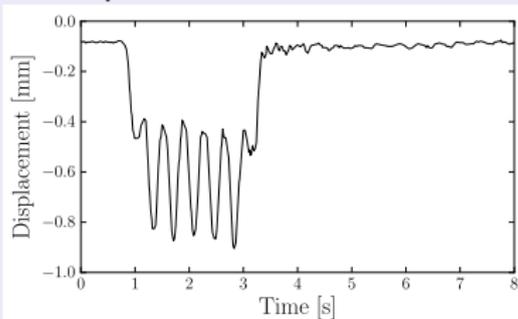
Resultados medidas -vs- cálculos

Medidas

Aceleraciones Laterales

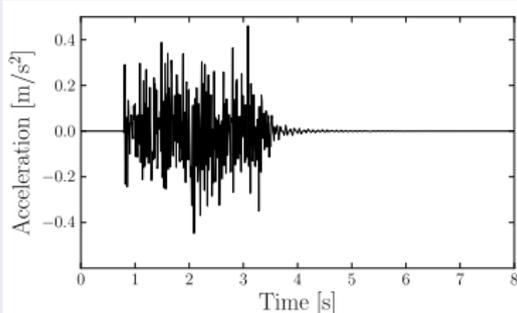


Desplazamientos Verticales

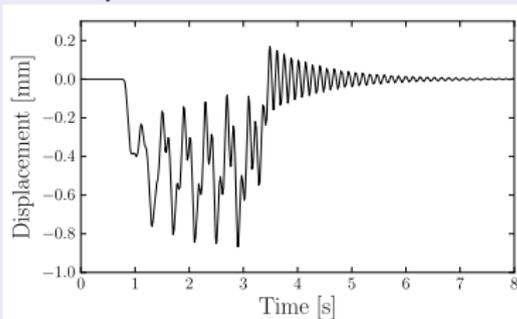


Cálculos

Aceleraciones Laterales



Desplazamientos Verticales

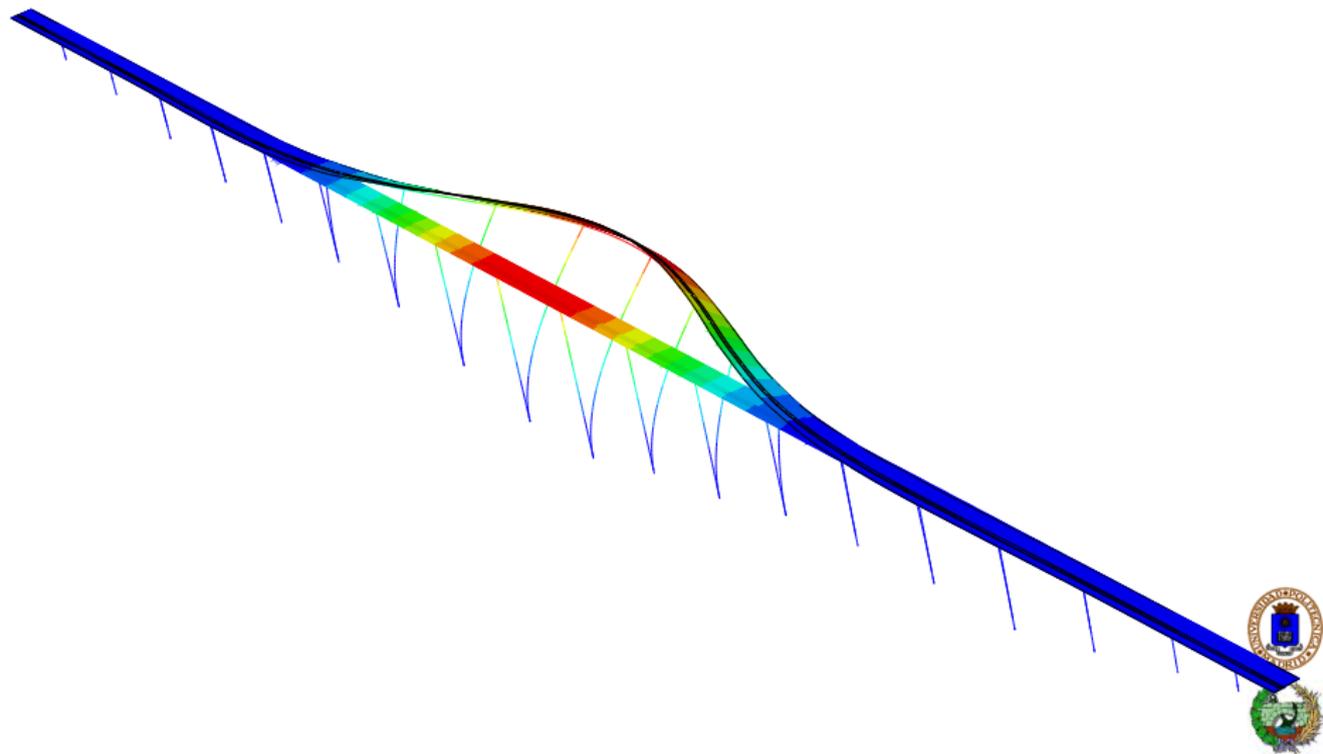


Viaducto del Arroyo de las Piedras



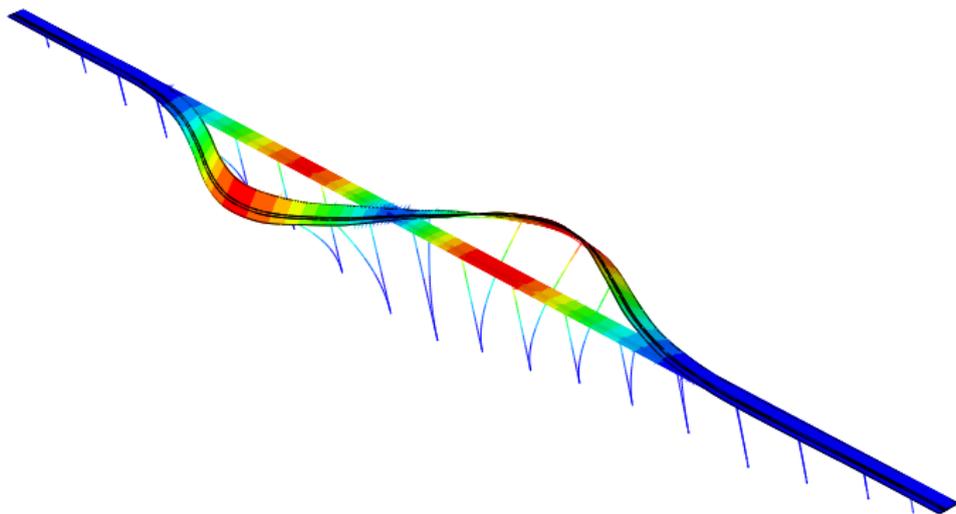
Viaducto del Arroyo de las Piedras

Primer modo de vibración 0.313 Hz



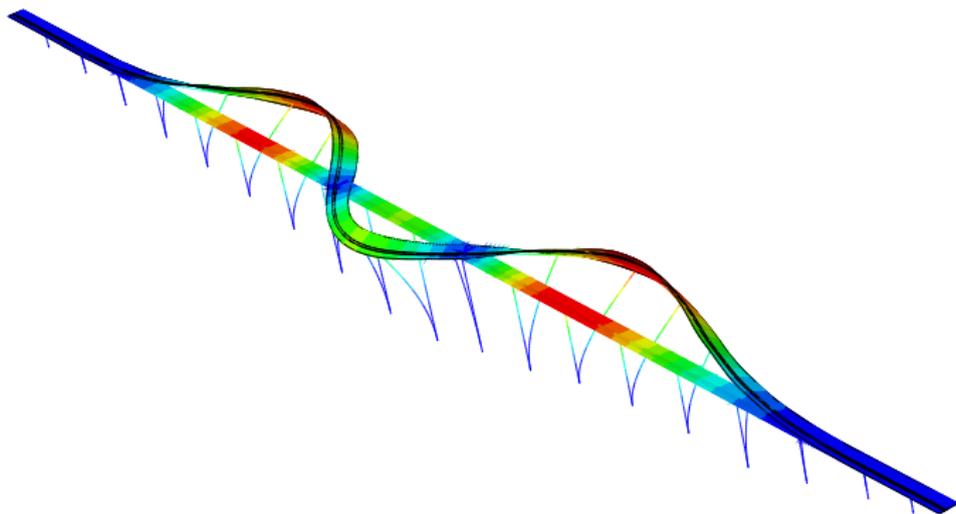
Viaducto del Arroyo de las Piedras

Segundo modo de vibración 0.421 Hz



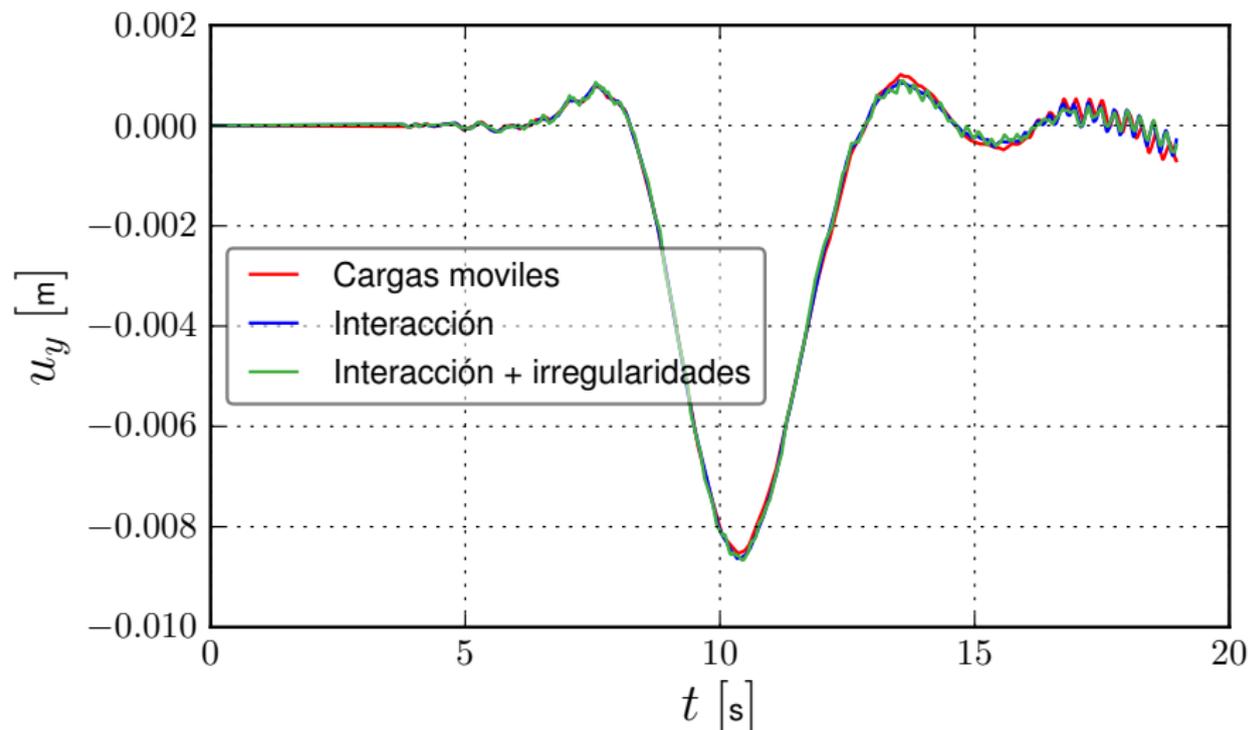
Viaducto del Arroyo de las Piedras

Tercer modo de vibración 0.520 Hz



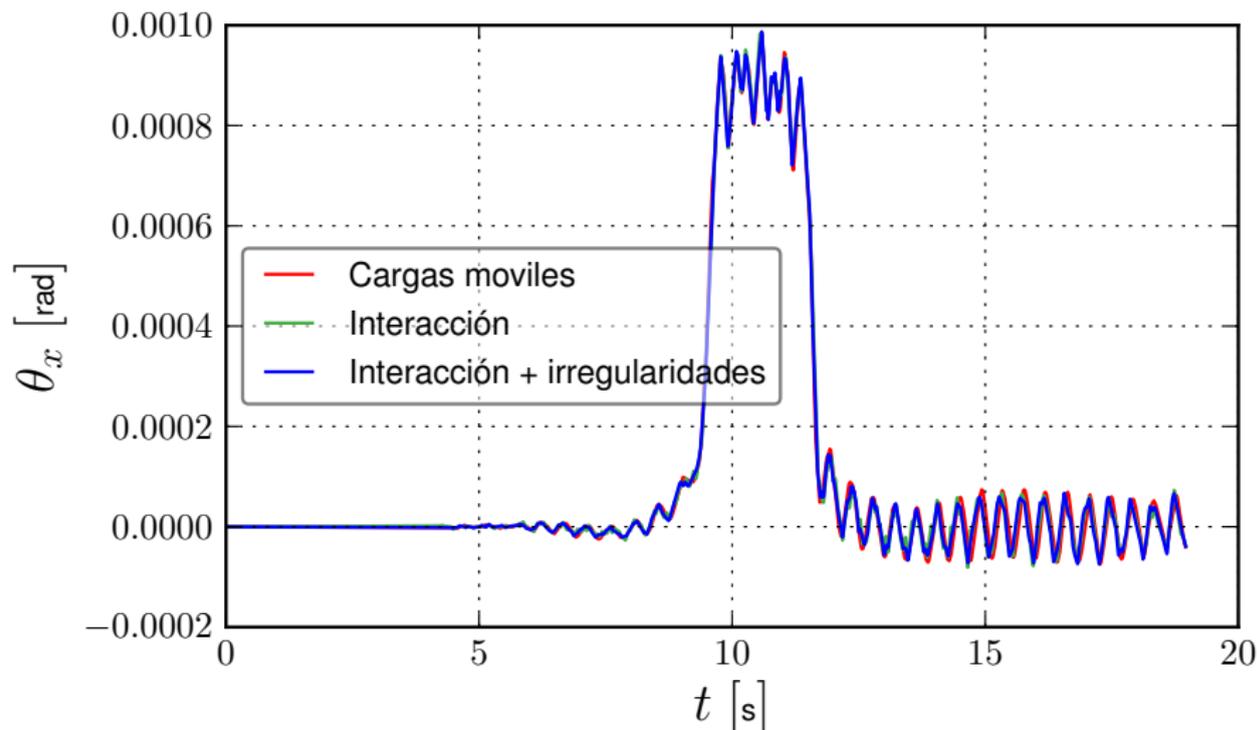
Viaducto del Arroyo de las Piedras

Resultados: desplazamientos laterales del vano 11 para $v = 350$ km/h



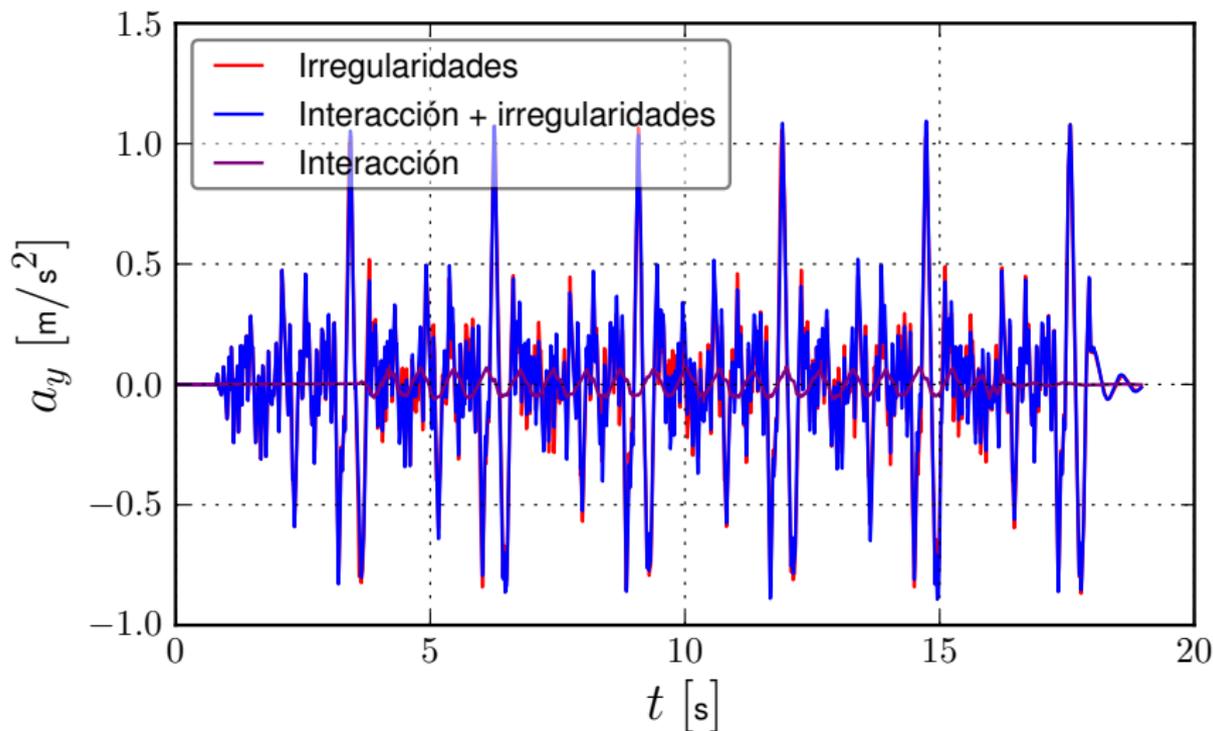
Viaducto del Arroyo de las Piedras

Resultados: giros de torsión del vano 11 para $v = 350$ km/h



Viaducto del Arroyo de las Piedras

Resultados: aceleraciones laterales de la caja del vehículo para $v = 350 \text{ km/h}$



- 1 Motivación
- 2 Respuesta Dinámica y Modelos de Cálculo
 - Cargas de tráfico
 - Comprobaciones y Modelos
- 3 Normativa Reciente
 - Trenes reales, HSLM y trenes tipo
 - Eurocódigos EN1991-2, EN1990/A1
 - Interoperabilidad en la Red TransEuropea: ETI-INF
 - Instrucción Española IAPF-2007 y Anejos Nacionales
- 4 Investigación sobre dinámica de estructuras y tráfico ferroviario
 - Dinámica transversal de vehículos ferroviarios sobre viaductos
- 5 Comentarios Finales

- ¿Criterios de diseño para distintas tipologías?
- ¿Límite de aceleraciones en tablero?
- ¿Requisitos de seguridad / confort?
- ¿Rigidez lateral mínima?
- ¿Efectos dinámicos vehículo-vía-estructura?
- Interoperabilidad ferroviaria (redes transeuropeas)
- Nuevos trenes automotores de alta ocupación



Alta ocupación: AVE Low Cost



The End

GRACIAS POR SU ATENCIÓN

Reconocimiento

- **Investigadores / colaboradores:** P. Antolín, J. Oliva, K. Nguyen J. Domínguez, J.A. Navarro, F. Gabaldón,
- **Estudiantes de Master / PFC:** F. Ruano, B. Sanz, A. Cámara, I. Barrios, A. Cámara, J. Oliva, R. Dias, X. Jiang, R. Barca

