

Nuevas Investigaciones en la Dinámica de Puentes de Ferrocarril de Alta Velocidad

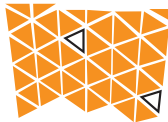
José M.^a Goicolea



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



Madrid IETCC - 18 nov 2011



JORNADAS INTERNACIONALES DE INVESTIGACIÓN EN CONSTRUCCIÓN
INTERNATIONAL CONFERENCE ON RESEARCH IN CONSTRUCTION
Hitos Estructurales de la Arquitectura y la Ingeniería
Structural Milestones of Architecture and Engineering

Outline

- 1 **Motivación**
 - Nuevos Puentes
- 2 **Efectos Dinámicos (¿Puentes Seguros?)**
- 3 **Requisitos de Servicio (¿Tráfico Seguro?)**
- 4 **Modelos y Normas (¿Cómo saberlo?)**
 - Modelos de Cálculo
 - Normas Técnicas
- 5 **Efectos Dinámicos Laterales**
 - Relevancia
 - Contacto rueda-carril
- 6 **Observaciones Finales**

Viaducto Landwasser. Línea Albula-Bernina (1903)

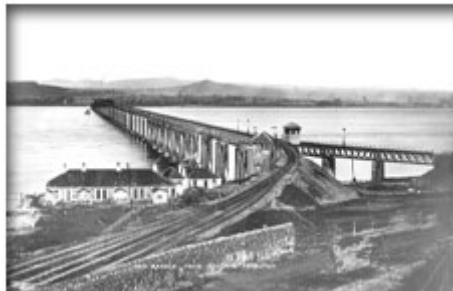


El Desastre del Puente de Dee River (1847)



Robert Stephenson. **5 muertes.** Vigas de fundición

El Desastre del Puente de Tay River (1879)



(Sir) Thomas Bouch, 1878, 3.5 km long. Colapso en 1879: 75 muertes.

Opiniones de expertos

- Investigación: *“Trains were frequently run through the high girder at much higher speeds than at the rate of 25 mph” (42 km/h)*
- P. Lewis: *“wind pressure . . . dynamic effects on the bridge itself. . .”*
- B. Bow: *“ . . . derailment played a key part in the fall of the bridge. . .”*
- T. Martin: *“ . . . The train marginally increases the overturning effect”*

Contreras; Arco $L=261$ m.



Río Ulla. $L=168$ m, $H=115$ m



Las Piedras. $L=19 \times 63.5=1206.5$ m; $H=92$ m



Tajo L=324 m



Alta Velocidad en China: Beijing–Shanghai

铁道部宣布 京沪高速铁路2010年投入运营



Beijing – Shanghai: 1318 km, 380 km/h, 240 trenes/día,
80 % viaductos

Tren CRH380: 486 km/h



Alta Velocidad en China



Vía en placa – losas prefabricadas



Puente sobre Yangtze en Nanjing
300 km/h

Tendencias

- Citius, Altius, Fortius... JGH 2011
- ¡et Tutius! (*¡y más seguros!*)

Preguntas

- ¿Son los puentes (nuevos o existentes) seguros?
- ¿Es el tráfico guiado seguro?
- ¿Cómo podemos saberlo?

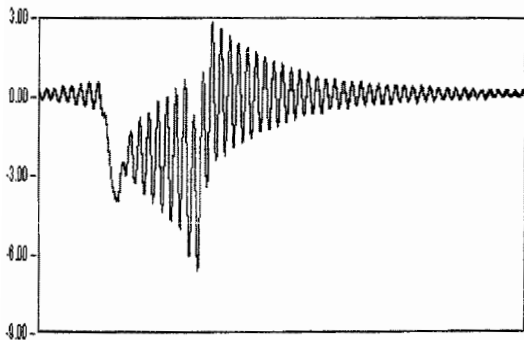
- 1 Motivación**
 - Nuevos Puentes
- 2 Efectos Dinámicos (¿Puentes Seguros?)**
- 3 Requisitos de Servicio (¿Tráfico Seguro?)**
- 4 Modelos y Normas (¿Cómo saberlo?)**
 - Modelos de Cálculo
 - Normas Técnicas
- 5 Efectos Dinámicos Laterales**
 - Relevancia
 - Contacto rueda–carril
- 6 Observaciones Finales**

- 1 **Motivación**
 - Nuevos Puentes
- 2 **Efectos Dinámicos (¿Puentes Seguros?)**
- 3 **Requisitos de Servicio (¿Tráfico Seguro?)**
- 4 **Modelos y Normas (¿Cómo saberlo?)**
 - Modelos de Cálculo
 - Normas Técnicas
- 5 **Efectos Dinámicos Laterales**
 - Relevancia
 - Contacto rueda-carril
- 6 **Observaciones Finales**

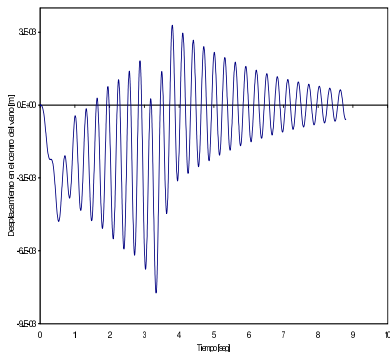
Viaducto del Tajo (Madrid-Sevilla)

AVE S-100 $v = 219$ km/h

Respuesta dinámica vertical



Desplazamientos medidos [mfom 96]



*Desplazamientos calculados
[Domínguez 99]*

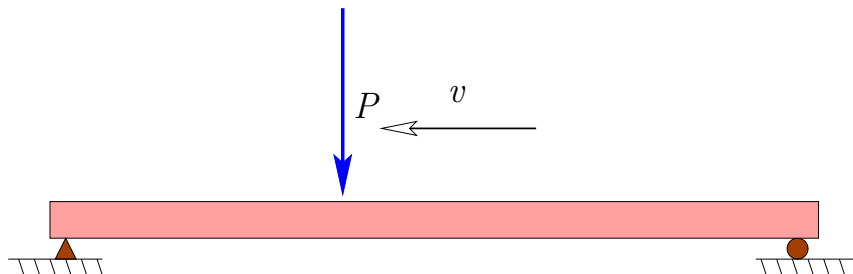


GMC

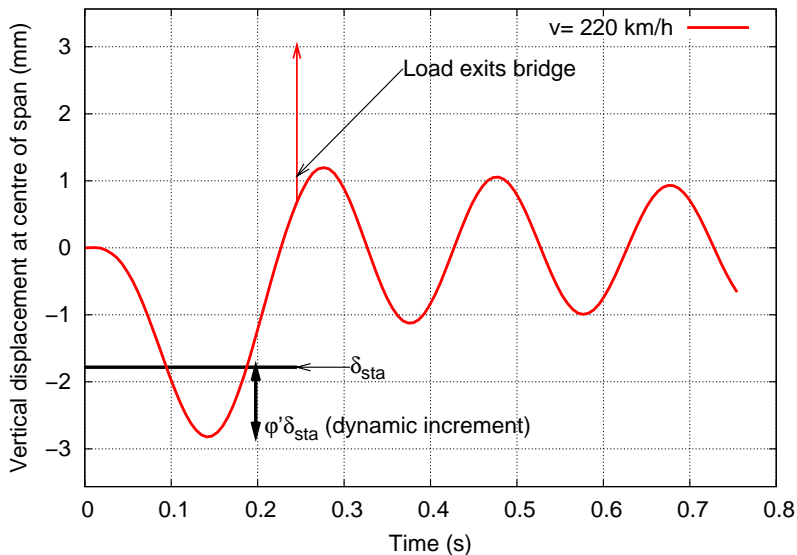


Factor de impacto

Carga móvil sobre puente



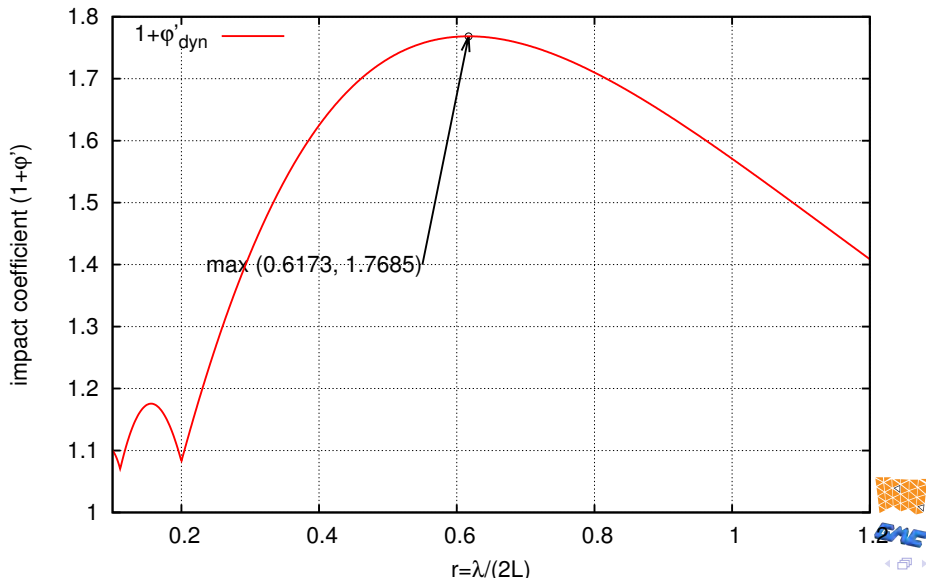
Efecto dinámico de carga móvil: $(1 + \varphi')\delta_{sta} \leq 1,768$



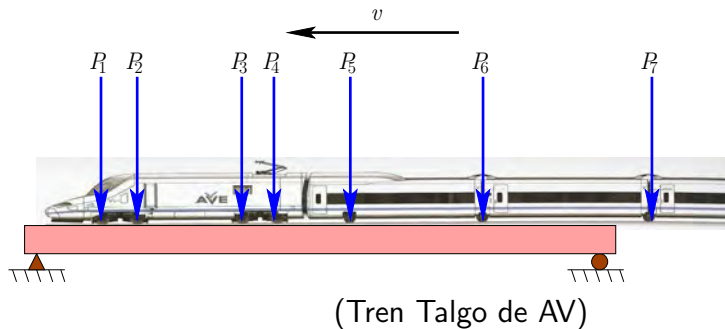
$$L = 15 \text{ m}, \bar{m} = 15 \text{ t/m}, f_0 = 5 \text{ Hz}, P = 195 \text{ kN}, \zeta = 2\%.$$

Envolvente: Coeficiente de Impacto

moving load on simply supported beam



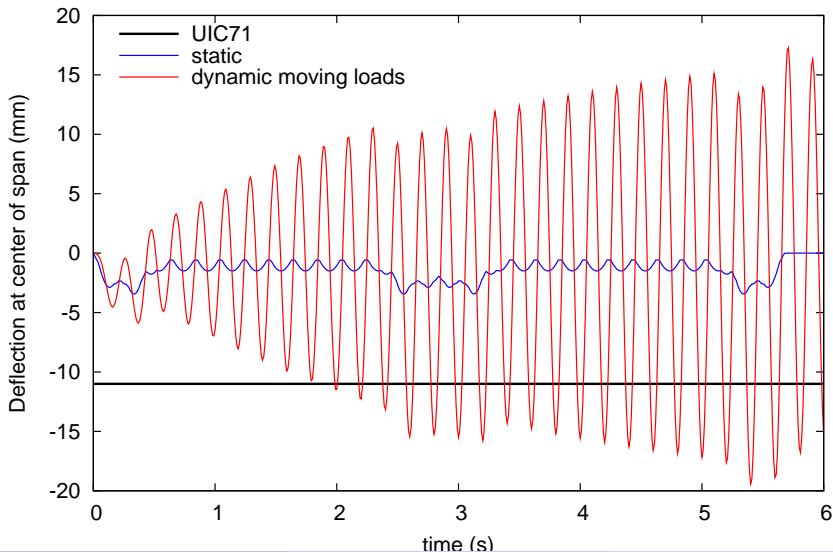
Efecto dinámico de un tren de cargas



Efecto dinámico del tren: $v = 236,5 \text{ km/h}$

¡resonancia!

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



- 1 **Motivación**
 - Nuevos Puentes
- 2 **Efectos Dinámicos (¿Puentes Seguros?)**
- 3 **Requisitos de Servicio (¿Tráfico Seguro?)**
- 4 **Modelos y Normas (¿Cómo saberlo?)**
 - Modelos de Cálculo
 - Normas Técnicas
- 5 **Efectos Dinámicos Laterales**
 - Relevancia
 - Contacto rueda-carril
- 6 **Observaciones Finales**

Estados Límite

- **Estados Límite Último (ELU)**: colapso estructural del puente
- **Estados Límite de Servicio (ELS)**: Seguridad y/o comfort
Requisitos: límites para desplazamientos, giros, aceleraciones, frecuencias de vibración, . . .
- En los puentes de AV, los **ELS para el puente pueden ser ELU para el tráfico!**



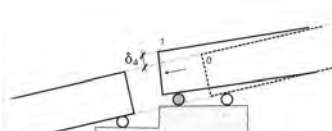
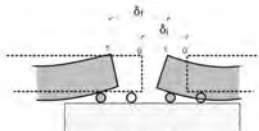
Requisitos para Estados Límite de Servicio

Límites Estáticos

- **Alabeo del tablero:** evitar descarrilamiento
- **Flecha vertical del tablero:** $\delta \lesssim L/600$
- **Deformación transversal:** $\alpha_3 \lesssim 1,5 \text{ mrad}$, $\kappa_6 \lesssim 1/17500 \text{ m}^{-1}$
- **Interacción Vía–Estructura:** tensiones en el carril / mov. en juntas

Límites Dinámicos

- **Aceleración vertical del tablero:** $a_z \leq 3,5 \text{ m/s}^2$, para evitar desconsolidación de balasto. ($5,0 \text{ m/s}^2$ sin balasto.)
- **Frecuencia transversal de un vano:** $f_0 \geq 1,2 \text{ Hz}$
- **Comfort de pasajeros:** $a_z \leq 1 \text{ m/s}^2$ ($\delta \lesssim L/2000$)



- 1 **Motivación**
 - Nuevos Puentes
- 2 **Efectos Dinámicos (¿Puentes Seguros?)**
- 3 **Requisitos de Servicio (¿Tráfico Seguro?)**
- 4 **Modelos y Normas (¿Cómo saberlo?)**
 - Modelos de Cálculo
 - Normas Técnicas
- 5 **Efectos Dinámicos Laterales**
 - Relevancia
 - Contacto rueda–carril
- 6 **Observaciones Finales**

Métodos Disponibles y Aplicación

Métodos que no consideran resonancia: **envolventes de proyecto**

- Coeficiente de impacto envolvente: $\Phi(L)$
 $v < 220$ km/h, tipología “convencional”, \in huso de frecuencias
- Coeficiente de impacto para *trenes reales*: $1 + \varphi'(\lambda, L)$ ($\lambda = v/f_0$)
 $v < 220$ km/h, tipología “convencional”

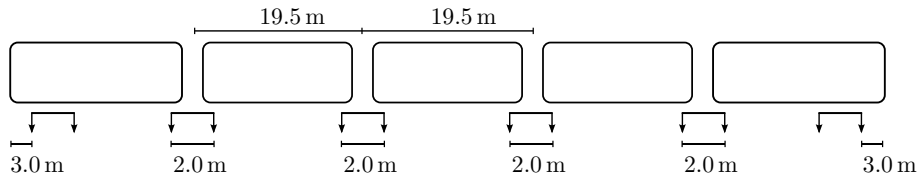
Métodos que consideran **resonancia**

- Cálculo dinámico con cargas móviles
- Impronta dinámica $G(\lambda)$
Tableros isostáticos
- Cálculo dinámico con interacción vehículo–estructura



Modelos de Cálculo

EMU train: **REF_AB_2** (SNCF, *Definition of Reference Load Models for new Multiple Units*, 16 June 2011)



Axle load: $P = 21,5$ t; 1 unit = 5 coaches

Bogies y suspensión primaria

(para modelos con interacción)

- $1/2$ bogie mass = 2,5 t
- $k_1 = 4,836$ kN/mm
- $f_1 = 7$ Hz

Impacto Múltiple

EMU sobre puente $L = 20$ m; **Factor de impacto = 2,3**

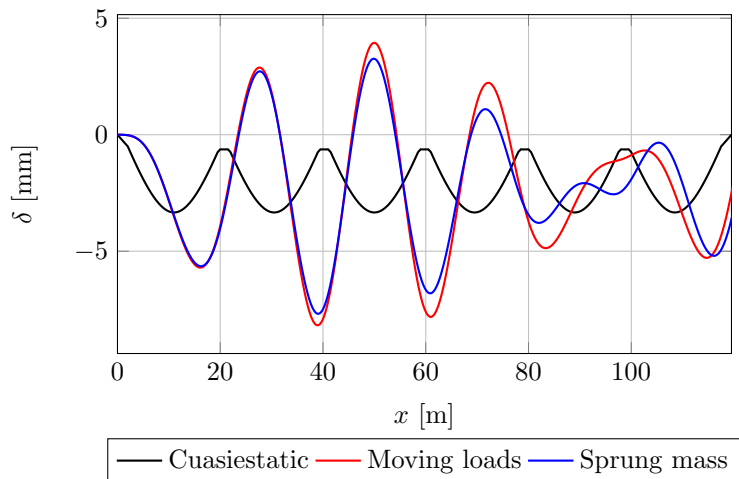
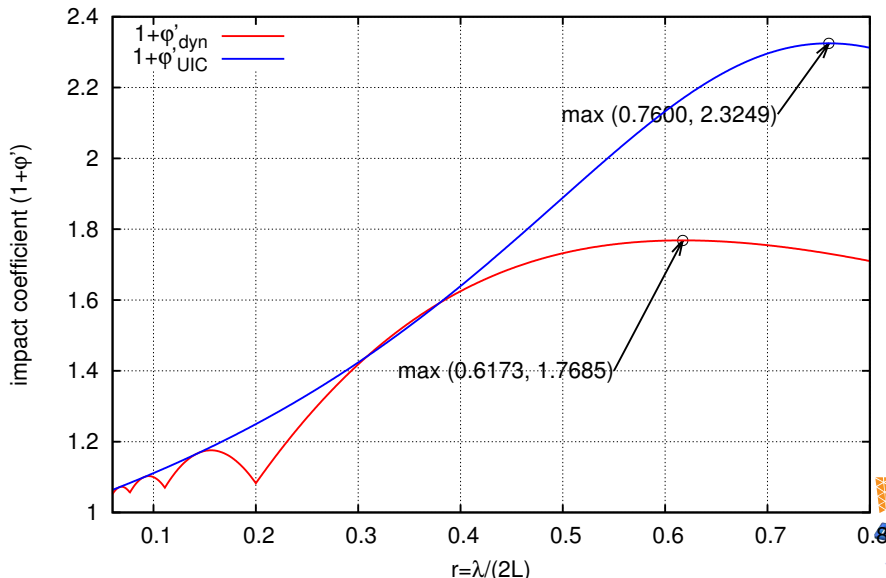


Figura: Flecha vertical para velocidad V_C en el centro de vano del puente $L = 20,0$ m de ERRI D 214, considerando cargas móviles y suspensión primaria

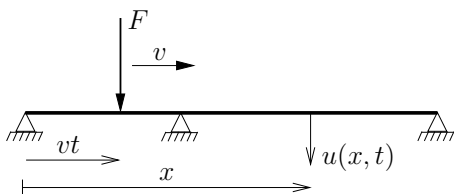


Envolvente Dinámica UIC-f776 / EN1991-2

moving load on simply supported beam



Modelos de cargas móviles: base



Ecuación dinámica de la elástica:

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

Hipótesis

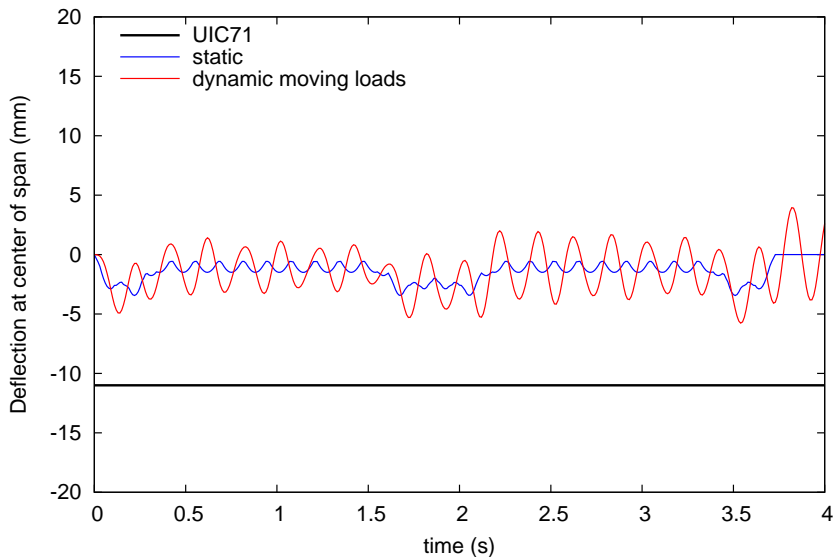
- Modelos de viga, lámina o continuo
- Cargas puntuales o repartidas de valor fijo

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

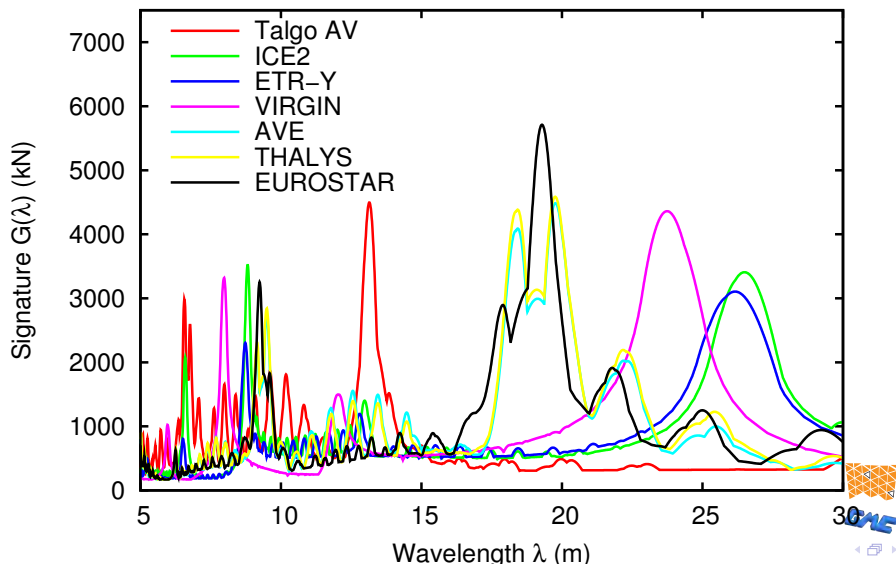
Modelos con cargas móviles: ejemplo

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



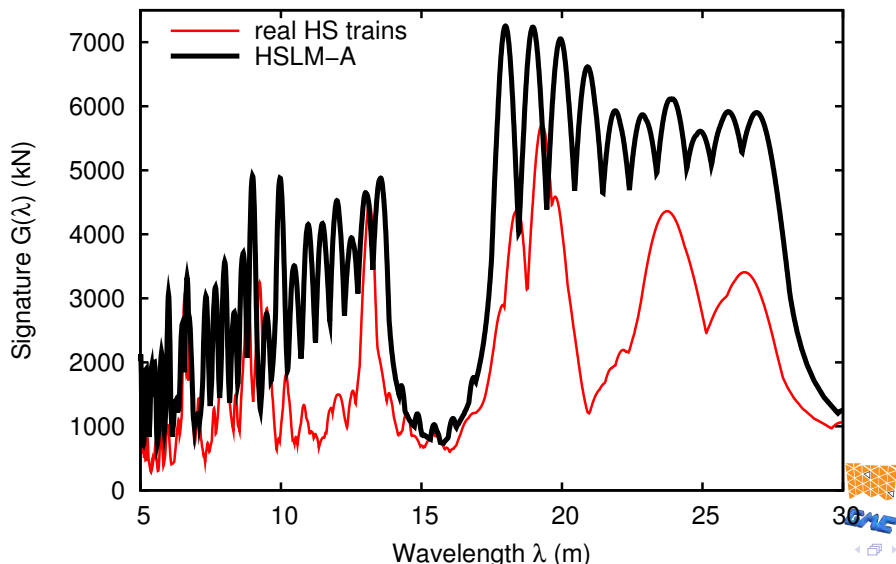
Improntas dinámicas de trenes de alta velocidad

Dynamic signatures



Envolvente Obtenida con Trenes HSLM-A

Dynamic signature envelopes



Trenes Universales para 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:

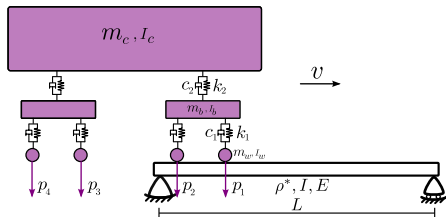
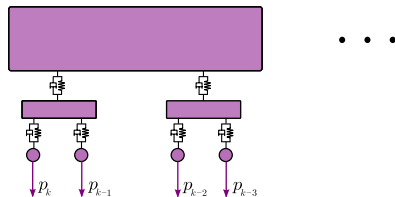
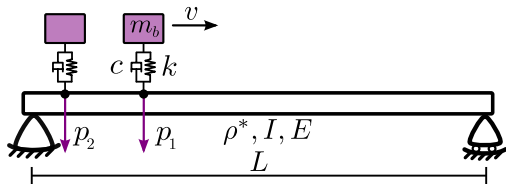
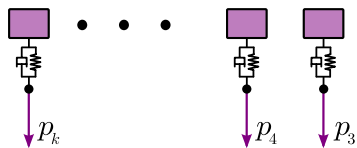
<i>Parameter</i>	HSLM-A
Type	articulated
Total length	≈ 400 m
Coach length D	18 m – 27 m
Axle point load	170 kN – 210 kN
Bogie axle spacing d	2.0 m – 3.5 m
Head and tail locomotives	yes

Características de trenes universales HSLM-A. (D214.2RP1, EN-1991-2, IAPF-07, TSI)

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

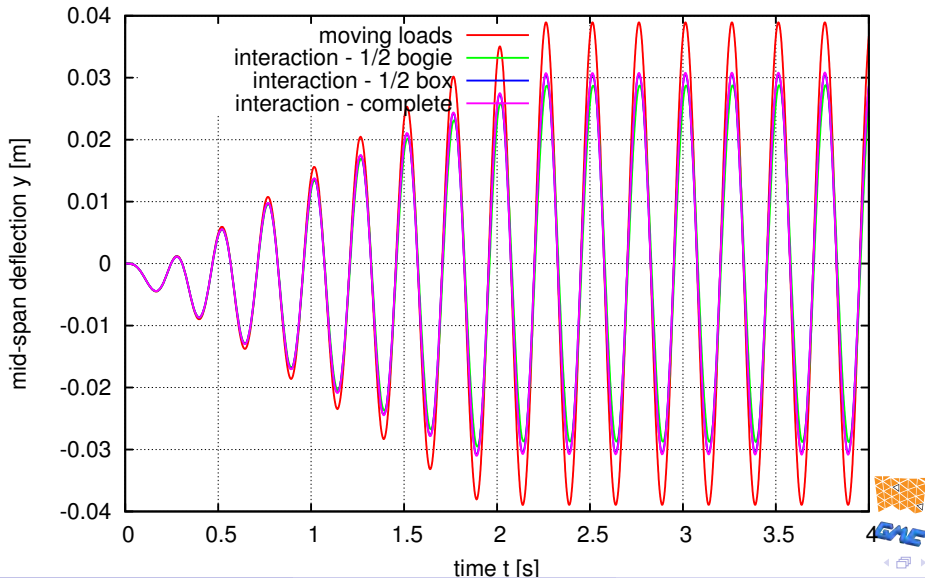


Modelos con interacción



Desplazamientos – Interacción, Velocidad Resonante

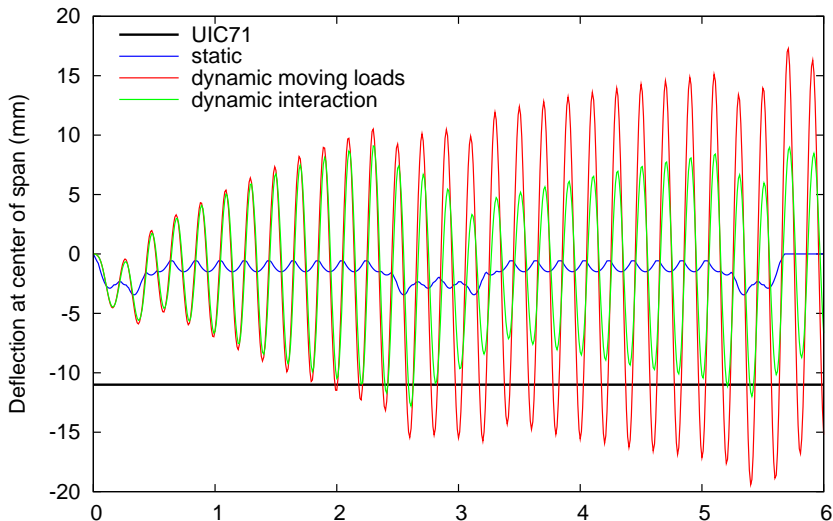
ERRI L=20 m bridge -- Interaction models ICE3 v=357 km/h



Efecto dinámico del tren: $v = 236,5 \text{ km/h}$

¡resonancia!

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



Normas y Recomendaciones

- **Eurocódigos** [EN1991-2 (2003), EN1990-A1 (2005)]
(En revisión por WG de CEN/TC250, 2011–)
- Otras **normas Europeas**: EN15528, ...
- **Normativa nacional** [IAPF 2007] y Anejos nacionales
(en preparación);
- **Especificaciones Técnicas de Interoperabilidad** (TSI
HS & CR, en proceso de refundición)



- 1 **Motivación**
 - Nuevos Puentes
- 2 **Efectos Dinámicos (¿Puentes Seguros?)**
- 3 **Requisitos de Servicio (¿Tráfico Seguro?)**
- 4 **Modelos y Normas (¿Cómo saberlo?)**
 - Modelos de Cálculo
 - Normas Técnicas
- 5 **Efectos Dinámicos Laterales**
 - Relevancia
 - Contacto rueda-carril
- 6 **Observaciones Finales**

ERRI D181 (1996)

- *European Railway Research Institute*, question D181
- Medidas y cálculos de movimientos laterales en varios viaductos europeos
- Principalmente metálicos con tableros abiertos



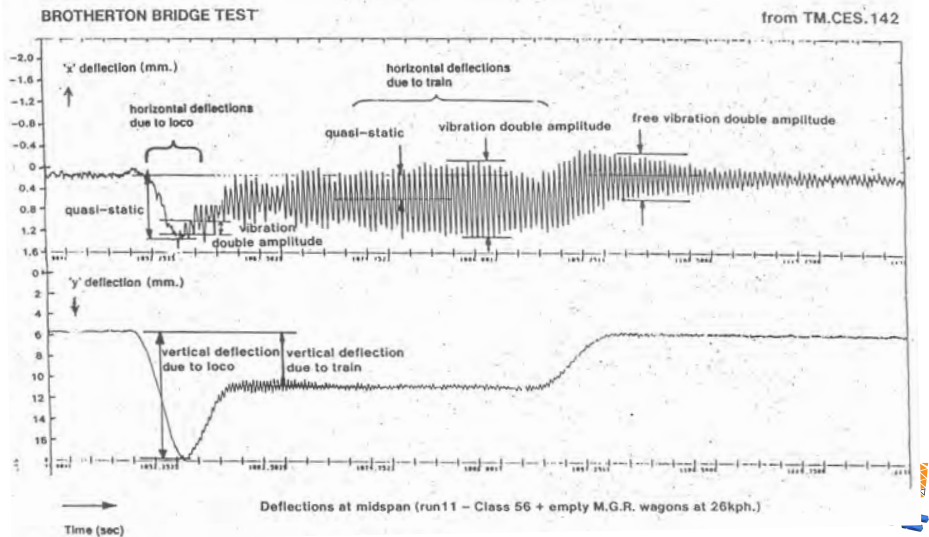
Conclusiones:

- EN1990: A2.4.4.2.4(3).— Frecuencia de vibración lateral de un vano:

$$f \geq 1,2 \text{ Hz}$$

Puente de Brotherton (UK)

Historias de movimientos laterales y verticales medidos



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

Pero sí son críticos para:

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

Efectos poco estudiados

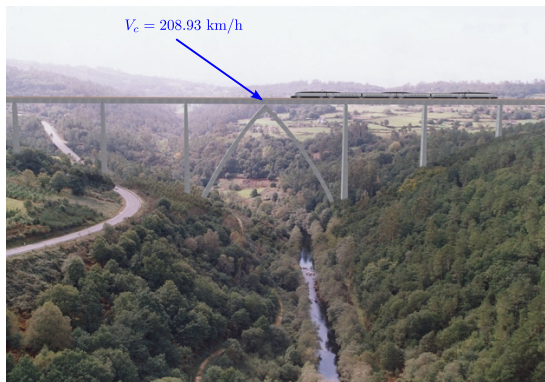


Acciones laterales del tráfico en puentes

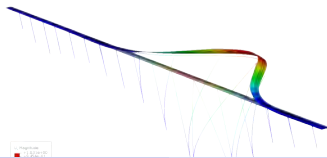
P Antolin 2011 – PAS 2011 <http://oa.upm.es/3429>

Causados por:

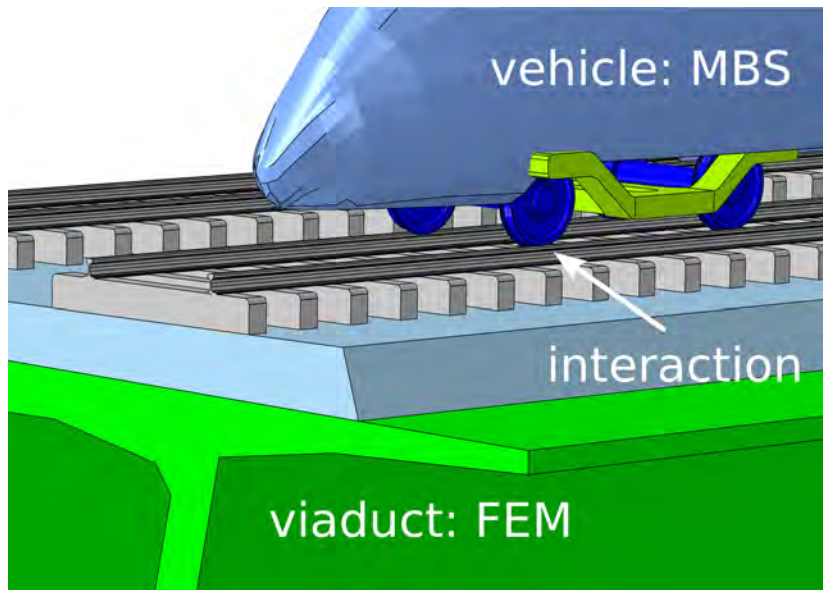
- Viento lateral
- Pilas altas y flexibles
- Secciones abiertas de tablero
- Irregularidades de alineación de la vía
- Terremotos
- Oscilación cinemática de lazo rueda-carril (conicidad)



Viaducto sobre el Río Deza: $f_0 = 0,35 \text{ Hz}$



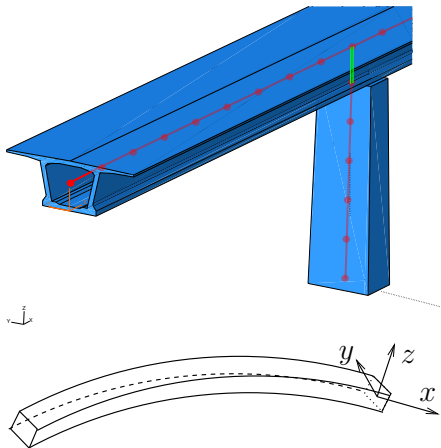
Modelos acoplados Viaducto – Vehículo



Modelos de la Estructura

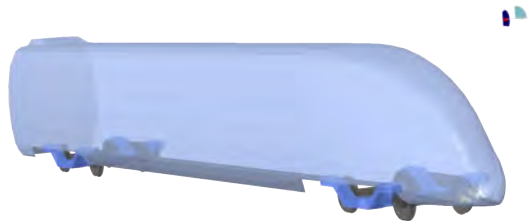
Elementos Finitos

- Elementos viga
- Comportamiento elástico lineal
- Integración directa en el tiempo (HHT- α)
- Generalizable trivialmente a modelos más detallados:
 - Elementos lámina y continuo;
 - Material no lineal;
 - Grandes desplazamientos o giros



Vehículos

Sistema Multicuerpo



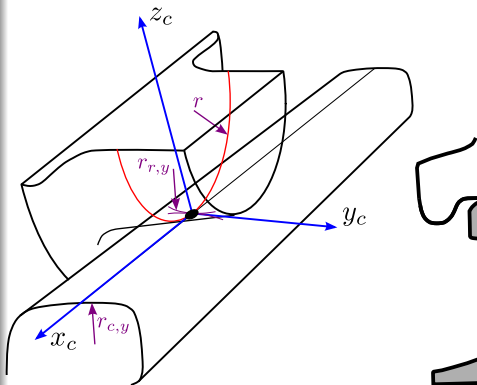
Modelo multicuerpo:

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



Modelo de contacto

- Punto crítico de la dinámica lateral de vehículos
- Perfiles reales de ruedas y carriles
- Tres etapas secuenciales:
 - 1 Geométrica:
→ punto de contacto
 - 2 Normal: Modelo de Hertz
→ elipse de contacto
 - 3 Tangencial: Modelos de Kalker
→ fuerza tangencial

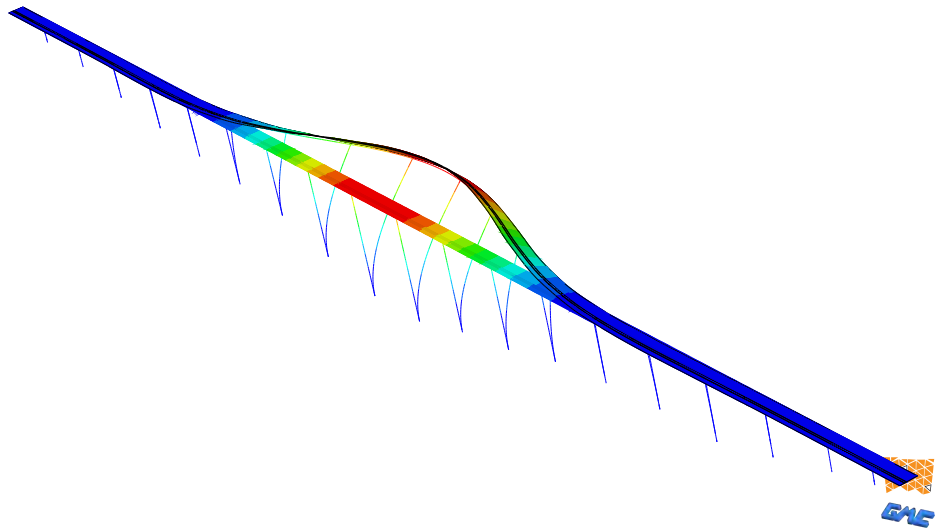


Viaducto del Arroyo de las Piedras



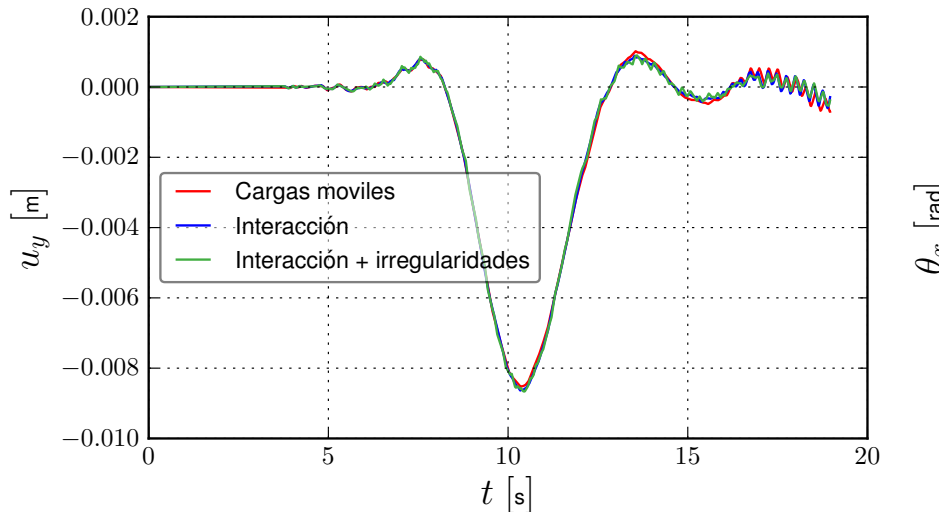
Viaducto del Arroyo de las Piedras

Primer modo de vibración $f_1 = 0,313$ Hz

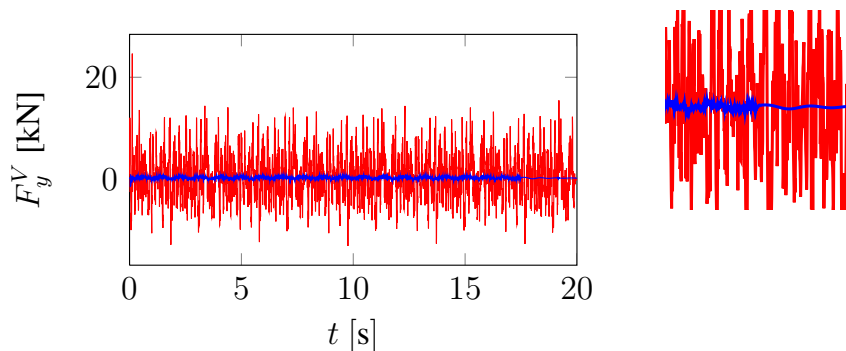


Viaducto del Arroyo de las Piedras – Resultados

Aceleraciones laterales de la caja para $v = 350$ km/h



Viaducto del Arroyo de las Piedras – Fuerza de Lazo

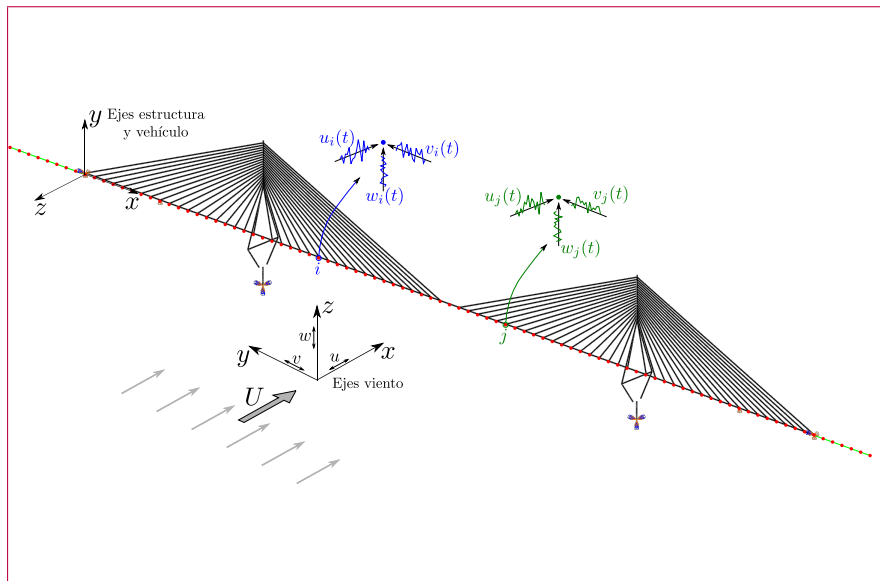


(b) Fuerza de contacto lateral en una rueda de uno de los vehículos



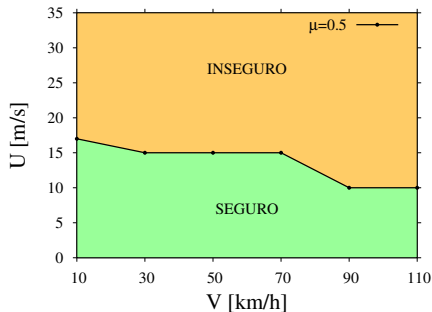
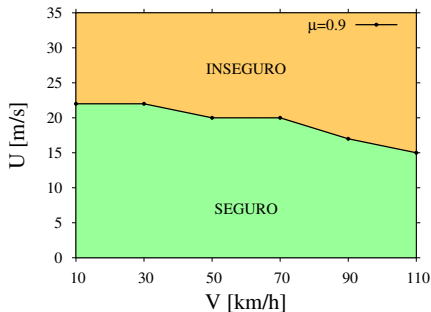
Simulación del Tráfico Rodado con Viento

J Oliva 2011



Curvas Críticas de Viento

Puente atirantado $L = 400$ m. Seguridad del tráfico de camiones.



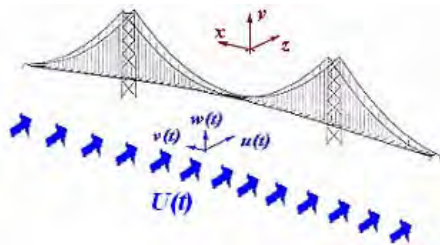
$\eta_v < 1,0$ (vuelco) y $\eta_d < 1,0$ (deslizamiento)

JOQ 2011 <http://oa.upm.es/9526>



Curvas Críticas de Viento

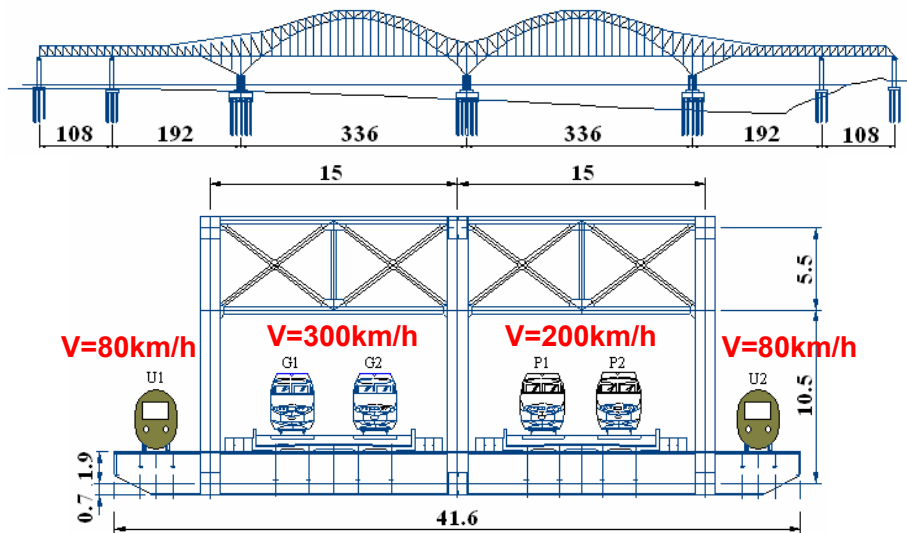
Guo, Xia, Zhang (2011)



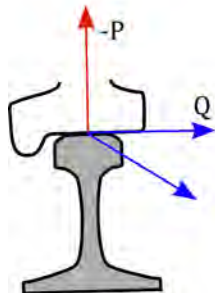
Objetivo

- Establecer las condiciones de tránsito seguro para trenes bajo viento lateral
- Puentes largos y flexibles; zonas de fuertes vientos

Puente sobre Río Yangtze (Nanjing)



Criteria of Safety of Traffic (China)



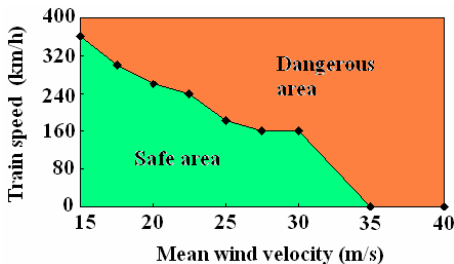
Derailment factor: $Q/P \leq 0.8$

Offload factor: $\Delta P/P \leq 0.6$ $\Delta P/P \leq 0.8$ for HSR

Overturn factor: $D \leq 0.8$

lateral wheel/rail force: $Q \leq 0.85(10 + P_{st}/3)$ (kN)

$Q \leq 10 + P_{st}/3$ (kN) for HSR



- 1 **Motivación**
 - Nuevos Puentes
- 2 **Efectos Dinámicos (¿Puentes Seguros?)**
- 3 **Requisitos de Servicio (¿Tráfico Seguro?)**
- 4 **Modelos y Normas (¿Cómo saberlo?)**
 - Modelos de Cálculo
 - Normas Técnicas
- 5 **Efectos Dinámicos Laterales**
 - Relevancia
 - Contacto rueda–carril
- 6 **Observaciones Finales**

Observaciones Finales

- Viaductos flexibles de gran longitud y altura en líneas AVE
- Efectos dinámicos en ffcc de AV: seguridad de los viaductos y del tráfico
- Uso adecuado de modelos disponibles para cálculo dinámico
- Normativa reciente Europea y Española, incluye nuevas situaciones
- Es necesario ampliar el conocimiento de la dinámica (investigación), aplicarlo (normativa, recomendaciones) y transmitirlo (formación)
- Estudio bajo acciones externas severas: viento, sismo

