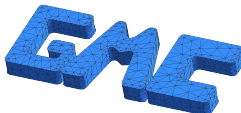


Proyecto y construcción de puentes ferroviarios, incluyendo alta velocidad

José M.^a Goicolea

*Grupo de Mecánica Computacional
Escuela de Ingenieros de Caminos, Universidad Politécnica de Madrid*

PUCP Lima, 2 octubre 2018



1 Infraestructura Ferroviaria ADIF

2 Puentes de ferrocarril

- Red convencional
- Red Alta Velocidad

3 Requisitos y Normativa

- Aspectos a considerar
- Trenes reales, HSLM y trenes tipo
- Eurocódigos
- Interoperabilidad Red TransEuropea: ETI
- Instrucción Española IAPF

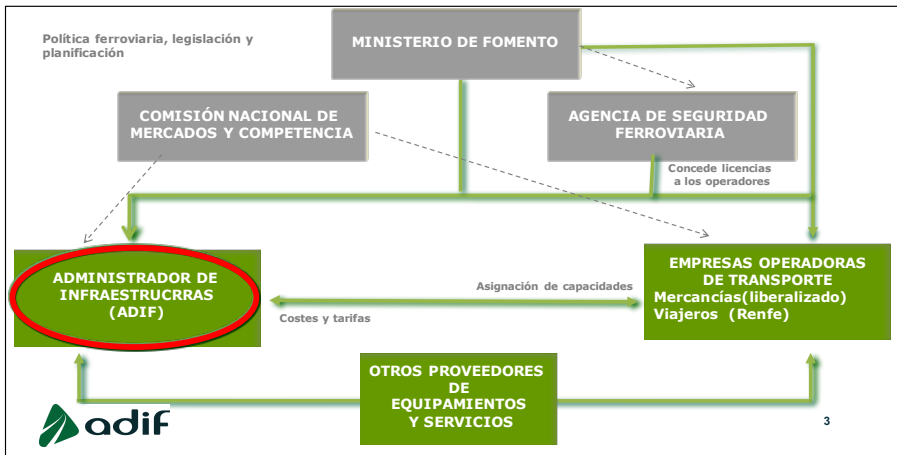
4 Efectos dinámicos

- Relevancia de la respuesta dinámica
- Cálculos paramétricos en líneas AV
- Modelos 3D – tablero de doble vía

Escenario ferroviario español

■ Nuevo marco legislativo. Ley 39/2003 del Sector Ferroviario

- 2005. La empresa ferroviaria estatal RENFE se divide en **Adif** (Administrador de Infraestructuras) y **RENFE Operadora** (Operador ferroviario encargado de las operaciones de transporte de viajeros y de mercancías).
Ambas empresas siguen siendo 100% estatales.
- Apertura del mercado ferroviario de mercancías (2007) y de viajeros (2013) a la competencia.



Adif + Adif AV. Grandes cifras

- **1ª empresa inversora del país, 51.000 M Euros en los últimos 25 años**

En el periodo 2007-2016 42.000 M€:

Alta Velocidad:	36.000 M€
Red Convencional:	6.000 M€

- **Plantilla:** 13.041 empleados
- **Activos:** > 55.000 M€
- **Red ferroviaria gestionada: 15.296 km**

Alta Velocidad ancho UIC (1.435 mm):	2.590 km
Red convencional ancho ibérico (1.668 mm)	11.483 km
de los cuales con parámetros de AV	616 km
Ancho mixto (ambos):	119 km
de los cuales con parámetros de AV	22 km
Vía estrecha (1.000 mm)	1.207 km

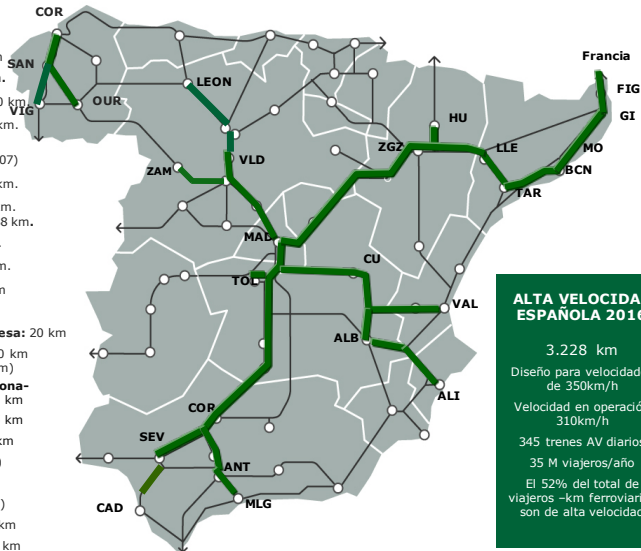
- **Líneas AV en proyecto y construcción:** 2.779 km
- **Red de fibra óptica:** 17.868 km
- **Estaciones:** > 1.900
- **Tráfico gestionado:** 2,1 M trenes/año
468 millones de viajeros transportados anualmente (35 M son AV)
7.557 millones de toneladas netas-km anuales



Hitos en alta velocidad

La red española, una evolución continuada desde 1992

- 1992 - Madrid-Sevilla: 471 km
- 2003 - Madrid-Lleida: 468 km
(200 km/h ASFA).
- Zaragoza-Huesca: 79 km
- 2005/06 Lleida-Tarragona: 95 km.
- Córdoba-Antequera: 100 km.
- Conexión a Toledo : 21 km.
- 2007 - Madrid-Lleida: 468 km
(300 km/h desde Mayo 2007)
- Madrid-Valladolid: 181 km.
- Antequera-Málaga: 55 km.
- 2008 - Tarragona-Barcelona: 88 km.
- 2010 - Madrid-Cuenca: 183 km.
- Madrid-Albacete: 315 km.
- Madrid-Valencia: 391 km
- Mollet - Girona: 75 km
- Conexión frontera francesa: 20 km
- 2011 - Ourense - A Coruña: 150 km
(Ancho ibérico 1.668 mm)
- 2013 - Nueva Conexión Barcelona-Frontera francesa 131 km
- Albacete - Alicante: 165 km
- 2015 - Santiago C. - Vigo: 94 km
(Ancho ibérico 1.668 mm)
- Sevilla - Cádiz: 71 km
(Ancho ibérico 1.668 mm)
- Valladolid - León: 163 km
- Olmedo - Zamora: 103 km



ALTA VELOCIDAD ESPAÑOLA 2016

3.228 km

Diseño para velocidades de 350km/h

Velocidad en operación 310km/h

345 trenes AV diarios

35 M viajeros/año

El 52% del total de viajeros -km ferroviarios son de alta velocidad

Mejora de Líneas

- Desdoblamiento de vía (desde vía única)
- Nuevas variantes para incrementar la velocidad
- Vía con carril UIC60 y traviesas monobloc
- Instalación de nuevos desvíos sin juntas aislantes :

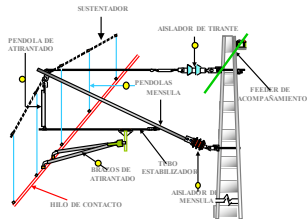
Paso por Vía desviada : 100 km/h

Vías de estacionamiento: 100 km/h

- Nueva Catenaria para 220 Km/h
- Nuevos equipos de Señalización
- Eliminación de Pasos a Nivel
- Vallado
- Eliminación de tramos metálicos (puentes) sin balasto



Catenaria CR 220



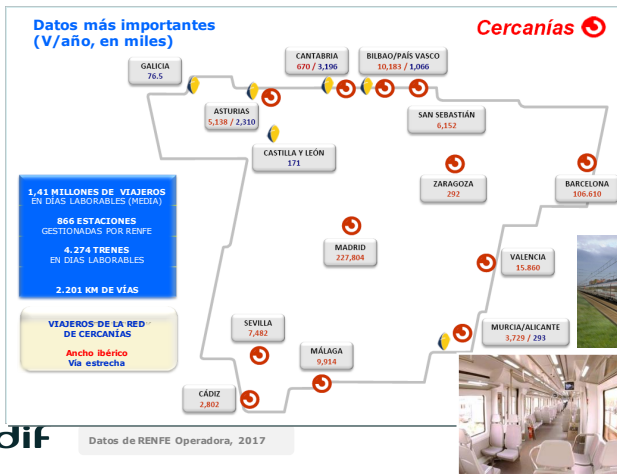
Desvíos Unificados



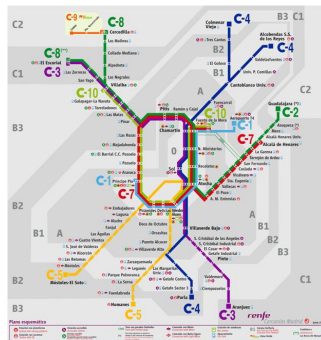
Rasgos Básicos. Datos generales

Los servicios de Cercanías ocupan un lugar primordial en el sistema de transporte español:

- Facilitan la movilidad urbana sostenible de los ciudadanos
- Evitan desplazamientos en vehículo particular
- Contribuyen a reducir la contaminación
- Forman parte del proyecto de transporte público intermodal que España está desarrollando.



Planificación y Gestión de Red



Desde el Puesto de Mando de Chamartín se gestiona la Red de Cercanías de Madrid, con más de 1.700 circulaciones diarias, con intervalos mínimos en horas punta en las líneas de mayor capacidad situados en torno a los 3 minutos

Spanish Experience in ERTMS

Still nowadays, each country still has its own rail "language" for managing the movement of the trains on its network. Rail interoperability is a key goal for Europe, so that trains can cross borders without stopping. ERTMS aims at replacing the different national train control and command systems in Europe.

The deployment of ERTMS will enable the creation of a seamless European railway system and increase European railway's competitiveness.

In addition, ERTMS is arguably the most performant train control system in the world and brings significant advantages in terms of maintenance costs savings, safety, reliability, punctuality and traffic capacity.

This explains why ERTMS is increasingly successful outside Europe, and is becoming the train control system of choice for countries such as China, India, Taiwan, South Korea and Saudi Arabia.

➤ **SPAIN IS PIONEER IN ERTMS:**

- **1.800 km of High Speed lines equipped with ERTMS** (more km than any other European country)
- ERTMS level 2 (>300 km/h. October 2011) deployed in Madrid- Barcelona line .

1 Infraestructura Ferroviaria ADIF

2 Puentes de ferrocarril

- Red convencional
- Red Alta Velocidad

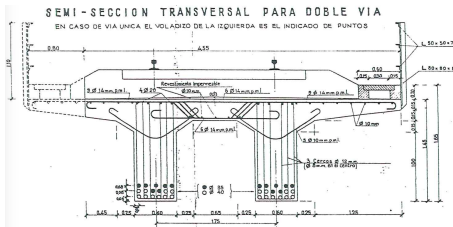
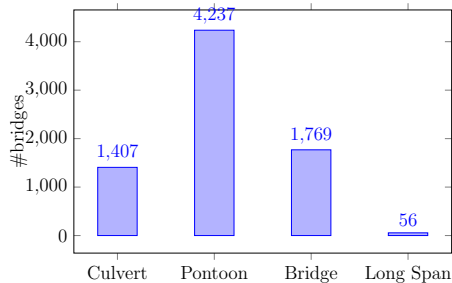
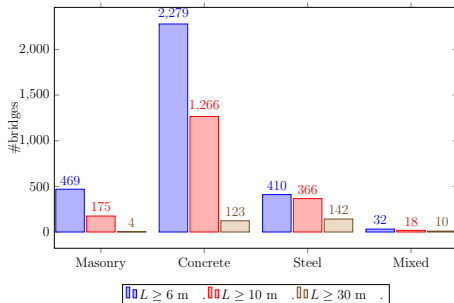
3 Requisitos y Normativa

- Aspectos a considerar
- Trenes reales, HSLM y trenes tipo
- Eurocódigos
- Interoperabilidad Red TransEuropea: ETI
- Instrucción Española IAPF

4 Efectos dinámicos

- Relevancia de la respuesta dinámica
- Cálculos paramétricos en líneas AV
- Modelos 3D – tablero de doble vía

Puentes ADIF – red convencional



Colección de losas en "I"

Viaducto Arroyo de Las Piedras



Viaducto del Río Ulla



Viaducto Arroyo del Valle



Viaducto Arroyo del Valle



Viaducto Rio Portos



Viaducto Deza



Viaducto Barbantiño

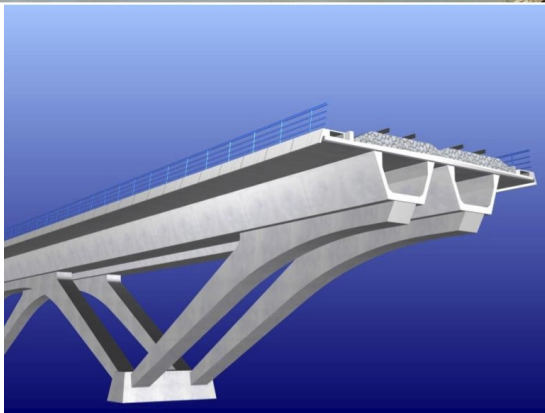


Viaducto sobre el Tajo. Arco $L = 324$ m

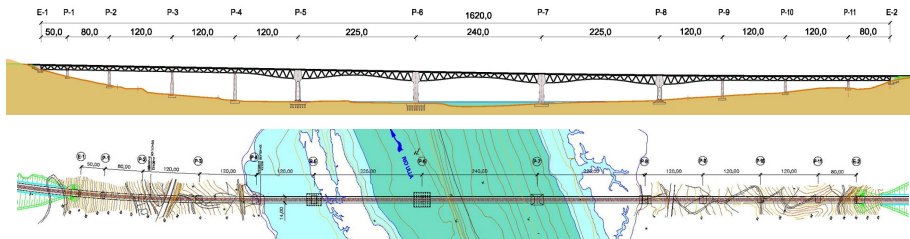


Viaducto “El Portal” sobre el río Guadalete, Cádiz

Longitud total 3221 m, Luz principal 50 m



Viaducto en la desembocadura del Ulla



Viaducto Archidona



*Viaducto de Archidona. 3.150 m de dintel mixto sin juntas de dilatación
L.A.V. Antequera - Granada*

Viaducto Archidona



Contreras – Viaducto del Istmo



Viaducto del Llobregat



Viaducto sobre el Ebro $L = 120$ m



Viaducto sobre el Ebro. Proceso de empuje



Derrumbe - Viaducto O Carballiño

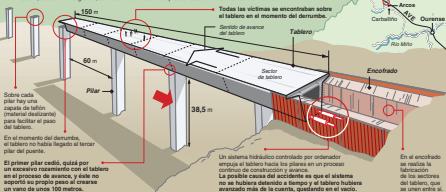


Accidente mortal en las obras del AVE en Galicia

Un viaducto en construcción de la línea del AVE entre Ourense y Santiago de Compostela se derrumbó ayer causando un muerto y cuatro heridos. El accidente se produjo cuando se procedía a empujar el tablero sobre los pilares para hacer avanzar la estructura.

PROCESO DE CONSTRUCCIÓN

- 1 Se levantan todos los pilares del puente.
- 2 En un extremo se coloca el encofrado donde se irá fabricando uno a uno, con hormigón, los sectores del tablero.
- 3 Los sectores del tablero se empujan con unos gatos hidráulicos sobre los pilares para dejar libre el encofrado y fabricar un nuevo sector.
- 4 El tablero, cada vez más grande, se va deslizando sobre los pilares hasta cubrir la totalidad del viaducto.



Sobre cada pilar hay una zapata de teflón (material deslizante) para facilitar el paso del tablero.

En el momento del derrumbe, el tablero no había llegado al tercer pilar del puente.

El primer pilar cedió, quizá por un excesivo rozamiento con el tablero en el proceso de avance, y éste no soportó su propio peso al crearse un vano de unos 100 metros.

Un sistema hidráulico controlado por ordenador empuja el tablero hacia los pilares en un proceso continuo de construcción y avance. La posible causa del accidente es que el sistema no se hubiera detenido a tiempo y el tablero hubiera avanzado más de la cuenta, quedando en el vacío.

En el encofrado se realiza la fabricación de los sectores del tablero, que se unen entre sí.

Viaductos de Contreras



1 Infraestructura Ferroviaria ADIF

2 Puentes de ferrocarril

- Red convencional
- Red Alta Velocidad

3 Requisitos y Normativa

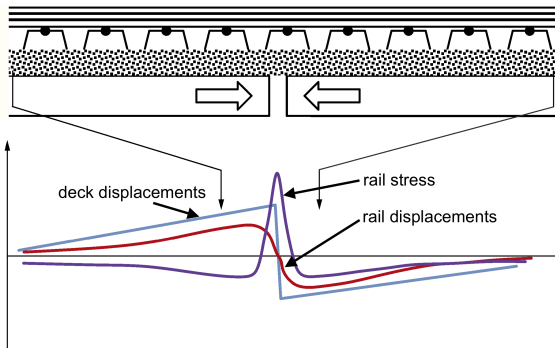
- Aspectos a considerar
- Trenes reales, HSLM y trenes tipo
- Eurocódigos
- Interoperabilidad Red TransEuropea: ETI
- Instrucción Española IAPF

4 Efectos dinámicos

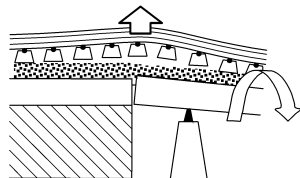
- Relevancia de la respuesta dinámica
- Cálculos paramétricos en líneas AV
- Modelos 3D – tablero de doble vía

Interacción Vía-Estructura

Posibles tensiones o movimientos excesivos del carril en juntas de tablero



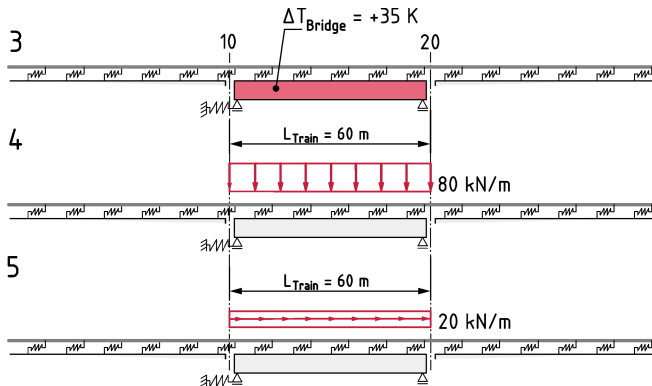
Tensiones elevadas en carril por desplazamientos debidos a acciones térmicas y de frenado, en tableros continuos de gran longitud



Rotaciones en extremos del tablero:
desplazamientos del carril no admisibles para seguridad de circulación

Interacción Vía-Estructura

Acciones a considerar: tablero corto, carril continuo con BLS



load cases

Interacción Vía-Estructura

Aparatos de Dilatación de Vía para tableros largos



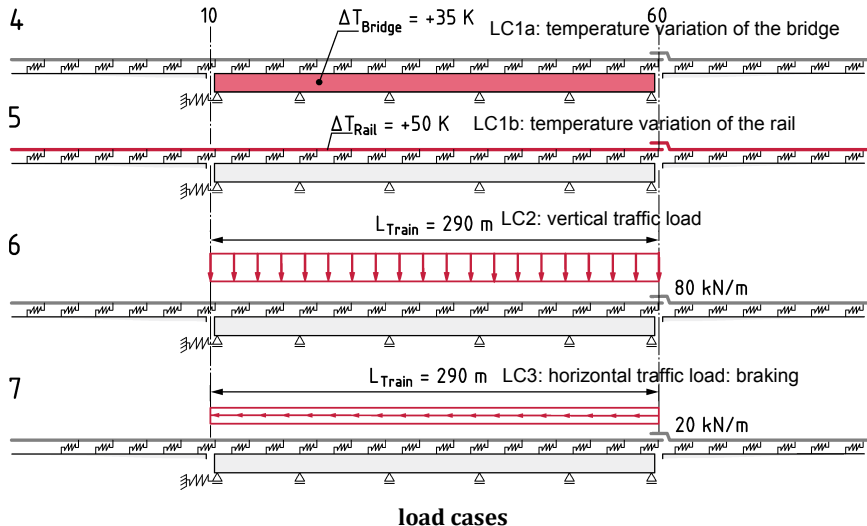
Figure 13 — Rail expansion joint (REJ) in ballasted track



Figure 14 — Rail expansion joint (REJ) in embedded rail

Interacción Vía-Estructura

Acciones a considerar: tablero largo, con aparato de dilatación de vía



TECHNICAL REPORT

CEN/TR 17231

RAPPORT TECHNIQUE

TECHNISCHER BERICHT

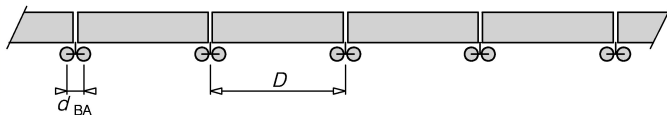
August 2018

ICS 91.010.30; 93.040

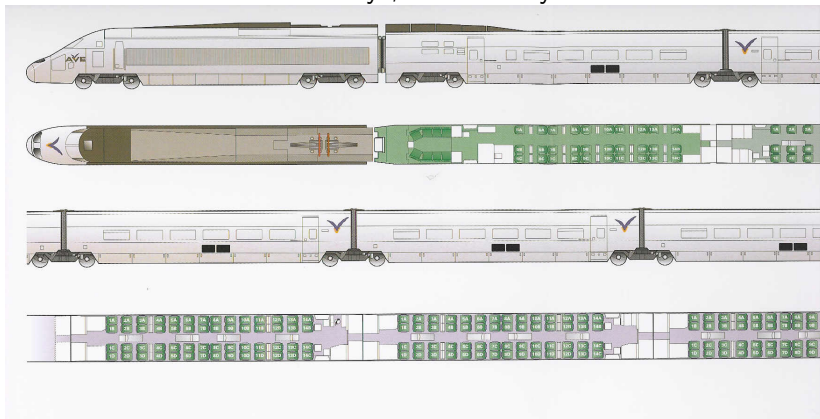
English Version

Eurocode 1: Actions on Structures - Traffic Loads on Bridges - Track-Bridge Interaction

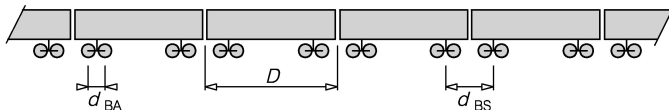
Trenes de Alta Velocidad: Articulados



Articulados: Thalys, AVE-S101 y Eurostar.

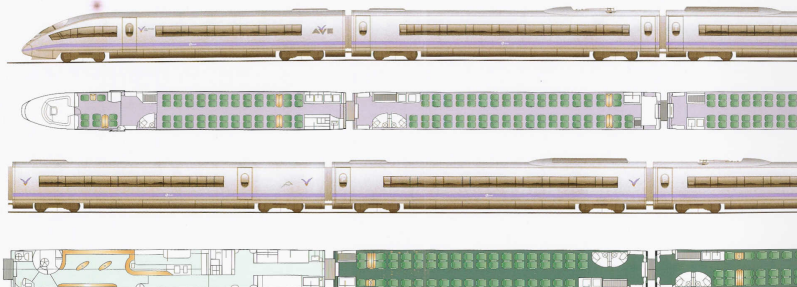


Trenes de Alta Velocidad: Convencionales

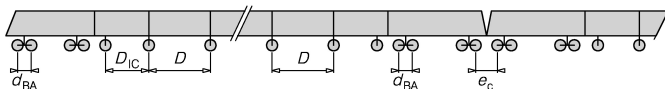


Convencionales: Ice2, AVE-S103, Etr-y, Virgin.

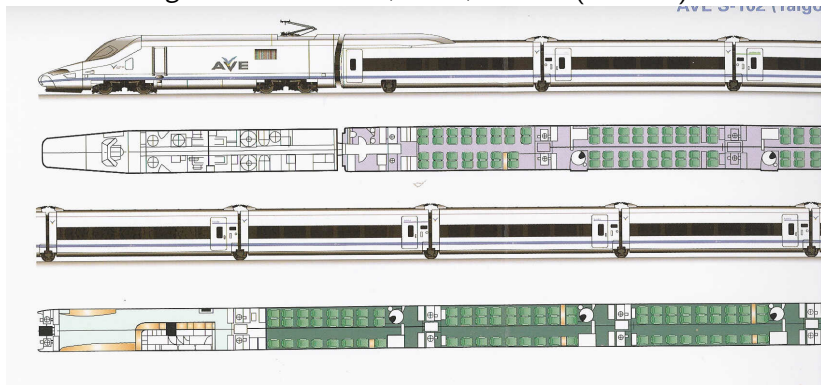
AVE S-103 (Siemens)



Trenes de Alta Velocidad: Regulares



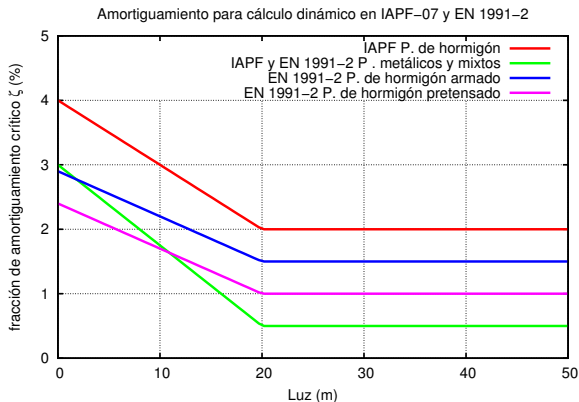
Regulares: AVE-S102, S104, S112.5 (TALGO).



Consecuencias para el Proyecto

Es necesario considerar:

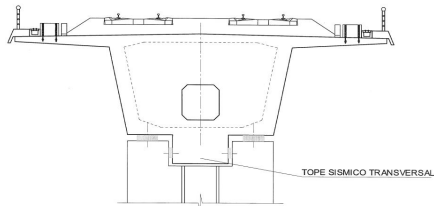
- Efectos dinámicos
- Todas las velocidades de circulación, con margen de 20 %
- Todos los posibles trenes (HSLM: interoperabilidad)



Tope sísmico



Ejemplo de plataforma metálica en tope sísmico



norma española

UNE-EN 1991-2

Octubre 2004

TÍTULO

Eurocódigo 1: Acciones en estructuras

Cargas de tráfico en puentes

Eurocódigos – EN 1991-2

UNE-EN 1991-2 – Eurocódigo 1 parte 2

- Acciones en estructuras: cargas de tráfico en puentes (2003 to 2020)
- No incluye criterios de diseño (UNE-EN 1990) ni relacionados con materiales (UNE-EN 1992, UNE-EN 1993)
- 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 la interacción vía/estructura
- otras acciones: aerodinámicas, descarrilamiento, fatiga
- Grupos de cargas (combinaciones)
- Anejo Nacional (ES): 2016
- Revisión 2010–

norma española

UNE-EN 1990:2003/A1

Julio 2010

TÍTULO

Eurocódigos

Bases de cálculo de estructuras

UNE-EN1990 Anejo A2 – Eurocódigo 0, Aplicación a puentes

- Bases de diseño estructural – Anejo A2 Aplicación a puentes (2005 to 2021)
- 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) $f > 1,2 \text{ Hz}$;
- Anejo Nacional (ES): 2016
- Revisión 2010–2021

**REGLAMENTO (UE) N° 1299/2014 DE LA COMISIÓN
de 18 de noviembre de 2014**

**relativo a las especificaciones técnicas de interoperabilidad del subsistema «infraestructura» en el
sistema ferroviario de la Unión Europea**

(Texto pertinente a efectos del EEE)

Interoperabilidad Red TransEuropea: ETI

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); Códigos de tráfico P1 ($v > 250$ km/h), P2 ($v > 200$ km/h), ...)
- ETI's: 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 (condiciones para mejora o sustitución de puentes)
- 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).

serie normativas



Instrucción de acciones a considerar en puentes de ferrocarril (IAPF)



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE FOMENTO

IAPF-2007 – Instrucción de Acciones en Puentes de Ferrocarril

- Documento completo para puentes de ferrocarril: incluye no sólo acciones, también criterios de diseño
- Incluye acciones de viento, térmicas, nieve, ...
- 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)
- Revisión 2010

1 Infraestructura Ferroviaria ADIF

2 Puentes de ferrocarril

- Red convencional
- Red Alta Velocidad

3 Requisitos y Normativa

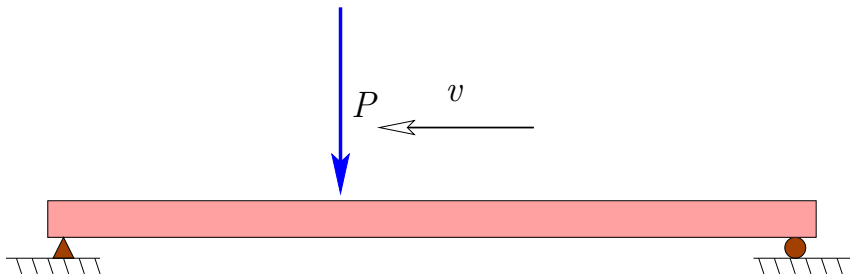
- Aspectos a considerar
- Trenes reales, HSLM y trenes tipo
- Eurocódigos
- Interoperabilidad Red TransEuropea: ETI
- Instrucción Española IAPF

4 Efectos dinámicos

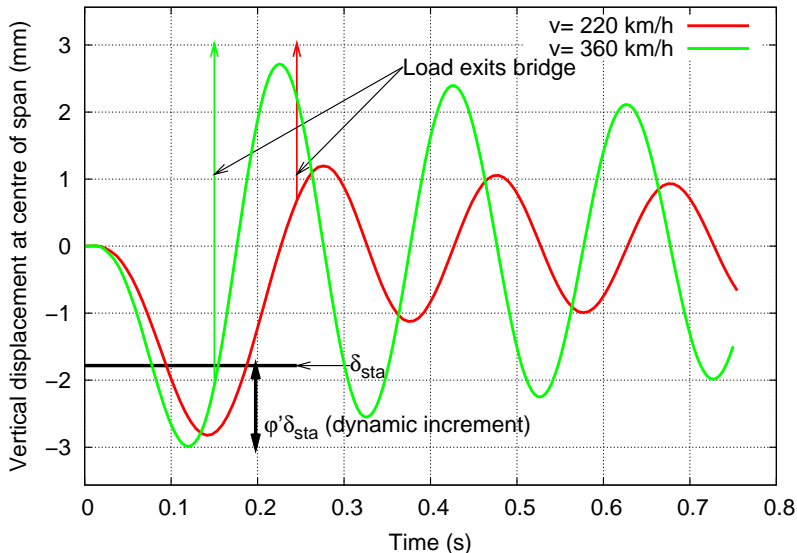
- Relevancia de la respuesta dinámica
- Cálculos paramétricos en líneas AV
- Modelos 3D – tablero de doble vía

Puentes ffcc Alta Velocidad

Carga móvil sobre puente

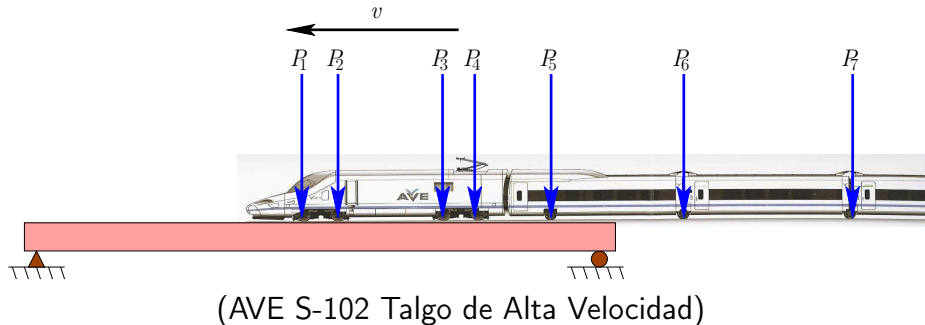


Efecto dinámico de carga móvil: $(1 + \varphi')\delta_{sta}$



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

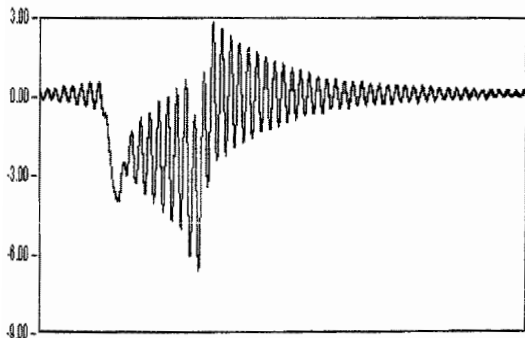
Efecto dinámico de un tren de cargas



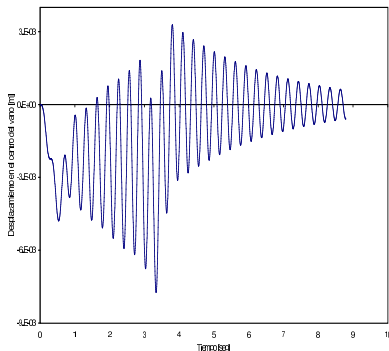
Viaducto del Tajo (Madrid–Sevilla)

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

Respuesta dinámica vertical

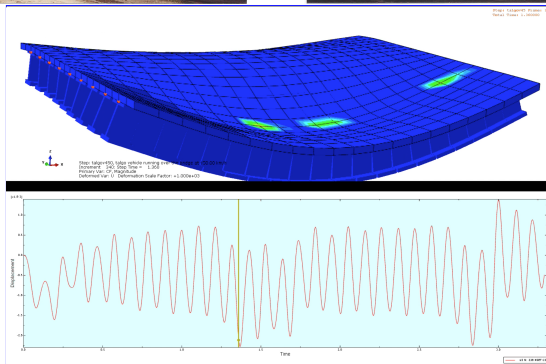


Desplazamientos medidos [MFom 96]

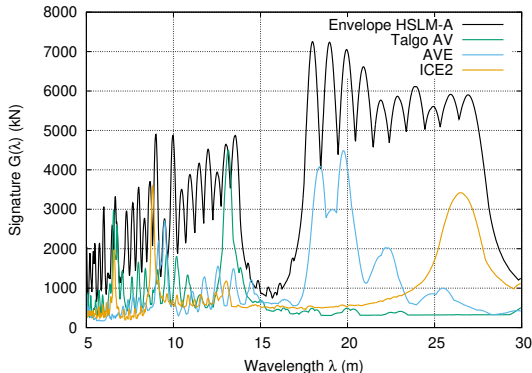


Desplazamientos calculados [Domínguez 99]

Modelo 3D de viaducto para ferrocarril AV



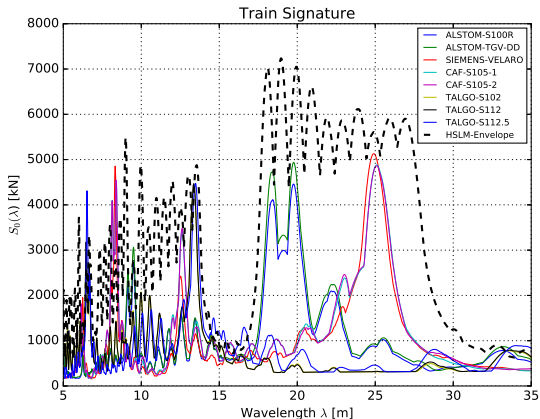
Signatures and HSLM Envelopes



The concept of dynamic train signature, defined in [ERRI-D214 RP9, 1999], is obtained as the limit for $\zeta \rightarrow 0$ (and eliminating the term $2\pi/\lambda$ in DER):

$$S_0(\lambda) = \max_{i=1}^N \sqrt{\left(\sum_{k=1}^i F_k \cos \frac{2\pi x_k}{\lambda} \right)^2 + \left(\sum_{k=1}^i F_k \sin \frac{2\pi x_k}{\lambda} \right)^2}$$

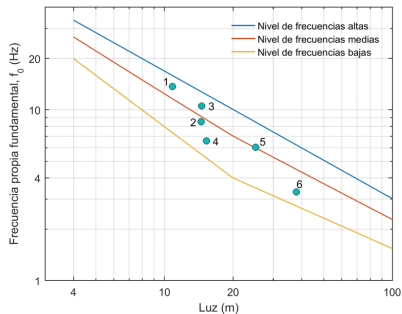
Envolvente HSLM y trenes actuales AV



- AVE S103: Siemens Velaro E
- TGV-DD: Alstom double decker
- AVE S112.5: Talgo Avril

LAV Madrid–Sevilla

Estructuras isostáticas de la LAV Madrid-Sevilla



Punto	Puente	Luz (m)	Frecuencia propia fundamental (Hz)	Masa por unidad de longitud (t/m)
1	Nº 31	10,85	13,71	21,91
2	Nº 11	14,5	8,53	23,07
3	Nº 15	14,6	10,57	21,65
4	Nº 13	15,3	6,59	21,27
5	Nº 21	25,2	6,05	24,85
6	Nº 12	38	3,31	33,12

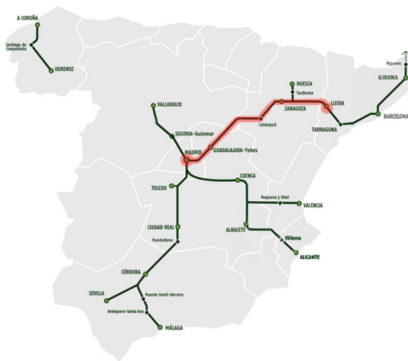
LAV Madrid-Barcelona

Estudio dinámico de puentes de ferrocarril
Madrid-Zaragoza-Barcelona-Frontera Francesa

1. Introducción

2. Descripción Línea AV

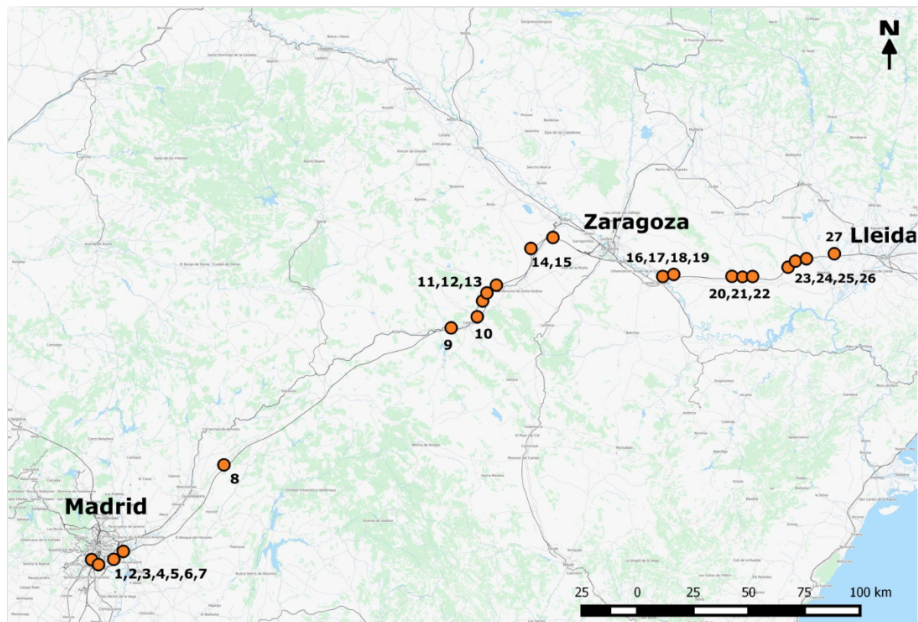
3. Estudio dinámico paramétrico



- Red Transeuropea de Transporte (TEN-T)
- Longitud de 804 km
- Velocidad de proyecto: 350 km/h
- Tramo Madrid – Zaragoza – Lleida.
- Octubre 2003
- Categoría de tráfico: P1
- Categoría de línea EN: D4

Líneas de Alta Velocidad. Adif Alta Velocidad.

Cálculos paramétricos en líneas AV

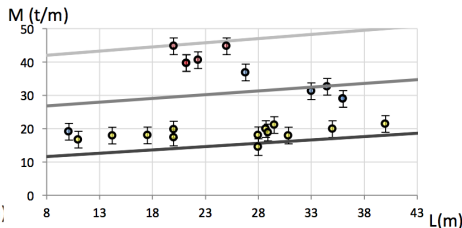
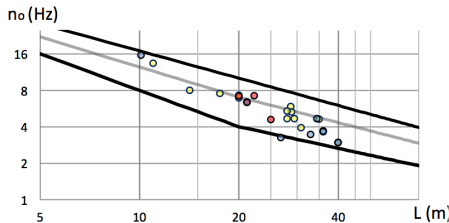
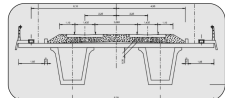
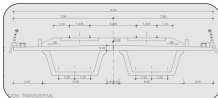
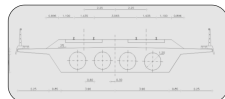
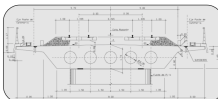


Cálculos paramétricos en líneas AV


Ejemplos de estructuras isostáticas



Ejemplos de estructuras isostáticas



CALDINTAV – 1



CALDINTAV 3.0

Project Name

eb15

Project Summary

Bridge:

B.C.: Pinned
Spans: 1
Skewness: No
Status: COMPLETED

Trains:

Total trains: 13
Status: COMPLETED

Anal. Opt.:

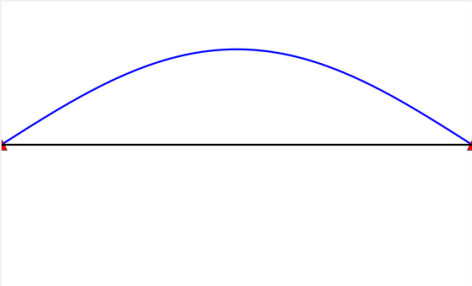
Min. Speed: 180.0 km/h
Max. Speed: 350.0 km/h
Speed incr.: 5.0 km/h
No. Modes: 1
Time step: 0.001 s
Status: COMPLETED

Global

Process: COMPLETED

Submit Job

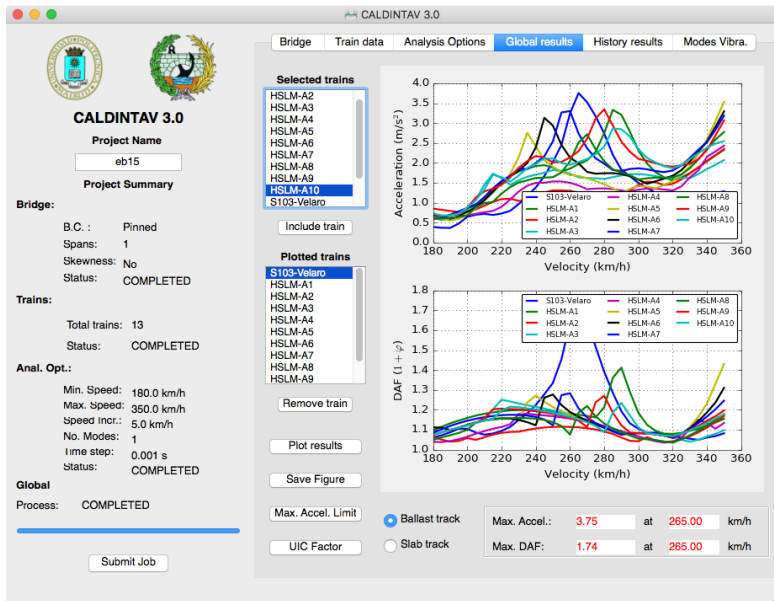
BRIDGE TRAIN DATA ANALYSIS OPTIONS GLOBAL RESULTS HISTORY RESULTS **Modes Vibra.**



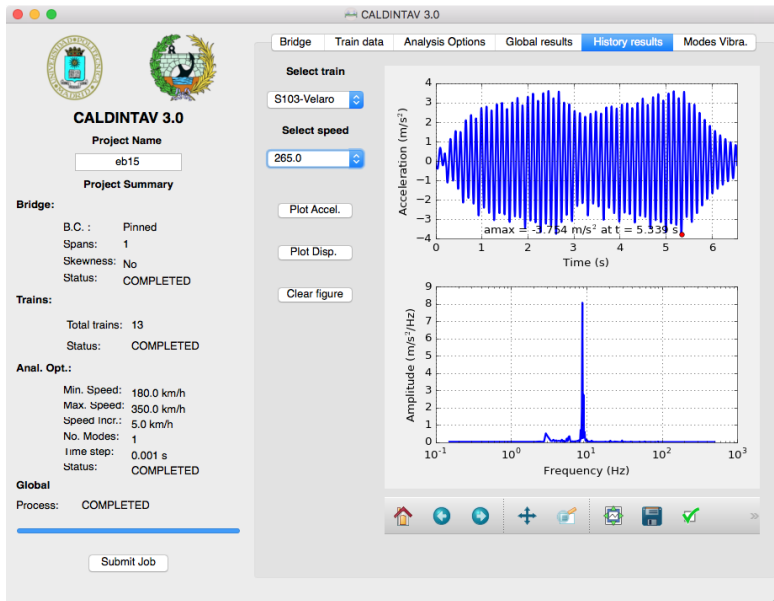
Vibration mode number: 1

Frequency (Hz): 8.920

CALDINTAV – 2



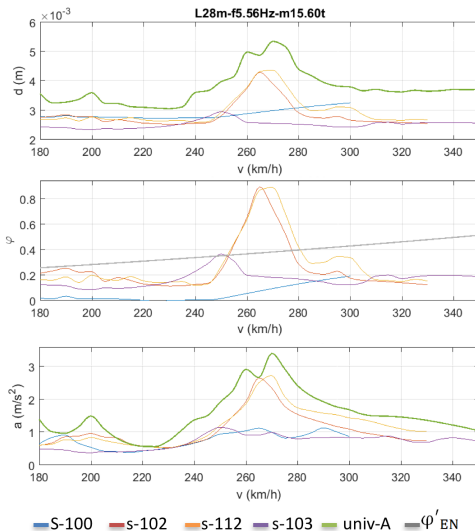
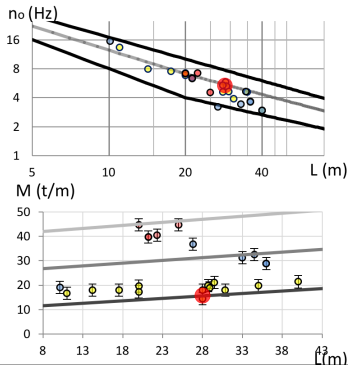
CALDINTAV – 3



Resultados de cálculo paramétrico (1)

APÉNDICE B: Resultados de los cálculos dinámicos

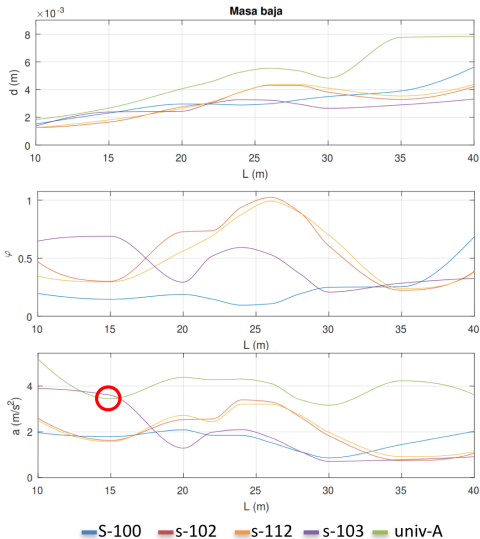
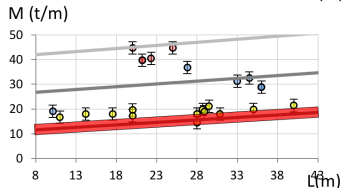
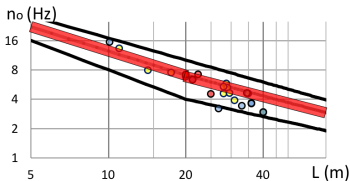
Ejemplo de envoltente primaria para luces de 28 m, frecuencia propia media y masa baja.



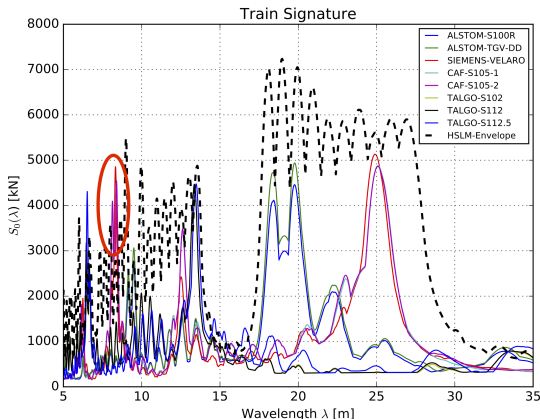
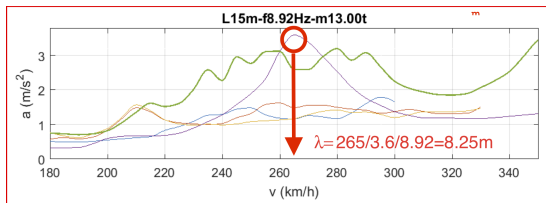
Resultados de cálculo paramétrico (2)

APÉNDICE B: Resultados de los cálculos dinámicos

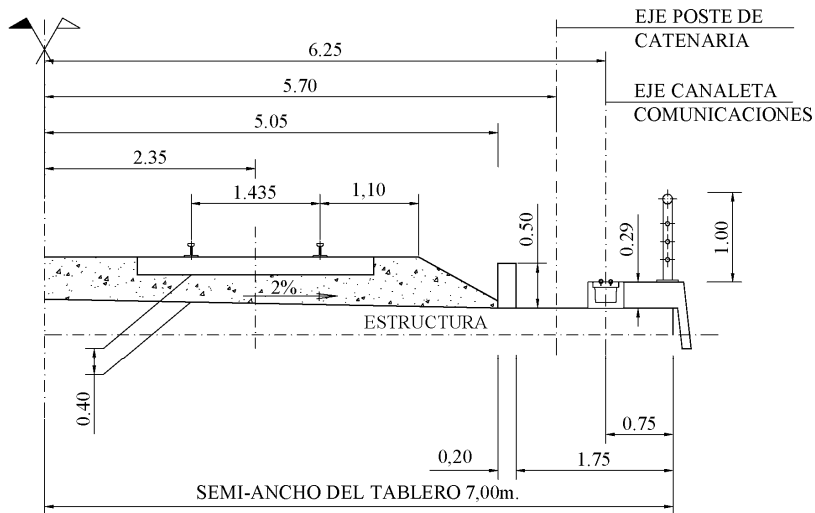
Ejemplo de envolvente de segundo orden para frecuencia propia media y masa baja.



Resultados de cálculo paramétrico (3)



Sección tipo ADIF – doble vía con balasto



Modelos 3D – tablero de doble vía

