

Ensayos de laboratorio a escala 1:1 en el CEDEX para determinar el comportamiento a corto y largo plazo de líneas de alta velocidad

V. CUÉLLAR (*), F. NAVARRO (**), M. A. ANDREU (***), J. L. CÁMARA (****) F. GONZÁLEZ (****),
M. RODRÍGUEZ (*****), A. NÚÑEZ (*****), P. GONZÁLEZ (*****), J. NAVARRO (*****)
y R. RODRÍGUEZ (*****)

RESUMEN En este artículo se describen los resultados obtenidos en la célula de ensayos del CEDEX con modelos físicos de 21 m de longitud, 4 m de altura y 5 m de anchura que, reproduciendo a escala 1:1 dos secciones de vía de alta velocidad, una con subbalasto granular y otra con subbalasto bituminoso, se han visto sometidos a millones de cargas por eje durante el proceso de simulación, en forma acelerada, del tráfico de trenes de pasajeros circulando a velocidades comprendidas entre 300 y 360 km/h. Se explica el sistema de carga utilizado y se demuestra su capacidad para reproducir los efectos que tienen en una vía real las cargas verticales de ejes y bogies cuando se mueven horizontalmente a distintas velocidades. Se analiza la influencia que tienen las operaciones de bateo en la fatiga del balasto y se ha determinado una ley empírica que proporciona las compresiones irreversibles del balasto en función del número de ejes de carga al que se ha visto solicitado. También se destaca la diferencia observada en los ensayos entre los comportamientos estático y dinámico del subbalasto bituminoso. Finalmente, se han validado los resultados obtenidos en los modelos físicos con datos registrados en dos tramos de una vía real de alta velocidad con las mismas geometrías y estructuras de capas que en la célula de ensayos.

SHORT AND LONG TERM BEHAVIOUR OF HIGH SPEED LINES AS DETERMINED IN 1:1 SCALE LABORATORY TESTS

ABSTRACT *The paper describes the results obtained in CEDEX's track box where physical models 21 m long, 4 m high and 5 m wide reproducing at 1:1 scale two different sections of a high speed line, one with granular subballast and the other with bituminous subballast, have been subjected to millions of load applications simulating, in an accelerated way, the pass by, along the entire life cycle of the line, of passenger trains circulating at speeds ranging between 300 and 360 km/h. The load application system used in the tests is explained and its capability to simulate in the track box the effects induced in a real line by vertical mobile loads travelling horizontally at high speed is highlighted. The influence of tamping on the fatigue behaviour of the ballast is assessed and an empirical law reflecting the irreversible displacements experienced by that material with the number of wheel load applications has been determined. Also, the difference between the static and the dynamic behaviours of the bituminous subballast observed in the tests is underlined. Finally, the results obtained in the track models have been validated by comparing them with the measurements made in two cross sections of a real high speed line having the same geometry and bed layers.*

Palabras clave: Ensayos escala 1:1, Vía, Fatiga, Alta Velocidad, Comportamientos estático y dinámico.

Keywords: 1:1 Scale tests, Track, Fatigue, High Speed, Static and dynamic behaviours.

(*) Dr. Ingeniero de Caminos. CEDEX, Madrid, Spain. E-mail: vicente.cuellar@cedex.es

(**) Ingeniero de Caminos. CEDEX, Madrid, Spain. E-mail: francisco.navarro@cedex.es

(***) Licenciado en Ciencias Físicas. CEDEX, Madrid, Spain. E-mail: miguel.a.andreu@cedex.es

(****) Ingeniero en Electrónica. CEDEX, Madrid, Spain. E-mail: juan.l.camara@cedex.es

(*****) Ingeniero Mecánico. CEDEX, Madrid, Spain. E-mail: francisco.gonzalezsanchez@cedex.es

(*****) Licenciado en Ciencias Geológicas. ADIF, Madrid, Spain. E-mail: mrodriguez@adif.es

(******) Ingeniero de Caminos. ADIF, Madrid, Spain. E-mail: anunez@adif.es

(******) Ingeniero de Caminos. ADIF, Madrid, Spain. E-mail: pegonzalez@adif.es

(******) Ingeniero de Caminos. ADIF, Madrid, Spain. E-mail: javier.navarro@adif.es

(******) Ingeniero de Caminos. ADIF, Madrid, Spain. E-mail: rillanes@adif.es



FIGURA 1. Célula de ensayos acelerados del CEDEX.

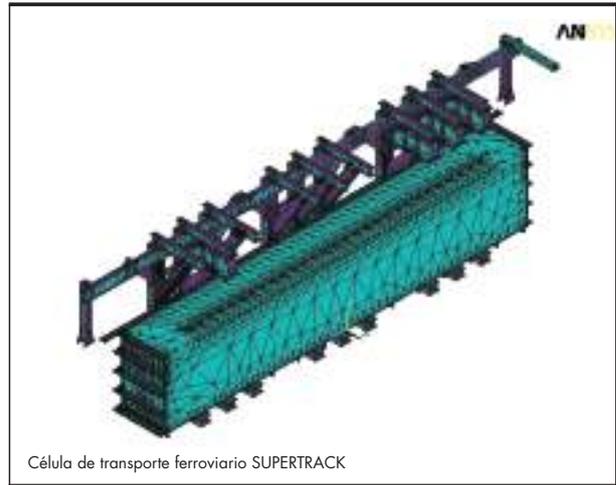


FIGURA 2. Modelo con Elementos Finitos de la célula de ensayos del CEDEX.

1. CÉLULA DE ENSAYOS ACCELERADOS DEL CEDEX

La célula de ensayos acelerados del CEDEX está constituida por un cajón experimental de 21 m de longitud, 5 m de anchura y 4 m de profundidad construida para ensayar a escala 1:1 secciones completas de vías de ferrocarril convencionales y de alta velocidad (ver Fig.1). Tiene la ventaja de que en tan solo una semana de trabajo se puede simular el tráfico anual de trenes en cualquier línea de ferrocarril. Para alimentar el sistema de cargas de la Instalación pueden utilizarse, tal y como se muestra en los párrafos siguientes, historias de carga por eje normalizadas ó historias de carga por rueda e historias de deflexiones de vía registradas al paso de los trenes en líneas reales.

La célula de ensayos consta de nueve marcos metálicos distribuidos en tres zonas diferentes (Zona 0, Zona 1 y Zona 2) tal y como se indica en la Fig. 4. En cada zona dan soporte a un sistema móvil de reacción constituido por tres grandes

vigas horizontales equipadas, cada una de ellas, con un actuador dinámico (A, B y C en la Fig.4) de 250 kN de capacidad y frecuencias de hasta 50 Hz. Los actuadores se controlan, cada uno de ellos independientemente o todos ellos simultáneamente, mediante un sistema digital (FLEXTEST) de MTS que dirige un sistema hidráulico de aceite provisto de servoválvulas de tres etapas que funcionan con un caudal de 1800 litros por minuto y una presión de 210 atmósferas.

La estructura de reacción se ha investigado en cada zona, tanto teórica como experimentalmente, para asegurar que su frecuencia natural está lejos de las frecuencias de paso de los bogies y ejes de carga de los trenes de alta velocidad circulando a velocidades de hasta 400 km/h, Manzanas et al. (2007). Dadas las dimensiones del cajón, no se han detectado efectos significativos de sus contornos (que no son completamente rígidos) en los estudios con Elementos Finitos realizados para determinar su influencia tanto en el comportamiento estático como dinámico de la vía (ver Fig.2).

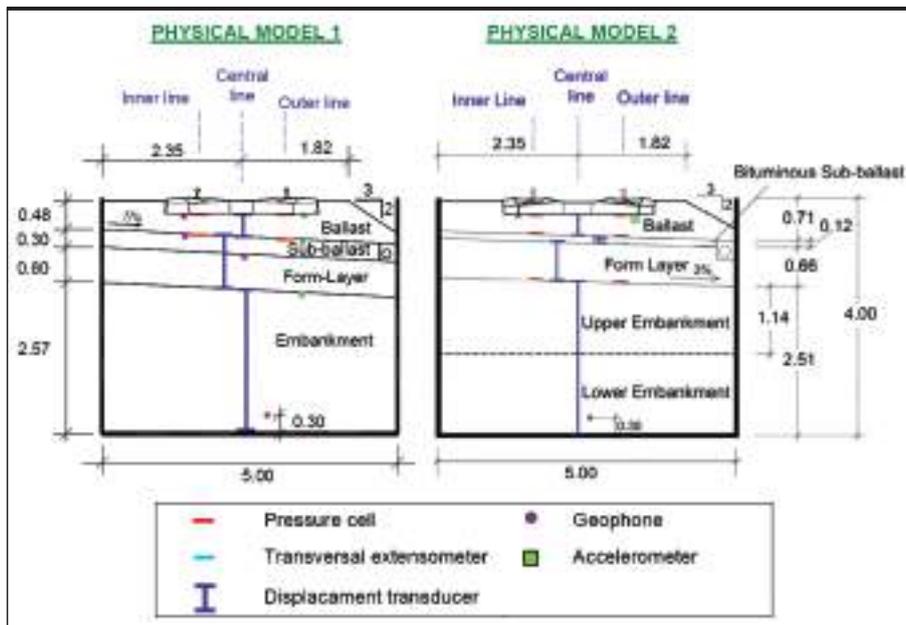


FIGURA 3. Secciones transversales de los modelos a escala 1:1 construidos en la Zona 0 del cajón.

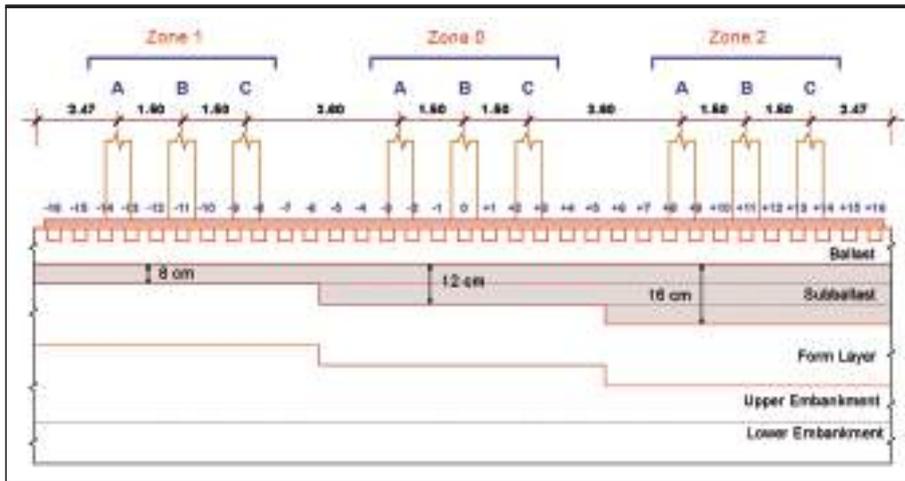


FIGURA 4. Secciones con subbalasto bituminoso ensayadas en el cajón del CEDEX.

2. MODELOS FÍSICOS

Con el fin de reproducir a escala 1:1 secciones de vía de alta velocidad, los dos modelos físicos indicados en la Fig. 3 han sido construidos en el CEDEX. La sección transversal, indicada para el modelo 1 en la Fig. 3 fue la adoptada uniformemente a lo largo del cajón, mientras que la del modelo 2 representa únicamente la parte del modelo construido en la Zona 0, comprendida entre las traviesas -6 y +6 (ver Fig. 4) en la que el espesor de subbalasto bituminoso es 12 cm. Para optimizar dicho espesor, dos secciones transversales más con

Capa de la vía	Tipo de material	ω_L %	I_p %	γ_D KN/m ³	h %	E_{v2} MPa	V_s m/s
Balasto (0,38 m)	ADIF T1			16,5			
Subbalasto (0,30 m)	SUCS GP	17,4	2	22,0	3,5	170	265
Capa de forma (0,60 m)	SUCS GP	17,4	2	21,5	4,0	165	260
Terraplén (2,445 m)	SUCS GC	25,6	7	20,2	7	160	250

TABLA 1. Propiedades de las capas granulares del modelo físico de vía 1.

Capa de la vía	Tipo de material	ω_L %	I_p %	γ_D KN/m ³	h %	E_{v2} MPa	V_s m/s
Balasto (0,36 m)	ADIF T1			16,5			
Capa de forma (0,60 m)	SUCS GP	No Plast.	No Plast.	22,5	3,5	420	400
Terraplén superior (1,215 m)	SUCS GC	45,5	32,7	17,5	10	170	280
Terraplén inferior (1,370 m)	SUCS GC	25,6	7	21,2	2	350	380

TABLA 2. Propiedades de las capas granulares del modelo físico de vía 2.

subbalasto bituminoso han sido ensayadas, cada una de ellas en una zona distinta del cajón: una con 8 cm de mezcla bituminosa en la Zona 1, entre las traviesas -6 y -16, y la otra con 16 cm en la Zona 2 entre las traviesas +6 y +16.

En las Tablas 1 y 2 se proporcionan los tipos de materiales, parámetros de estado y módulos de deformación de las capas granulares en cada uno de los modelos físicos de la Fig.3, determinados por el CEDEX (2008;2011a).

Para la mezcla bituminosa del subbalasto se determinaron las siguientes propiedades:

- Áridos
 - Fracción fina (0.063 mm/2 mm): 19.3%
 - Fracción gruesa (2 mm/25 mm): 76.4%
- Ligante
 - Tipo: B 60/70
 - Dotación mínima: 5.20% sobre masa de áridos
- Mezcla
 - Densidad Marshall (UNE EN 12697-30): 2.373 Mg/m³
 - Estabilidad Marshall (NLT-159): mayor de 13.5 KN
 - Deformación Marshall (NLT-159): 2.7 mm
 - Resistencia a la fatiga en flexotracción(NLT-350/90): $\epsilon_6 = 134.2 \mu\epsilon$
- Con datos obtenidos en testigos de 100 mm de diámetro de la mezcla bituminosa:
 - Densidad: 2,24 Mg/m³
 - Módulo dinámico a 10Hz y 29°C de la curva maestra (NLT-349/90): 3919 MPa
 - Módulo estático a 20°C de la curva maestra (NLT-349/90 & EN 12697-26): 455 MPa
 - Módulo estático a 20°C obtenido en ensayos de compresión simple: 250 MPa
- Con datos obtenidos en el material compactado mediante un deflectómetro de impacto:
 - Módulo $E_{v2} = 500$ MPa a 13°C.

A la hora de construir un modelo físico en el cajón, los sensores internos, indicados en la Fig. 3, se instalan durante el proceso constructivo intentando alterar lo mínimo posible las diferentes capas, y se realizan ensayos de control para comprobar que los materiales compactados cumplen las especificaciones de diseño. Junto a los 47 sensores internos instalados en cada zona para registrar el comportamiento

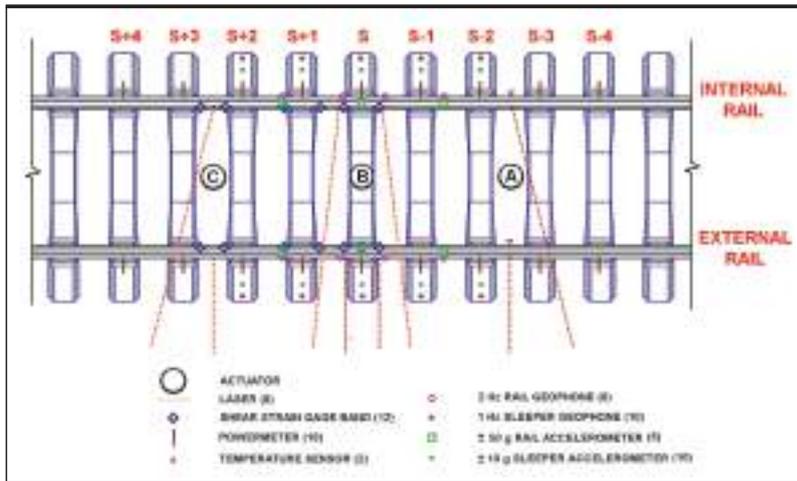


FIGURA 5. Conjunto de sensores móviles utilizados en cada zona del cajón.

estático y dinámico de las capas de asiento de la infraestructura de la vía, se utiliza el conjunto de 74 sensores móviles indicados en la Fig.5 para controlar el comportamiento de los elementos de la superestructura. Esto asciende, junto con los sensores de los actuadores, a un total de 128, los sensores que son utilizados en cada ensayo de fatiga. El alto grado, con el que un modelo físico puede ser instrumentado en la célula de ensayos del CEDEX hace de ella una herramienta ideal para calibrar modelos numéricos 3D.

Para acondicionar y amplificar las señales proporcionadas simultáneamente por todos los sensores se utiliza un equipo electrónico modular MGC PLUS de Hottinger con capacidad para 128 canales. Dichas señales se procesan mediante un programa LABVIEW conectado a un sistema ORACLE de base de datos. Para la confección de informes se utiliza también un programa DIADEM.

3. SIMULACIÓN DE CARGAS MÓVILES EN LA CÉLULA DE ENSAYOS

A través de múltiples ensayos estáticos realizados tanto in situ como en la célula de ensayos se ha comprobado que la distribución de las deflexiones de vía “y” originadas por una carga puntual se pueden predecir con bastante aproximación suponiendo un comportamiento tipo Winkler en la vía:

$$y(x) = \frac{Q}{K} \exp\left(\frac{-|x|}{L}\right) \left[\cos\left(\frac{|x|}{L}\right) + \operatorname{sen}\left(\frac{|x|}{L}\right) \right] \quad [3.1]$$

donde

Q = Carga puntual

x = Distancia horizontal al punto cargado de la vía

K = Rigidez de vía = $\frac{Q}{y_{\max}}$ con y_{\max} determinada en $|x| = 0$

L = Longitud elástica de vía = $\sqrt{\frac{8EI}{K}}$ siendo EI la rigidez a flexión del carril

Una vez definida la curva de Winkler, el porcentaje de carga Q absorbido por cada traviesa, (la llamada reacción de traviesa), puede determinarse fácilmente a través del módulo de vía, concepto éste ampliamente aceptado en la ingeniería

de ferrocarriles. Aplicando dicho concepto, puede demostrarse que dichos porcentajes prácticamente coinciden con las ordenadas de la curva de Winkler en cada traviesa divididas por el valor y_{\max} . Por otro lado, suponiendo que la carga Q se mueve horizontalmente sobre la vía a una cierta velocidad, “v”, la deflexión que experimenta un punto determinado de la vía cuando la carga puntual se acerca a dicho punto, pasa sobre él y se aleja viene dada por la siguiente expresión:

$$y(x,t) = \frac{Q}{K} \exp\left(\frac{-|x-vt|}{L}\right) \left[\cos\left(\frac{|x-vt|}{L}\right) + \operatorname{sen}\left(\frac{|x-vt|}{L}\right) \right] \quad [3.2]$$

donde la variable $|x|$, en el dominio $0 \leq |x| \leq \frac{3}{4} \pi L$, ahora representa la distancia entre el punto considerado y la carga puntual móvil en cada instante de tiempo “t”.

Para $x = 0$, la historia temporal de deflexiones dada por la ec.[3.2] representa también la que se habría obtenido en ese punto aplicando en él una carga vertical inamovible cuyo valor en cada instante “t” viniese dado por el producto de la deflexión “y” y la rigidez de vía K. Si bien dicha historia de cargas verticales inamovibles es capaz de simular correctamente el efecto del paso de los ejes y bogies de un tren por una traviesa, es incapaz de reproducir las historias de las reacciones que se producen en las traviesas contiguas de una vía real. Con el fin de intentar reproducir dichas historias en un tramo de vía de 3,5 m de longitud, con 7 traviesas separadas entre sí 0,60 m, se han utilizado en cada zona del cajón 3 actuadores separados entre sí 1,5 m y cada uno de ellos se ha alimentado con la misma historia de cargas inamovibles descrita en el punto anterior, una vez desfasadas teniendo en cuenta la velocidad horizontal de paso que se quiere simular en el ensayo. De esta forma, en cada instante de tiempo “t” las 7 traviesas experimentan reacciones inducidas simultáneamente por los tres actuadores que se combinan para dar el valor instantáneo de la reacción en cada una de ellas. Comparando la historia de las reacciones producidas en cada una de las 7 traviesas por la acción simultánea de los tres actuadores con las historias de reacciones que en ellas se producirían en una vía real al paso de los ejes y bogies de un tren (las mismas en cada traviesa) se pueden determinar los factores de corrección que hay que aplicar a las cargas verticales de cada actuador para tener en cuenta la separación entre ellos.

En la Figura 6 se muestran, para las 7 traviesas, los dos tipos de historias de reacción en traviesa obtenidas, para el modelo físico de vía 2 ($K = 125 \text{ KN/mm}$ $L = 0,700 \text{ m}$), cuando un bogie de 3 m de empuje con carga por eje de 165 kN se

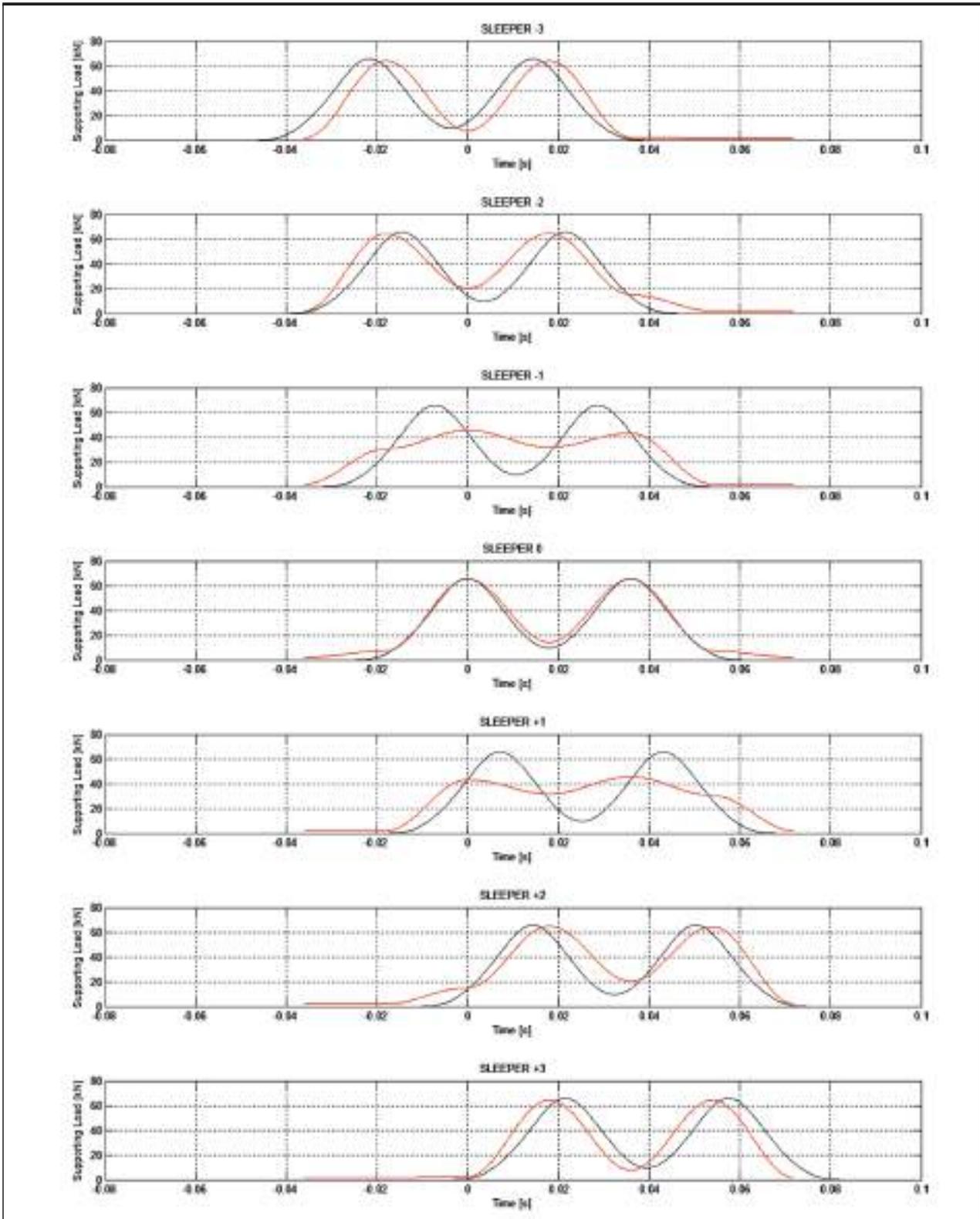


FIGURA 6. Historias teóricas (en negro la que se obtendría en una vía real y en rojo las debidas al efecto conjunto de los tres actuadores) de las reacciones en traviesas generadas por un bogie circulando a 300 km/h desde la traviesa - 3 a la +3 en el modelo físico de vía 2.

desplaza a 300 km/h desde la traviesa -3 a la +3: en negro, la misma curva teórica para todas las traviesas, representando las historias de cargas que se obtendrían en la vía real y en rojo las curvas teóricas que reflejan el efecto combinado de los tres actuadores. Para la obtención de éstas últimas se han aplicado factores de corrección de 0,98 y 1,14 respectivamente a la amplitud de las cargas proporcionadas por el actuador central y los dos laterales.

Las historias de las reacciones en traviesa representadas en negro y rojo en la Figura 7 corresponden a un "zoom" de las que aparecen en la Figura 6 para la traviesas 0, +1 y +2. En verde se han dibujado las curvas experimentales obteni-

das mediante bandas extensométricas de cortante que se pegaron en la fibra neutra de los carriles a ambos lados de las traviesas 0, +1 y +2 tal y como se muestra en la Fig. 5. La técnica utilizada para la interpretación de dichos datos ha sido la misma que la puesta a punto por el CEDEX para obtener la carga por rueda de trenes de alta velocidad en el proyecto europeo INNTRACK (2009). Puede observarse que, exceptuando la traviesa +1, las curvas experimentales reproducen ajustadamente las historias teóricas de las reacciones de las demás traviesas, incluso los picos de la historia en negro para la traviesa +1 se reproducen experimentalmente mejor (curva verde) que lo que predice la teoría (curva roja).

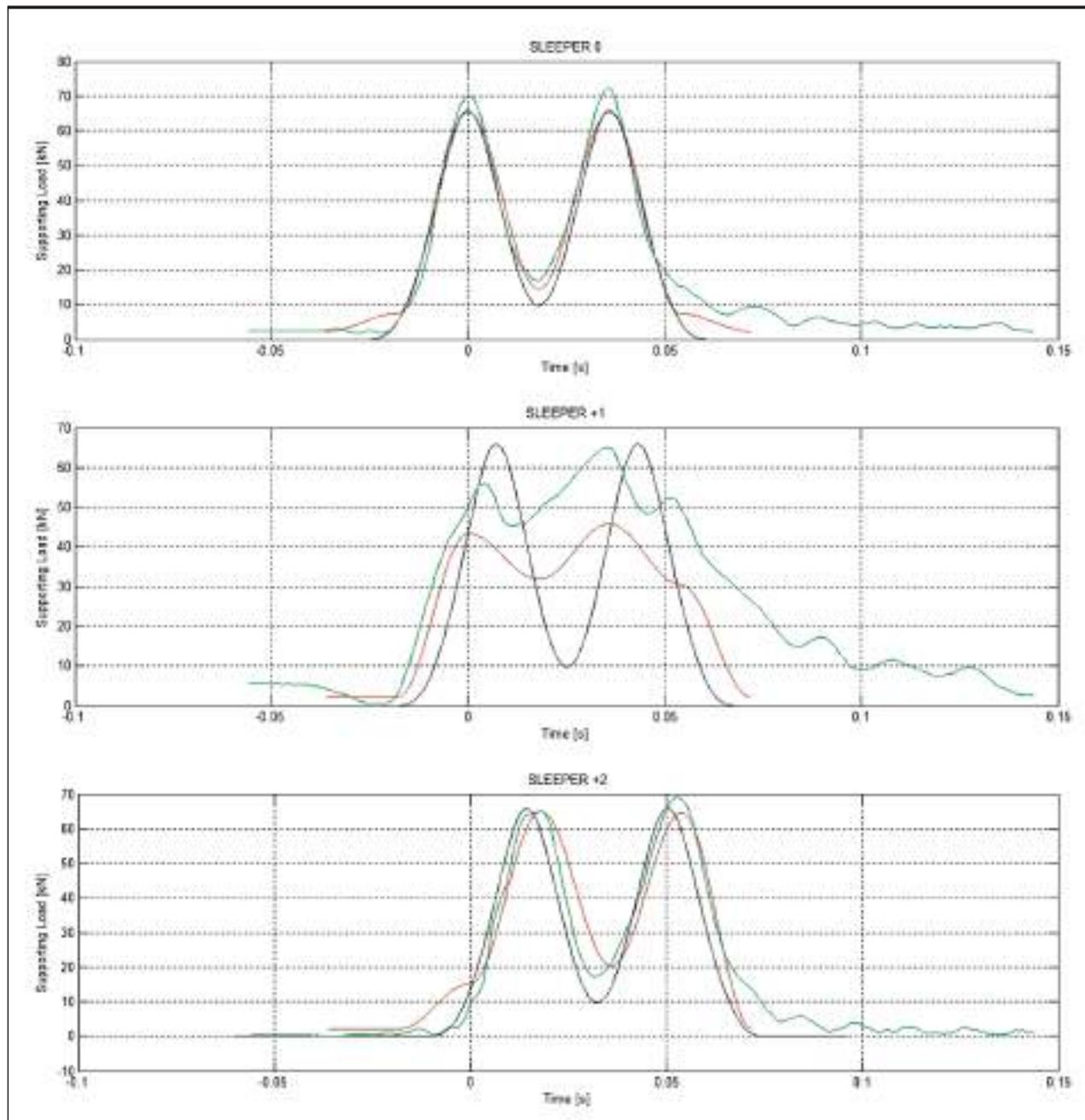


FIGURA 7. Historias de reacciones en traviesas, experimental (en verde) y teóricas (en negro y rojo) obtenidas para un bogie con 3 m de empate y cargas por eje de 165 kN circulando a 300 km/h desde la traviesa 0 a la +2 en el modelo físico de vía 2.

4. ENSAYOS DE FATIGA

Utilizando la metodología recién descrita se ha simulado el paso de dos tipos de trenes en el modelo físico 2: un Eurostar de 400 m de longitud con 50 ejes (ver Figura 8) circulando a 300 y 360 km/h y un ICE de 200 m con 32 ejes (ver Figura 9) a 360 km/h. En ambos casos se ha adoptado una carga uniforme por eje de 165 kN. En los espectros de Fourier de las historias de carga de cada uno de dichos trenes pueden identificarse fácilmente las frecuencias de 7, 27 y 40 Hz asociadas a la longitud de los vagones y a los empates de 3 m y 2,5 m de los trenes Eurostar e ICE respectivamente.

Para ejecutar los ensayos de fatiga en el modelo 2 se ha simulado el paso de ambos tipos de trenes con un intervalo de 2 segundos entre unidades consecutivas. De esta manera se han aplicado 4M de ejes de carga a cada una de las Zonas del modelo 2. Cada millón de ejes (el número adoptado para realizar cada ensayo de fatiga, más ó menos equivalente al tráfico que soporta una línea de alta velocidad española durante dos años de servicio) se realizaron ensayos estáticos con cada uno de los actuadores para poder seguir la evolución de las propiedades mecánicas de la vía antes de volver a batear el balasto con la bateadora autónoma de la instalación.

4.1. COMPORTAMIENTO A CORTO PLAZO

De los resultados obtenidos en los ensayos estáticos realizados en las distintas Zonas del modelo 2 se deduce que la rigidez de vía se mantiene prácticamente constante, alrededor de 130 kN/mm, en cada uno de los ensayos de fatiga de 1 M de ejes. Las compresión del balasto, que osciló entre 0,260 y 0,360 mm al principio de los ensayos y entre 0,245 mm y

0,350 mm al final, representa el 45% de las deflexión del carril y las compresiones de la capa de forma y del terraplén el 20%. La compresión del subbalasto bituminoso tan sólo alcanzó el 3% de dicha deflexión. La deformación a tracción de la fibra inferior del subbalasto bituminoso fue la misma al principio y al final de cada ensayo de fatiga del carril y osciló entre 40 y 70 $\mu\epsilon$ dependiendo del espesor de la capa. Dichos valores, muy por debajo del valor $\epsilon_6 = 134,2 \mu\epsilon$ obtenido en laboratorio con testigos de la muestra bituminosa empleada, indican que no se produce fatiga a flexotracción en las capas de subbalasto bituminoso utilizadas en el modelo.

Los ensayos de fatiga en el modelo 1 se realizaron simulando el paso a 300 km/h de un tren Eurostar de 200 m de longitud con 26 ejes y cargas por eje que oscilaron entre 120 kN y 170kN. Al ser éstos los primeros ensayos de fatiga que se realizaron en el cajón se obtuvieron menos datos que con el modelo 2. No obstante, de los ensayos estáticos realizados al principio y final de cada ensayo de fatiga con 1 M de ejes se obtuvieron valores de rigidez de vía en torno a los 100 kN/mm. De igual manera que en modelo 2, la compresión del balasto fue el 45% de la deflexión del carril y el conjunto de las deflexiones de las restantes capas de asiento del modelo llegó a ser el 30% de esa deflexión.

Las rigideces de vía calculadas en ambos modelos a partir de la amplitud de los desplazamientos verticales de los carriles obtenidos durante los procesos de simulación del paso de trenes a distintas velocidades fueron un 5% inferiores a los valores obtenidos en los ensayos estático. Para la capa de subbalasto bituminoso se obtuvo en el modelo 2 un módulo de Young dinámico 2,2 veces mayor que el obtenido en ensayos de compresión simple con testigos de la mezcla

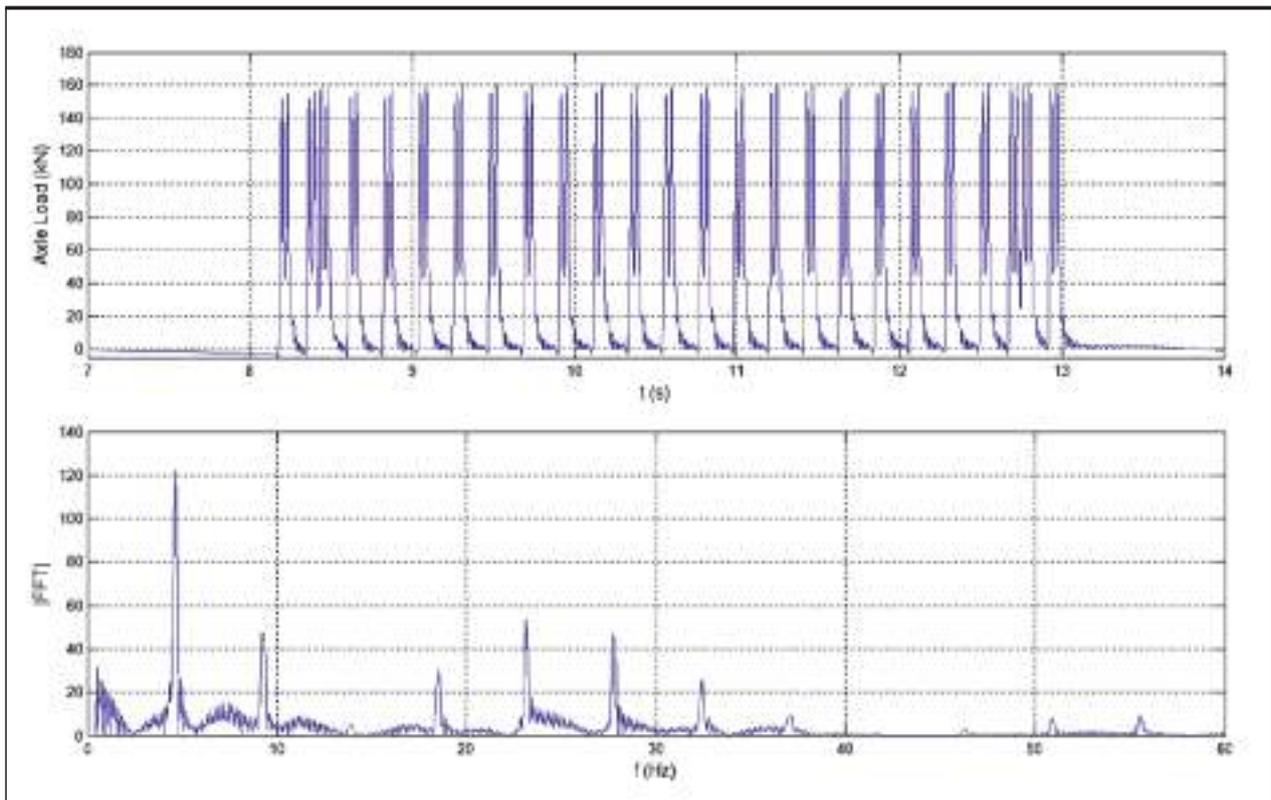


FIGURA 8. Simulación en la célula de ensayos de un tren Eurostar circulando a 300km/h .

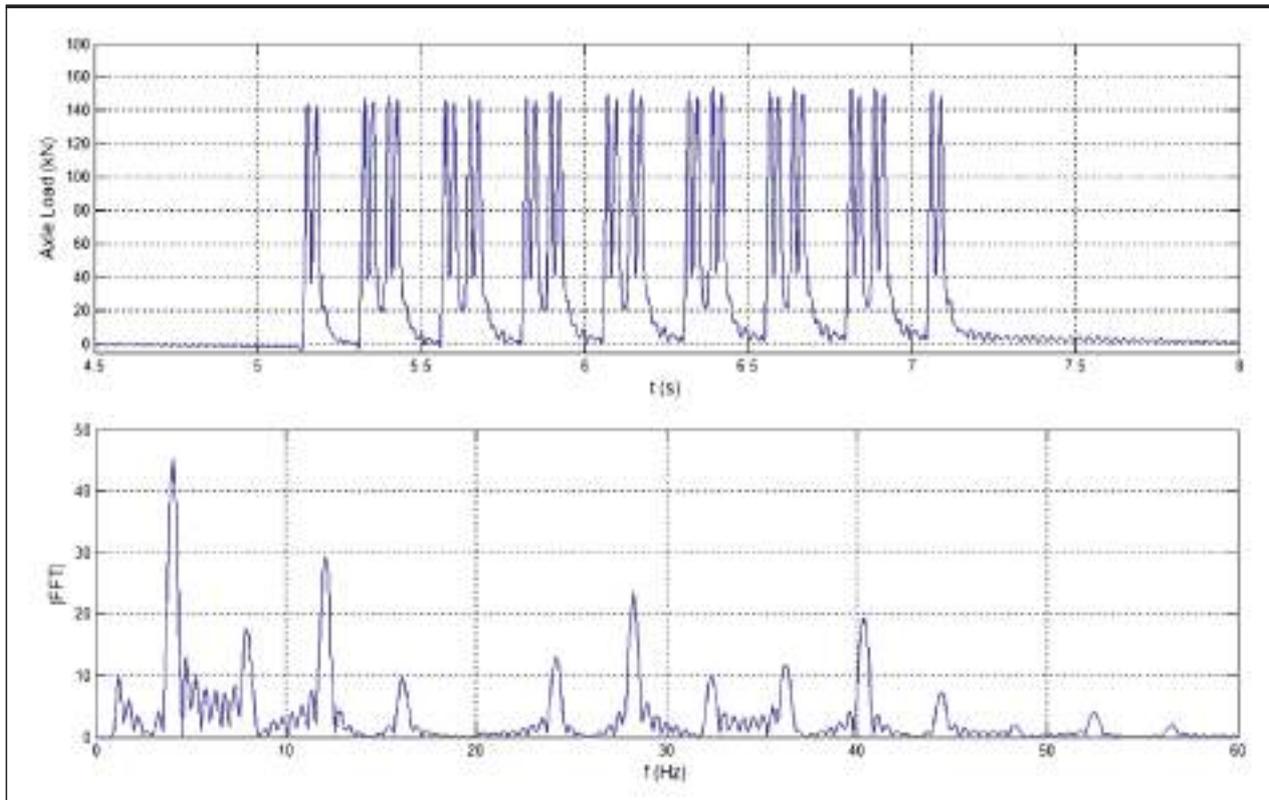


FIGURA 9. Simulación en la célula de ensayos de un tren ICE circulando a 360 km/h.

bituminosa. En ambos modelos la amplitud de la velocidad vertical de los carriles fue de 40-45 mm/s y en ellos se midieron picos de aceleración comprendidos entre 1g y 2g. La amplitud de la velocidad con la que vibraron las traviesas fue de 20-30 mm/s y los picos de sus aceleraciones estuvieron comprendidos entre 0,6g y 1,2g. El balasto en contacto con la cara inferior de las traviesas vibró con las mismas amplitudes de velocidad y aceleración que ellas. En ambos modelos se obtuvieron picos de velocidad de 5-15 mm/s en la parte superior de la capa de forma y de 2-4 mm/s en su parte inferior. Las medidas que se hicieron en el entorno del cajón, a una distancia de 1m de sus zapatas de cimentación, arrojaron valores picos de 1-2 mm/s.

4.2. COMPORTAMIENTO A LARGO PLAZO

El aspecto más relevante de la célula de ensayos del CEDEX, además de poder determinar el comportamiento a corto plazo de una sección de vía, es la posibilidad que tiene de realizar ensayos de fatiga de forma acelerada. En la Figura 10 se muestran las compresiones irreversibles del balasto obtenidas en el último ensayo de fatiga realizado en la Zona 0 del modelo físico 2 con 12 cm de subbalasto bituminoso. El ensayo en el que se aplicaron 2.350.000 cargas de eje de 165 kN cada una tuvo tres fases. Las primeras 300.000 cargas se aplicaron simulando el paso de un tren Eurostar a 300 km/h. Al final de esa fase se aumentó la velocidad de paso de los trenes a 360 km/h y con la misma amplitud de carga se aplicaron 500.000 ejes más. En la última fase (desde los 800.000 a 1.530.000 ejes) se cambió el tipo de tren manteniendo la misma velocidad de paso (360 km/h) y amplitud de carga por eje (165 kN). En esa fase se simuló el

paso de trenes ICE con empate en los bogies de 2,5 m en lugar de los 3 m de los trenes Eurostar.

Como puede observarse en la Figura 10, las compresiones permanentes de balasto proporcionadas por los sensores de desplazamiento instalados en las traviesas 0 (curva roja) y 2 (curva azul) prácticamente coinciden. Al principio de la segunda fase se detectó un pequeño salto en ambas curvas de fatiga que a pesar de separarse más que en la primera fase mantienen la misma forma y pendiente. El aumento a 40 Hz de la frecuencia de paso de los bogies en la tercera fase produjo tan sólo un ligero aumento de pendiente en ambas curvas de fatiga.

En lo que se refiere al comportamiento a largo plazo del balasto sometido a bateos periódicos cada millón de ejes de carga, en la Figura 11 se han recogido los resultados de cuatro ensayos consecutivos de fatiga que, sumando un total de 4 millones de ejes, se realizaron en la Zona 1 del modelo 2 con 8 cm de subbalasto bituminoso. Como ya se ha mencionado anteriormente, el balasto se bateó entre cada dos ensayos consecutivos de fatiga utilizando la bateadora autónoma del CEDEX. El hecho de que los bates de dicha máquina, al igual que ocurre en la vía real, tan sólo afectan a los 15 cm superiores de la masa de balasto aparece reflejado en la diferencia de compresiones permanentes del balasto que se obtuvieron entre el primero y el resto de los ensayos de fatiga. Tras la consolidación primaria experimentada por los 15 cm inferiores del balasto durante el primer ensayo de fatiga, ese material que no se vio afectado por las operaciones de bateo contribuyó en menor grado que el material bateado a las compresiones permanentes de la capa de balasto. Un comportamiento similar pudo observarse en las demás zonas del cajón.

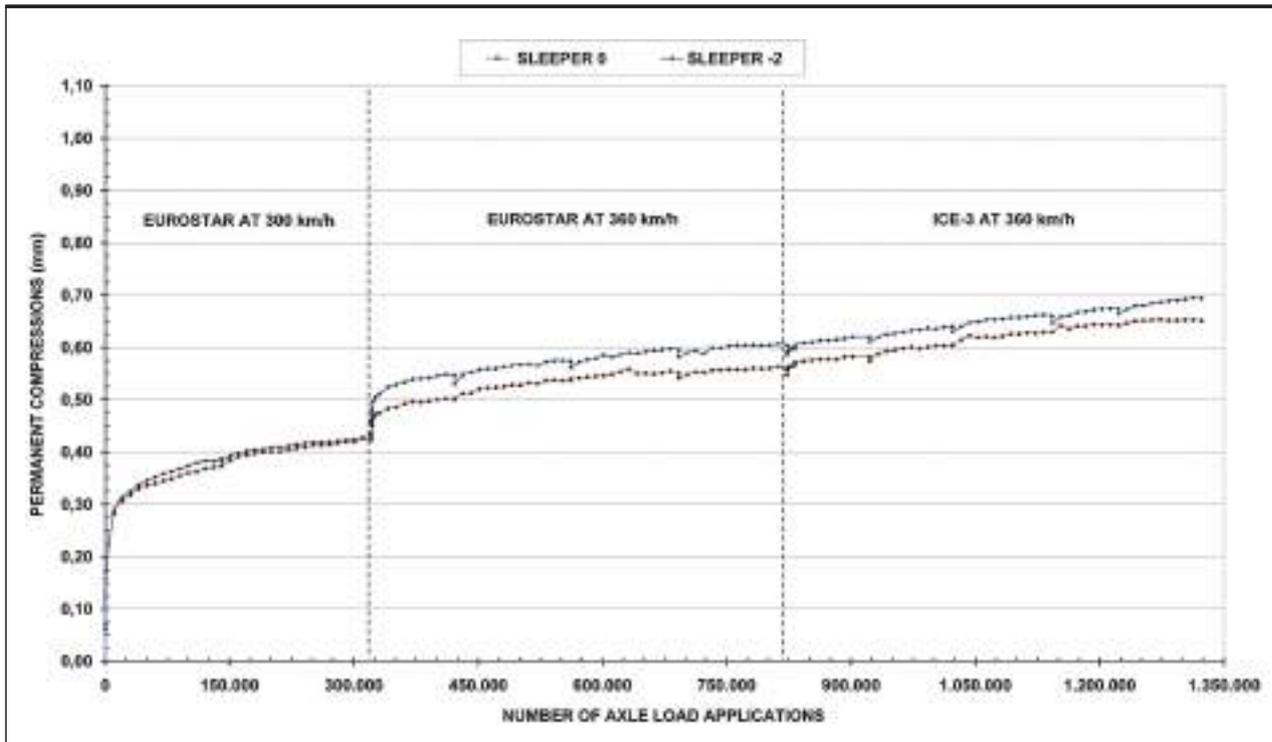


FIGURA 10. Compresiones permanentes del balasto obtenidas en el ensayo de fatiga con tres fases realizado en la Zona 0 del modelo físico 2.

En la Fig. 12 se presentan las curvas de fatiga a compresión del subbalasto bituminoso y de la capa de forma obtenidas en la Zona 1 del modelo físico 2 con 8 cm de subbalasto bituminoso. Aunque aparentemente el subbalasto bituminoso se fatiga menos, para una correcta interpretación de los datos representados en dichas curvas hay que tener en

cuenta los espesores de las capas: 80 mm en el subbalasto bituminoso y 600 mm en la capa de forma.

Con el fin de comparar los resultados obtenidos en la célula de ensayos del CEDEX con otros publicados en la literatura, se ha intentado identificar una ley matemática que permita reproducir los datos de las curvas de fatiga del balasto obteni-

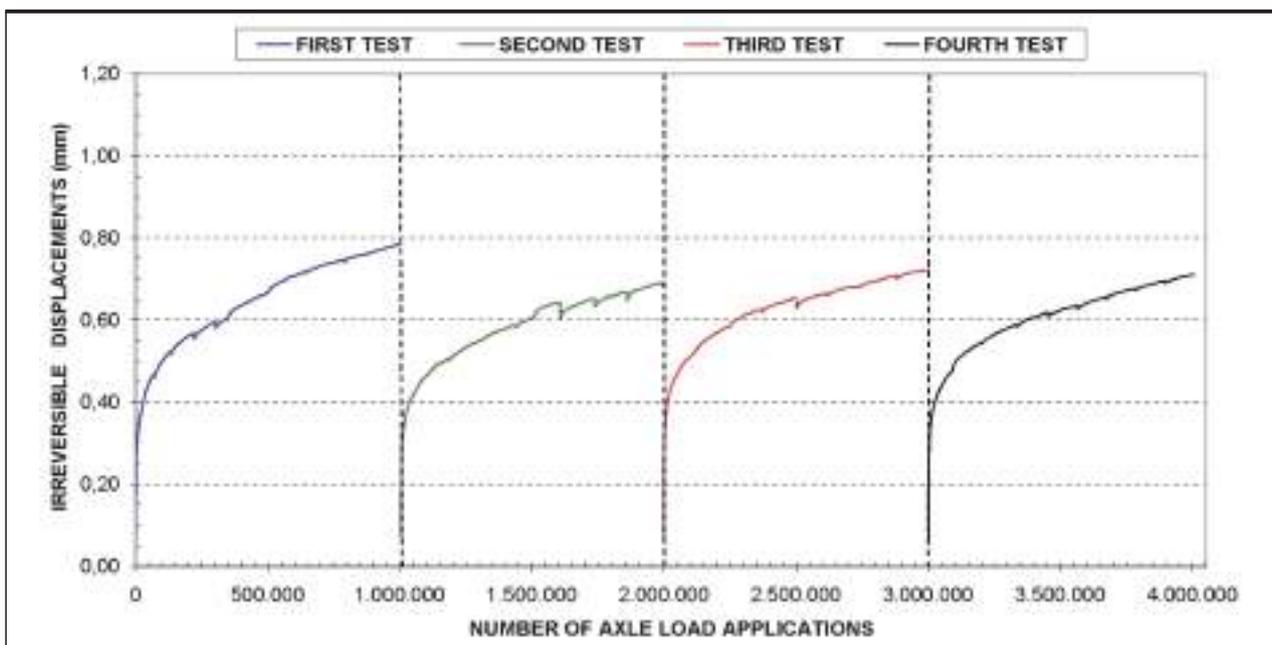


FIGURA 11. Curvas de fatiga del balasto obtenidas en la Zona 0 del modelo físico 2.

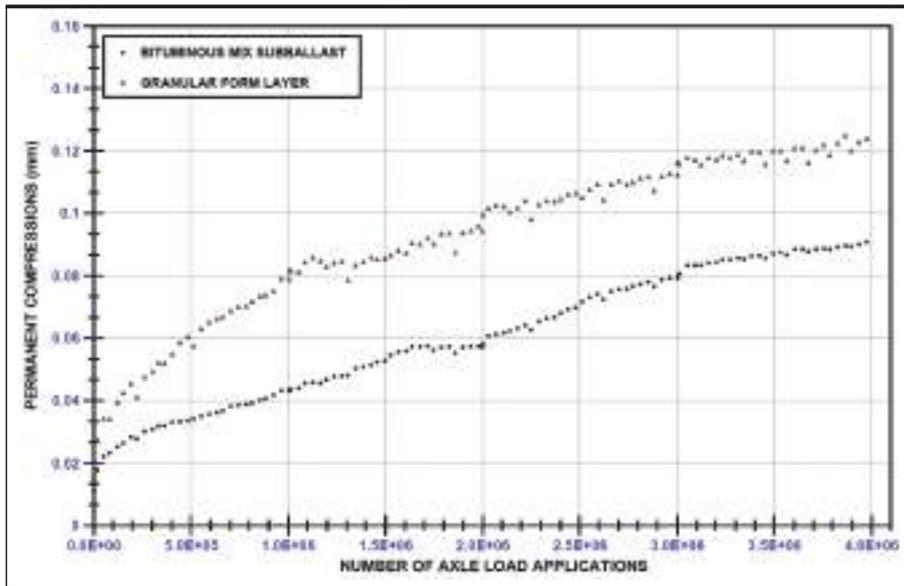


FIGURA 12. Curvas de fatiga del balasto obtenidas en la Zona 0 del modelo físico 2.

das cada millón de ejes de carga de 165 kN. De las diferentes formulaciones ensayadas, la siguiente expresión potencial es la que mejor se ajusta a los datos registrados en los ensayos:

$$\delta_N = \delta_1 N^\beta$$

donde

δ_N representa la compresión permanente (mm) alcanzada tras N de ejes de 165 kN

δ_1 representa la compresión permanente (mm) alcanzada tras la primera carga de 165 kN

β es una constante relacionada con la pendiente de la curva de fatiga que se obtiene mediante un ajuste de mínimos cuadrados a los datos experimentales.

En la Figura 13 se muestran los tipos de ajuste conseguidos con dicha ley de los datos experimentales obtenidos en los tres últimos ensayos de fatiga realizados en la Zona 1 del cajón con 8 cm de subbalasto bituminoso. En la Tabla 3 se proporcionan, junto con los coeficientes de correlación R^2 obtenidos en cada uno de dichos ajustes, los valores de la variable δ_1 (el experimental y el hallado mediante el ajuste de mínimos cuadrados). Con los datos de la Tabla 3 y los obtenidos en los demás ensayos de fatiga realizados en distintas zonas del cajón se ha podido definir la siguiente ley de fatiga como la más representativa del comportamiento a fatiga del balasto sometido al paso de trenes Eurostar e ICE con ejes de carga de 165 kN.

$$\delta_N = 0.07 N^{0.1625}$$

5. VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS EN LA CÉLULA DE ENSAYOS CON MEDIDAS IN SITU

Con el fin de validar los resultados obtenidos en la célula de ensayos del CEDEX, se han construido dos tramos experimentales de 500 m de longitud cada uno en la localidad de Valdestillas situada en la línea de alta velocidad Madrid-Valladolid, 5 km antes de Valladolid: una con 12 cm de subbalasto bituminoso y la otra con 30 cm de subbalasto granular.

En ambos tramos, el terraplén de la vía de 2 m de altura, sirve de apoyo a una capa de forma de 30 cm de espesor de una arena arcillosa estabilizada con cal que se compactó con

ENSAYO DE FATIGA	δ_1 (mm) EXPERIMENTAL	δ_1 (mm) TEÓRICO	β	R^2
SEGUNDO	0.072	0.080	0.155	0.994
TERCERO	0.068	0.083	0.158	0.987
CUARTO	0.063	0.076	0.162	0.989

TABLA 3. Ajuste con expresiones potenciales de las curvas de fatiga del balasto obtenidas en la Zona 1 del modelo físico 2.

un peso específico seco de 17,3 kN/m³ y una humedad del 12%. Los ensayos con placa de carga que se realizaron en la parte superior del terraplén y de la capa de forma proporcionaron valores E_{V2} de 100 MPa y 125 MPa respectivamente.

El subbalasto granular utilizado en uno de los tramos está constituido por un material GP no plástico según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos que se compactó con un peso específico seco de 22,3 kN/m³ y una humedad del 4%. Los ensayos con placa de carga que se realizaron en la parte superior de dicha capa arrojaron un valor $E_{V2} = 235$ MPa.

Comparando el tramo con subbalasto granular de Valdestillas con el modelo físico 1 construido en la célula de ensayos del CEDEX se observa una coincidencia bastante notable entre la media de los valores E_{V2} obtenidos para el subbalasto y la capa de forma en ambas vías (170 Mpa en el modelo 1 según los valores dados en la Tabla 1 y 180 Mpa en el tramo de Valdestillas).

En lo que se refiere al subbalasto bituminoso, la mezcla utilizada en el tramo de Valdestillas tiene casi las mismas características que la del cajón, habiéndose obtenido en la primera un valor $\epsilon_6 = 87 \mu\epsilon$ que siendo inferior al obtenido en la mezcla del cajón representa una resistencia mayor a la fatiga en flexo-tracción. Los ensayos de laboratorio realizados con testigos de 10 cm de diámetro, obtenidos en la mezcla compactada en Valdestillas, proporcionaron una densidad de 2,32 Mg/m³ y una curva maestra de la que se obtuvo un módulo dinámico a 10 Hz y 20°C de 7890 Mpa. Con el deflectómetro de impacto y una temperatura in situ de 38 °C se obtuvieron valores E_{V2} de la mezcla de unos 400 MPa equiparables a los obtenidos en la mezcla de cajón tras su puesta en obra (500 MPa a 13°C).

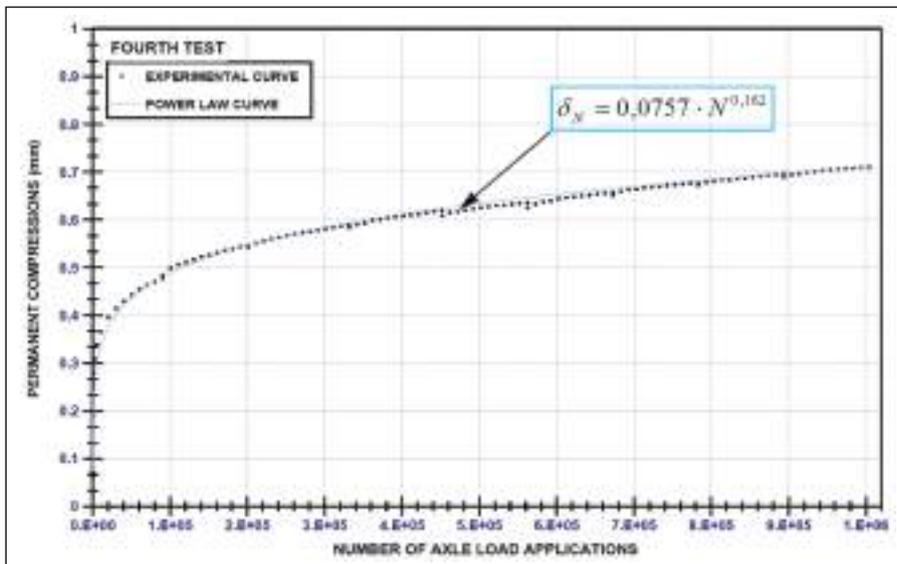
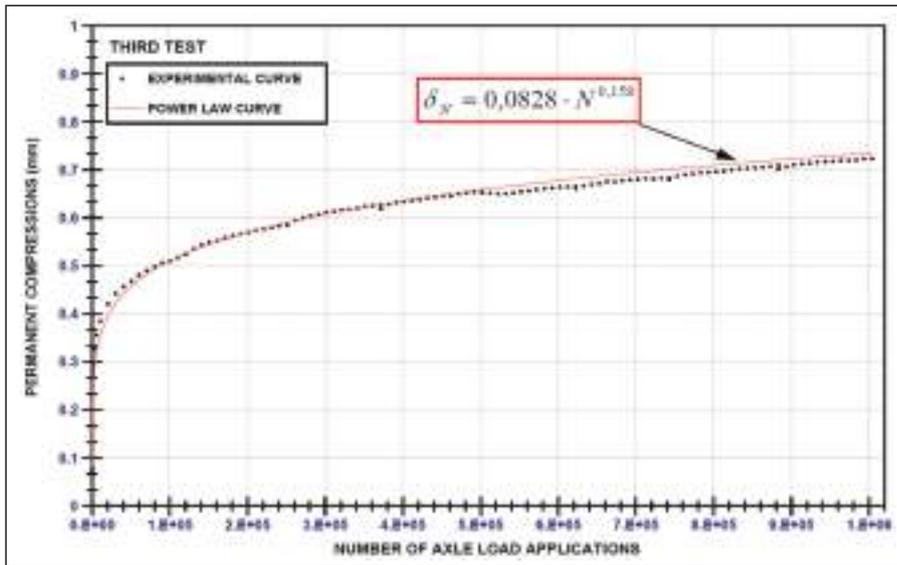
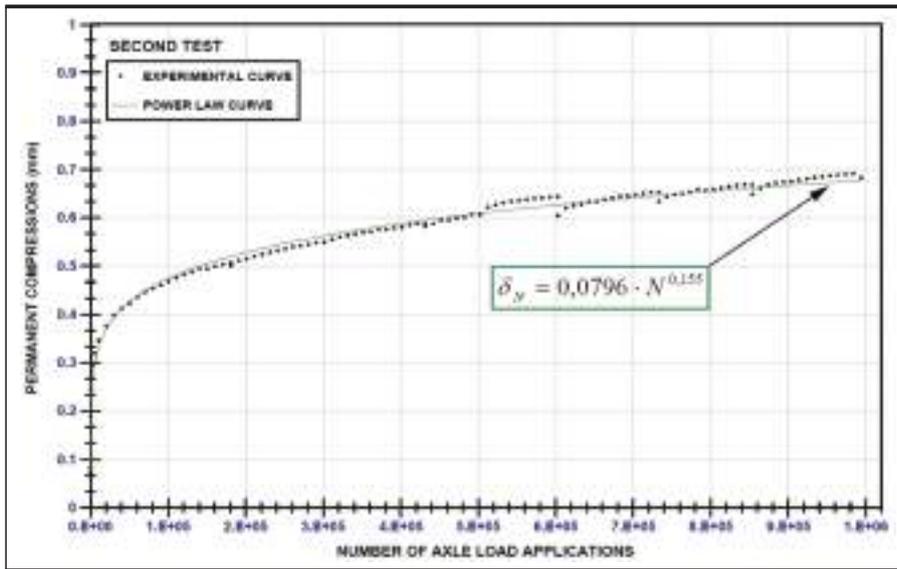


FIGURA 13. Ajuste de las curvas de fatiga del balasto obtenidas en la Zona 1 del modelo físico 2 con expresiones potenciales.

La línea Madrid-Valladolid se abrió al tráfico a finales del año 2007. Desde entonces ha estado soportando un tráfico de 250.000 ejes por año.

Utilizando en los dos tramos de Valdestillas los mismos sensores de superficie que los utilizados en el cajón (ver Figura 5) CEDEX llevó a cabo medidas in situ en Junio y Noviembre de 2009 y en Noviembre de 2010. En dichas campañas se registró el paso a 250 km/h de trenes con bogies y cargas por eje similares a los del tren ICE. En las campañas de Junio y Noviembre de 2009, en las que se registraron unas temperaturas medias mensuales de 18°C y 9°C respectivamente en Valladolid, no se encontraron diferencias apreciables en las rigideces de vía del tramo con subbalasto bituminoso que se mantuvieron en torno a los 120 kN/mm. En lo que se refiere al tramo con subbalasto granular, en todas las campañas se obtuvo una rigidez de vía de 110 kN/mm. Ambos valores de rigidez de vía obtenidos in situ son similares a los comentados en este artículo en relación con los modelos físicos de vía 1 y 2 construidos a escala 1:1 en la célula de ensayos del CEDEX.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores de este artículo desean agradecer en primer lugar la labor de montaje y ejecución de ensayos en el cajón llevada a cabo por los técnicos del Laboratorio de Geotecnia D. Ángel Carballo Hernández, D. Antonio García Jiménez, D. Pedro León Durán y D. Raúl Reinoso Cámara. También desean agradecer al personal técnico del Área de Auscultación y En-

sayos de Campo del Laboratorio de Geotecnia y del Laboratorio de Infraestructura Viaria los datos proporcionados sobre el comportamiento de vías reales que han permitido validar los resultados obtenidos en los modelos a escala 1:1 construidos en la célula de ensayos. Por último, se reconoce la ayuda prestada en la interpretación de los ensayos por el Ingeniero Industrial D. Ricardo Fernández-Hidalgo Arroyo.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CEDEX, 2008.

Ensayo de fatiga de una vía de alta velocidad en la instalación para infraestructuras ferroviarias del CEDEX, Convenio ADIF-CEDEX 2006-2009: Ficha 1, 178 pp.

CEDEX, 2011.

Ensayos de fatiga de una vía de alta velocidad con 12 cm de subbalasto bituminoso en la instalación del CEDEX, Encienda de Gestión ADIF-CEDEX 2010-2013: Ficha 5, 367 pp.

INNTRACK, 2009.

Deliverable D2.1.10, Methods of track stiffness measurements, 36 pp.

Manzanas, J., Moreno, J., Cuéllar, V., Andreu, M.A. & Navarro, F., 2007. CEDEX's experimental facility for testing railway tracks, Proceedings 14th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Madrid, Vol.4, pp. 2037-2055.



La Clave del Éxito reside en nuestra Capacidad de Superación

Adaptarnos a las nuevas exigencias del mercado, a las tecnologías constructivas más actuales, a la dimensión y complejidad de cada proyecto... nos permite superar los más exigentes requisitos de calidad, seguridad y respeto medioambiental. Manteniendo nuestra responsabilidad con cada uno de nuestros clientes y cumpliendo más allá de nuestros compromisos. Es así como ALDESA se sitúa hoy entre los diez mayores grupos de construcción de España, consolidándose y proyectándose con éxito hacia el futuro.

OBRAS FERROVIARIAS - CARRETERAS Y AUTOVÍAS - AEROPUERTOS - OBRAS MARÍTIMAS E HIDRÁULICAS
URBANIZACIONES - EDIFICACIÓN - REHABILITACIONES Y REFORMAS



 **aldesa**