

Actuaciones del Laboratorio de Geotecnia-CEDEX en Ingeniería Geotécnica Ferroviaria

Activities of the Laboratorio de Geotecnia-CEDEX Related to Railway Geotechnical Engineering

José Estaire^{1*}, Javier Moreno², Fernando Pardo de Santayana³, María Santana⁴

Resumen

El artículo describe la actividad realizada por el Laboratorio de Geotecnia (LG) en el campo de la Ingeniería Geotécnica Ferroviaria en los últimos 20 años. Esta actividad queda enmarcada en cuatro ámbitos de actuación: ensayos a escala 1:1 en el Cajón Ferroviario del CEDEX, instrumentación *in situ* de secciones ferroviarias, análisis numéricos de secciones ferroviarias y ensayos geotécnicos de laboratorio con materiales ferroviarios. Todas estas actividades generan un conocimiento sobre el comportamiento mecánico de los diferentes elementos que componen la infraestructura ferroviaria que se plasma en diferentes documentos normativos que se han actualizado recientemente.

Palabras clave: Geotecnia Ferroviaria, auscultación, ensayos escala 1:1, modelización numérica.

Abstract

This paper describes the activity carried out by CEDEX's Laboratorio de Geotecnia (LG) in the field of Railway Geotechnical Engineering over the last 20 years. This activity is framed within four areas of action: 1: 1 scale tests at CEDEX Track Box, on-site instrumentation of railway sections, numerical analysis of railway sections, and geotechnical laboratory tests with railway materials. All these activities generate knowledge about the mechanical behavior of the different elements used in the construction of railway infrastructure, which is reflected in different normative documents that have been recently updated.

Keywords: Geotechnical Railway Engineering, instrumentation, 1:1 scale models, numerical analysis.

1. INTRODUCCIÓN: LA GEOTECNIA FERROVIARIA

La Geotecnia Ferroviaria podría ser definida como la rama de la Ingeniería Geotécnica que se ocupa de las características geotécnicas de los materiales que componen la infraestructura de las líneas de ferrocarril. A este respecto, en la figura 1 se muestra la sección transversal esquemática de una línea férrea, tal como se recoge en la “Instrucción para el proyecto y construcción de obras ferroviarias IF-3. Vía sobre balasto” (2015) y en el documento normativo IRS 70719 (UIC, 2020), compuesta por los siguientes elementos, listados de arriba a abajo:

- Componentes de vía: incluye los carriles, el sistema de sujeción, las suelas bajo carril y las traviesas.
- Capa de balasto, constituida por rocas machacadas de gran resistencia al desgaste, con granulometría uniforme y tamaños que oscilan aproximadamente entre 20 y 60 mm, provenientes de canteras seleccionadas.

- Capa de sub-base, constituida por una capa de sub-balasto que puede complementarse con una capa de protección contra la helada y una capa de filtro. La capa de sub-balasto puede estar formada por material bituminoso o material granular, constituido por grava arenosa de granulometría continua, compactada al 100 % del PM, no deformable al paso de maquinaria de obra y de baja permeabilidad, con el fin de proteger a la plataforma del agua de lluvia.
- Capa de forma de la plataforma: es la capa superior de remate y coronación de la superficie del terraplén o excavación. Su función principal es mejorar la capacidad portante de la plataforma por lo que debe tener mejores características que las de la explanada (detallada posteriormente).
- Terraplén (en caso de que exista).
- Terreno natural subyacente en el que se apoya el terraplén o que forma el desmonte.

Hay que destacar que la explanada ferroviaria, situada bajo la capa de forma, es la cara superior del terreno natural (en secciones en desmonte) o de la capa de coronación del terraplén (en secciones en relleno), mientras que la plataforma ferroviaria es la cara superior de la capa de forma.

La investigación experimental en Geotecnia Ferroviaria comienza normalmente con la realización de ensayos simples y normalizados en laboratorio sobre los elementos individuales que componen la sección transversal, que se

* Autor de contacto: Jose.Estaire@cedex.es

¹ Doctor ingeniero de caminos. Jefe de Área de Infraestructuras Tecnológica, Laboratorio de Geotecnia del CEDEX.

² Doctor ingeniero de caminos. Jefe de Área de Auscultación y Ensayos de Campo, Laboratorio de Geotecnia del CEDEX.

³ Doctor ingeniero de caminos. Director del Laboratorio de Geotecnia del CEDEX.

⁴ Geóloga. Coordinadora Técnica. Área de Infraestructuras Tecnológica, Laboratorio de Geotecnia del CEDEX.

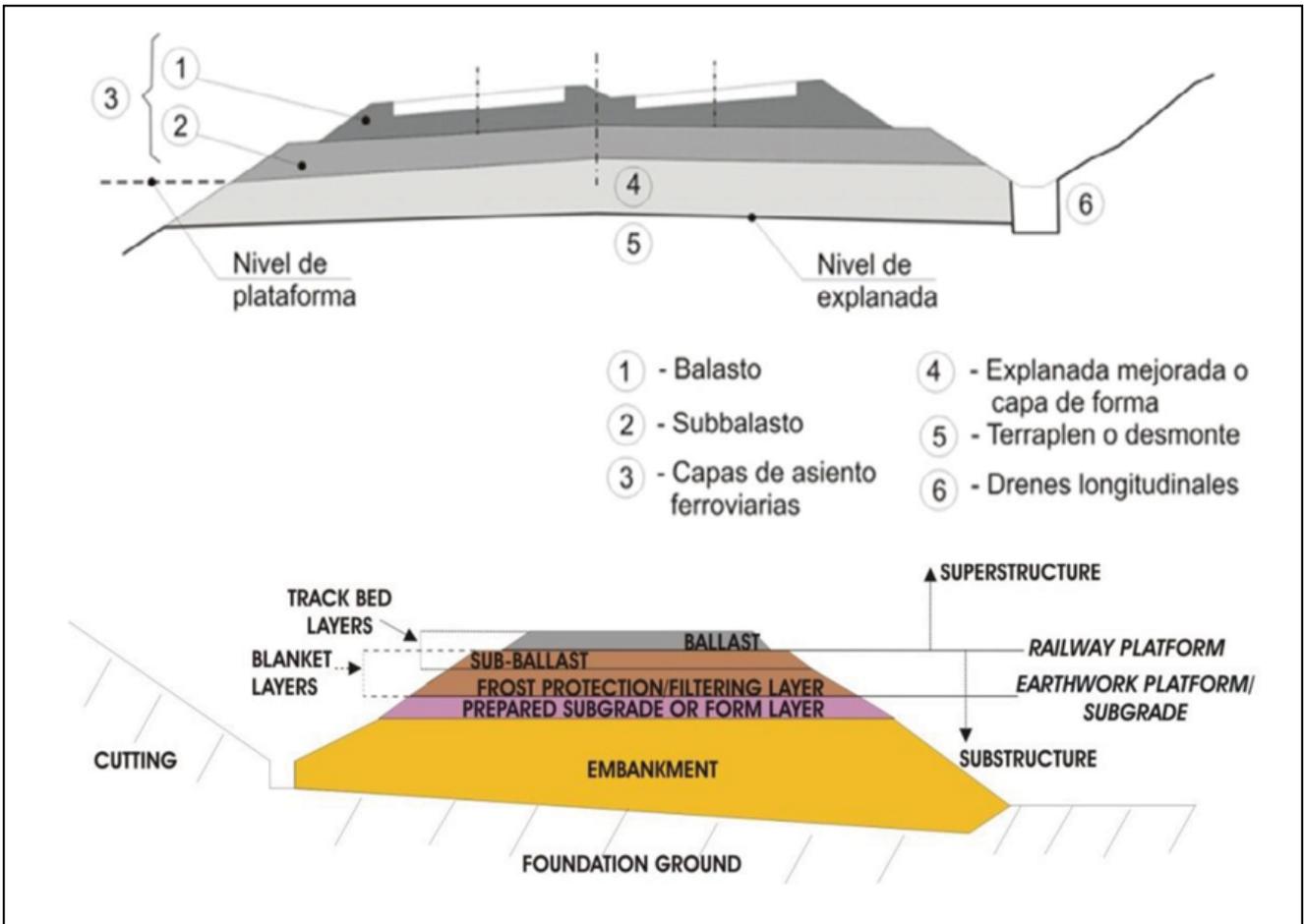


Figura 1. Sección transversal esquemática de una línea férrea en terraplén y desmonte.

pueden complementar con modelos numéricos que reproduzcan el comportamiento real. El último paso suele ser llevar a cabo ensayos en una vía de ferrocarril en construcción o en servicio, con tráfico real, para analizar de forma conjunta todos los elementos, mediante la instalación de instrumentación *in situ*. Sin embargo, para llenar el espacio

experimental entre los ensayos de laboratorio sencillos y las pruebas reales con mediciones en la propia vía, el CEDEX diseñó, construyó y puso en servicio en 2004 el Cajón Ferroviario del CEDEX (CFC).

Estos cuatro campos de actuación en la Ingeniería Geotécnica Ferroviaria, mostrados en la figura 2, son cubiertos

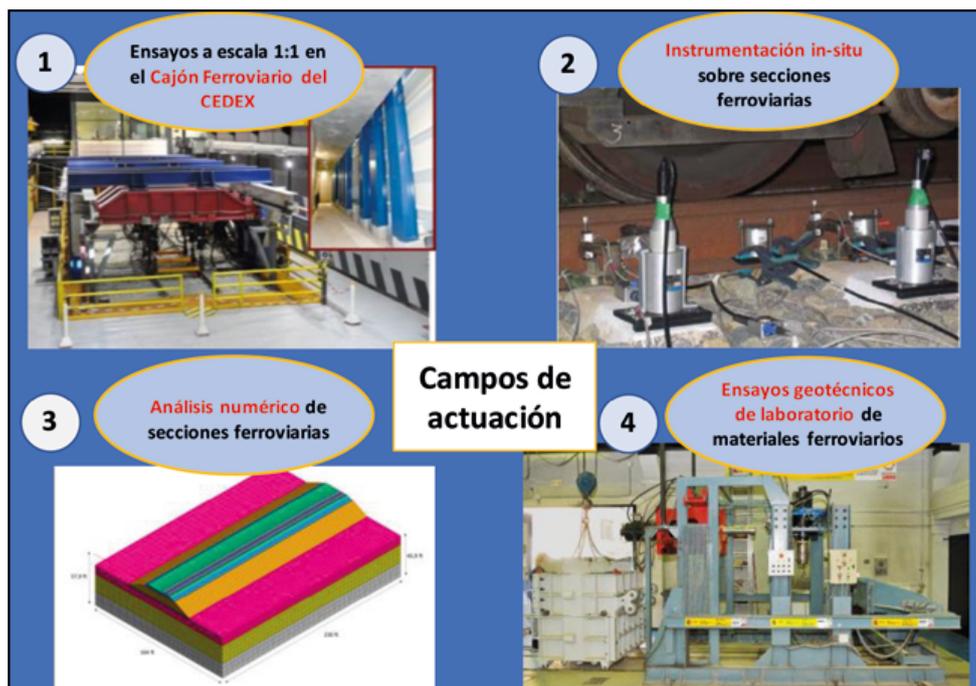


Figura 2. Campos de actuación del LG en Ingeniería Geotécnica Ferroviaria.

por las actividades que lleva a cabo el LG desde comienzos del siglo XXI.

2. CAJÓN FERROVIARIO DEL CEDEX (CFC)

Para llenar el espacio experimental entre los ensayos de laboratorio sencillos y las pruebas reales con mediciones en la propia vía, el CEDEX diseñó, construyó y puso en servicio en 2004 el Cajón Ferroviario del CEDEX (CFC), como parte del proyecto de I+D+i *Supertrack* (“Sustained Performance of Railway Tracks”, 2001-2005) financiado por el 5º Programa Marco de la Unión Europea (Manzanas *et al.*, 2007).

Desde entonces, en esta instalación se han realizado numerosos ensayos para los siguientes proyectos I+D+i, financiados también por la Unión Europea: Innotrack (2005-09), Rivas (2009-13) y Capacity for Rail (2013-17) (Cuéllar, 2016). Actualmente se está desarrollando el proyecto GEOLAB (2021-2024), dentro del marco H2020, bajo el programa “Integrating and Opening Research Infrastructures of European Interest”. El principal objetivo del proyecto GEOLAB es permitir que empresas europeas puedan realizar ensayos, pagados por la Unión Europea, en las grandes instalaciones de ensayo que integran el consorcio del proyecto, entre los que se encuentra el CFC.

2.1. Descripción de la instalación de ensayos

El CFC es una instalación de 21 m de longitud, 5 m de anchura y 4 m de profundidad, cuyo principal objetivo es ensayar, a escala 1:1, secciones completas de vías férreas convencionales y de alta velocidad, sometidas al paso de trenes tanto de pasajeros como de mercancías, con velocidades de hasta 420 km/h. En la figura 3 se muestra una vista general de la instalación.



Figura 3. Vista general de la instalación.

La principal ventaja de su utilización radica en el hecho de que, en tan sólo una semana de trabajo en la instalación, se puede determinar el efecto que tiene el tráfico de trenes en una sección de vía real, a lo largo de un año.

La simulación del efecto de la aproximación, paso y alejamiento de los trenes en la sección de ensayo, como ocurre en secciones reales de vía, se consigue mediante la aplicación de cargas, adecuadamente desfasadas en función de la velocidad del tren que se quiera simular. Las cargas se generan con tres pares de actuadores servohidráulicos alimentados por un sistema hidráulico, activado por tres motores con una potencia de 350 CV cada uno para generar un caudal de 1800 l/min a una presión de 210 bares. Cada uno de los actuadores puede aplicar una carga máxima de 250 kN, con frecuencias asociadas de hasta 50 Hz. Estos actuadores están situados separados 1,5 m en dirección longitudinal, en cada uno de los carriles, como se observa en la figura 4.

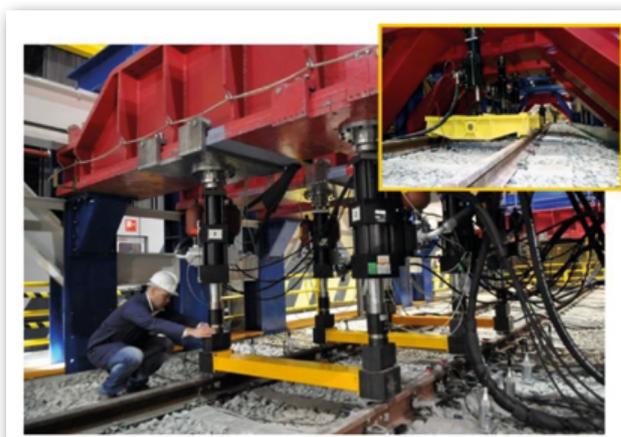


Figura 4. Sistema de cargas compuesto por tres pares de actuadores hidráulicos.

La respuesta mecánica de la sección de vía férrea ensayada se obtiene mediante medidas de desplazamientos, velocidades, aceleraciones y presiones, realizadas con un gran número de transductores de desplazamiento variable lineal (LVDT), geófonos, acelerómetros y células de presión instaladas tanto en el terraplén como en las capas de la sección ferroviaria (balasto, sub-balasto y capa de forma). En la figura 5 se muestra un esquema de la sección del CFC, que reproduce fielmente la sección transversal de una vía férrea, con la posición de los sensores usados en uno de los ensayos.

Por otra parte, la respuesta de la superestructura ferroviaria se mide con transductores mecánicos de desplazamiento, sensores láser, geófonos y acelerómetros colocados en los diferentes componentes de vía (carriles, suelas bajo carril y traviesas), como puede verse en la figura 6. El sistema de adquisición de datos puede recibir información de 150 sensores de forma simultánea.

Con objeto de reproducir en los modelos de ensayo, lo más fielmente posible, la construcción de las líneas férreas, el CFC cuenta con una bateadora de pequeñas dimensiones, como la que se muestra en la figura 7 que se utiliza en aquellos casos en los que se quieren reproducir tareas de mantenimiento que requieran el bateado de la vía.

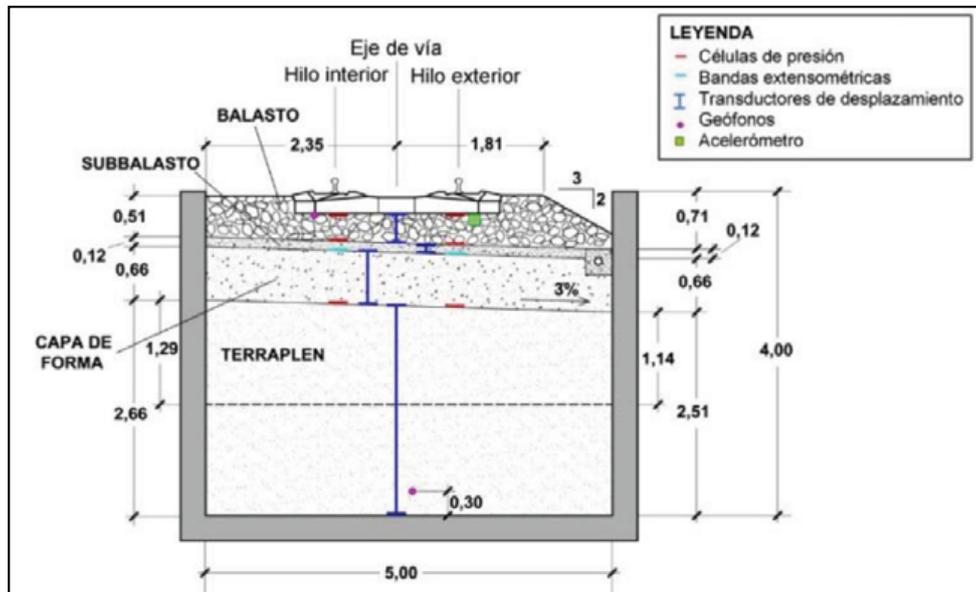


Figura 5. Sección del CFC con parte de los sensores internos colocados en uno de los ensayos.



Figura 6. Instrumentación superficial colocada en uno de los ensayos.



Figura 7. Máquina de bateo adaptada para su uso en el CFC.

2.2. Características de los modelos a ensayar y tipología de ensayos a realizar

Los modelos a escala 1:1 que pueden construirse en el CFC pueden presentar las siguientes características:

- Ensayos sobre secciones de vía en balasto o de vía en placa.
- Ensayos sobre secciones en tramo recto o en curva.
- Ensayos de zonas de transición.
- Ensayos con diferentes tipos y espesores de balasto, sub-balasto (granular o bituminoso), capa de forma o terraplén.
- Ensayos con traviesas estándar, polivalentes o mixtas.
- Ensayos con nuevos materiales: traviesas con suela bajo traviesa (USP), mantas bajo balasto, balasto artificial, sub-balasto bituminoso, sub-balasto ligero, terraplén realizado con suelos reforzados con geotextiles o con suelos tratados con cal o cemento.

Por otra parte, los ensayos a realizar en el CFC pueden realizarse bajo las siguientes condiciones o para alcanzar determinados objetivos:

- Ensayos con trenes de pasajeros, de mercancías o con tráfico mixto.
- Ensayos con cargas estáticas para determinar la rigidez de vía.
- Ensayos con cargas cuasi-estáticas para simular el paso de trenes a velocidades hasta 420 km/h, con los que se puede determinar el comportamiento resistente y deformacional de los elementos de la sección ferroviaria.
- Ensayos con cargas dinámicas para simular el efecto inducido por las irregularidades de la vía.
- Ensayos para determinar el comportamiento de fatiga de cualquier elemento de la sección de línea férrea (normalmente, del sistema de fijación, del balasto o del sub-balasto) mediante la simulación del paso de millones de ejes de trenes.
- Ensayos para reproducir el efecto de las operaciones de bateo en la degradación del balasto, con el equipo que se muestra en la figura 7.
- Ensayos para determinar la propagación de vibraciones por efecto del paso de trenes a diferentes velocidades.
- Ensayos para determinar la resistencia longitudinal y lateral de la vía.

El resultado de los ensayos puede emplearse para:

- Analizar el comportamiento mecánico, a corto y largo plazo, de cualquiera de los elementos que constituyen la sección ferroviaria o de ésta de forma conjunta, una vez sometida a cualquier tipo de tráfico.
- Calibrar modelos numéricos 3D que puedan ser usados en otro tipo de estudios o para validar el resultado de los ensayos.

2.3. Ensayos con cargas estáticas

2.3.1. Determinación de la rigidez vertical de la vía

La determinación de la rigidez vertical de la vía (K), en cualquier situación de vía, se hace imponiendo cargas estáticas mediante los actuadores servohidráulicos, mostrados en la figura 4. La rigidez vertical de vía (K) se define como la razón entre la carga vertical aplicada (Q) y la deflexión vertical de carril (δ) medida en el mismo punto de aplicación de la carga.

La figura 8 muestra las deflexiones de carril medidas a lo largo del tiempo del ensayo y en función de la carga aplicada. Se puede ver que las curvas de deflexión son claramente no-lineales, por lo que la rigidez vertical de la vía siempre debe referirse a la carga utilizada en el ensayo (Estaire et. al, 2018).

En la figura 9 se pueden ver las deflexiones máximas de carril obtenidas en diferentes puntos del carril durante tres ensayos estáticos en los que se impusieron las cargas con los tres actuadores, actuando de forma independiente.

El buen ajuste entre las medidas y la teoría, visto en la figura 11 y en un gran número de otros ensayos estáticos realizados en el CFC, demuestra que las deflexiones del carril debido a una sola carga vertical pueden predecirse con alta precisión suponiendo que la vía del carril tiene un comportamiento de tipo *Winkler*, representado mediante la ecuación [1].

$$\delta(x, t) = \frac{Q}{K} e^{-\frac{|x-vt|}{L}} \left(\cos\left(\frac{|x-vt|}{L}\right) + \sin\left(\frac{|x-vt|}{L}\right) \right) \quad [1]$$

Además, en los ensayos estáticos realizados, se ha podido determinar la contribución de cada capa de vía a la deflexión total del carril con la ayuda de algunos transductores de desplazamiento colocados en las interfaces de dichas capas, como se refleja en la tabla 1.

Los modelos físicos 1 a 4, indicados en la tabla 1, sólo se diferencian en la capa de sub-balasto, como se indica en la propia tabla, mientras que los otros elementos son comunes: suela bajo carril de 100 kN/mm de rigidez, capa de balasto de 35 cm de espesor, capa de forma de 60 cm de espesor y terraplén de 2,5 m de espesor.

Cabe destacar la consolidación de vía observada tras el paso de 4 millones de ejes de trenes de pasajeros, con una

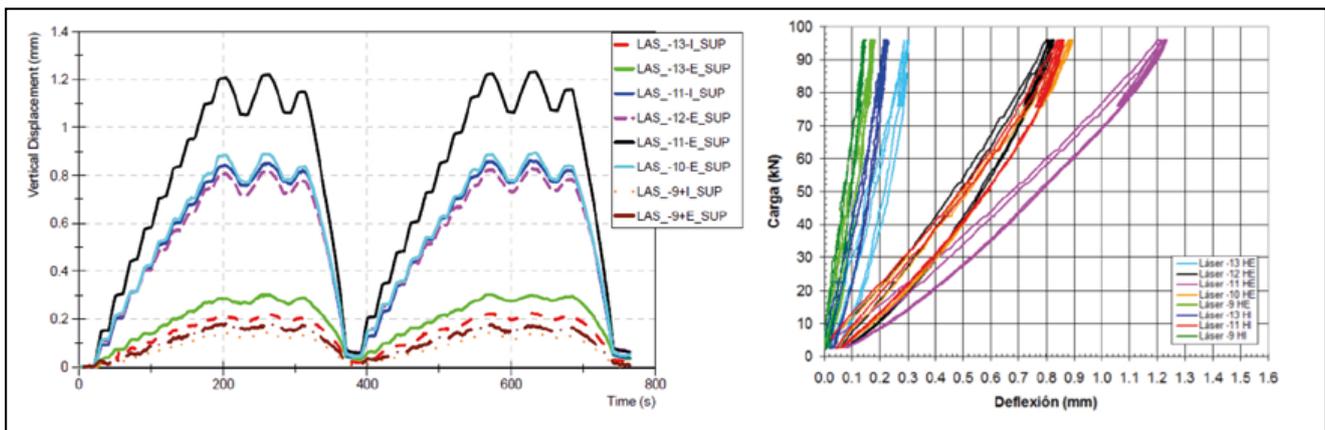


Figura 8. Curva tiempo-desplazamiento y carga-desplazamiento.

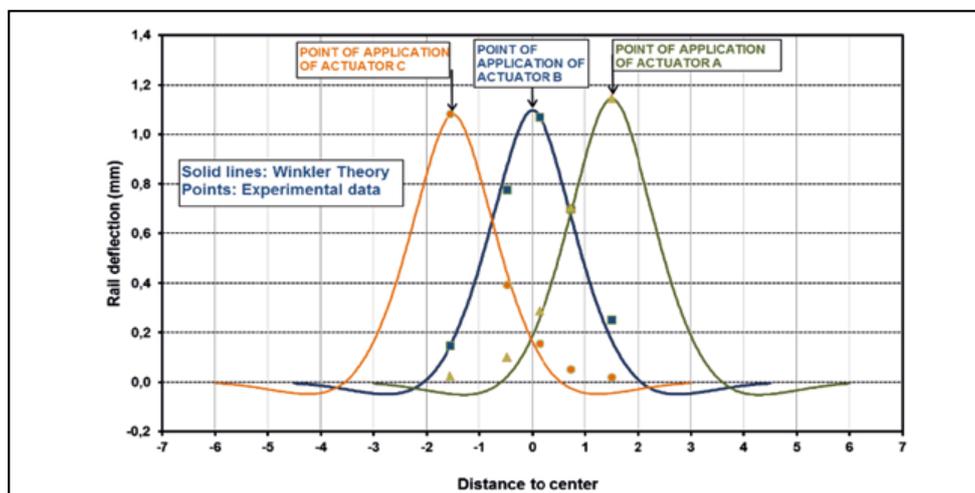


Figura 9. Deflexión del carril en diferentes puntos durante una serie de ensayos estáticos.

Tabla 1. Resumen de resultados de los ensayos estáticos realizados

Características de los trenes	Tipo	Pasajeros				Mercancías	
	Velocidad (km/h)	300				120	
	Carga (kN/eje)	165				220 - 250	
Modelo físico de ensayo ⁽¹⁾		1	2	3	4	2	3
Rigidez vertical de vía K (kN/mm)		100	120	125	118	130	140
Contribución a la deflexión total de carril (%)	Suela bajo carril	25	35	32	34	40	39
	Balasto	45	43	45	41	38	43
	Sub-balasto	15	2	3	4	2	3
	Capa de forma	15	7	20	21	5	15
	Terraplén		13			15	

⁽¹⁾ Capa de sub-balasto en los modelos físicos:

Modelo 1: 30 cm de material granular; Modelo 2: 8 cm de material bituminoso

Modelo 3: 12 cm de material granular; Modelo 4: 16 cm de material bituminoso

carga por eje de 165 kN, a 300 km/h, gracias al aumento de la rigidez de vía, en los modelos físicos 2 (de 120 a 130 kN/mm) y 3 (de 125 a 140 kN/mm).

2.3.2. Determinación de la resistencia lateral de la vía

El estudio de la resistencia lateral de la vía también se puede realizar en el CFC con la ayuda de una herramienta especial, que se muestra en la figura 10, que mueve horizontalmente la traviesa, previamente liberada de las sujeciones de los carriles, mientras se registra su movimiento horizontal (Estaire *et al.*, 2017).

El equipo de medición instalado generalmente consiste en una célula de carga, dos sistemas láser (para medir el movimiento horizontal de la traviesa) y dos potenciómetros (para controlar el desplazamiento relativo entre la traviesa y el carril), como puede verse en la figura 11.

Se han realizado dos ensayos de resistencia lateral de vía diferentes: en uno de ellos la traviesa descansaba sobre una capa de balasto limpio mientras que en el otro, la capa de balasto estaba completamente contaminada con arena seca del desierto.

Los resultados del ensayo mostraron una carga horizontal de pico de 12,5 y 16 kN en los ensayos realizados con balasto limpio y con balasto contaminado, respectivamente, como se muestra en la figura 12. En ambos ensayos, la carga máxima se alcanzó cuando el desplazamiento horizontal de la traviesa fue aproximadamente 1,5 mm.

Los resultados obtenidos en estos ensayos muestran formas y resultados similares a los de los ensayos denominados STPT (*Single Tie Push Test*), realizados en vías reales en condiciones similares (Samavedam *et al.*, 1999).

Los ensayos de resistencia lateral de vía se modelizaron numéricamente teniendo en cuenta los siguientes tres mecanismos: el rozamiento en la base de la traviesa con el balasto, el rozamiento en las caras laterales de la traviesa con el balasto y las resistencias pasivas y activas del balasto en los hombros de la traviesa, tal como se indica en Kish (2011).

Los resultados de dicha modelización han permitido obtener las siguientes conclusiones:

- Los principales factores contribuyentes de la resistencia lateral son el rozamiento en la base y el empuje pasivo en el hombro frontal de la traviesa, cuyas



Figura 10. Fotografía del equipo para la realización de los ensayos de resistencia lateral de vía.

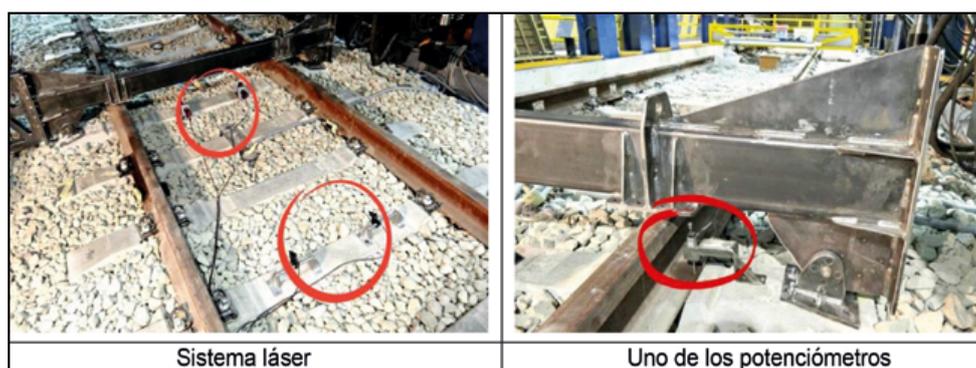


Figura 11. Vista de los elementos del sistema de medición, una vez instalados en la vía de ensayo.

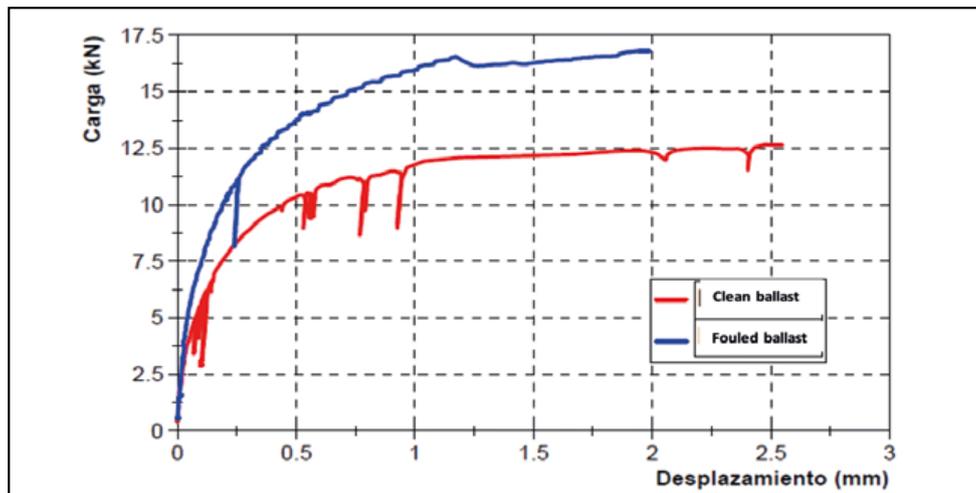


Figura 12. Resultado del ensayo realizado con la traviesa sobre balasto limpio.

contribuciones son entre 65 y 80 % y entre 15 y 30 %, respectivamente, siendo el restante 5 % debido al rozamiento lateral y al empuje activo en el hombro dorsal de la traviesa.

- Los ángulos de rozamiento del balasto utilizados en la modelización numérica están comprendidos entre 66,5° y 73,5°, que pueden considerarse bastante elevados, aunque concuerdan muy bien con los resultados de los ensayos de corte directo de grandes dimensiones realizados en el CEDEX con balasto en diferentes condiciones (Estaire y Santana, 2018).

2.4. Ensayos con cargas cuasi-estáticas

2.4.1. Determinación del asiento permanente de la capa de balasto

Desde que se inauguró la instalación, se han realizado 26 ensayos de fatiga de balasto en el CFC en las siguientes condiciones de ensayo:

- Se utilizaron dos tipos de trenes: trenes de pasajeros (con velocidades entre 300 y 320 km/h y cargas por eje principalmente entre 170 y 190 kN) y trenes de mercancías (con velocidad de 120 km/h y cargas por eje en el rango entre 225 y 250 kN).

- Se simularon dos tipos diferentes de capa de sub-balasto: granular con un espesor de 20 y 30 cm y bituminoso con un espesor de entre 8 y 16 cm.
- Se usaron dos tipos diferentes de sistemas de vía: Tipo A) traviesas GIF AI-99 con un peso de 3,44 kN y suelas bajo carril con una rigidez de 100 kN/mm y Tipo B) traviesas B90.2 con un peso de 6,10 kN, equipadas con suelas bajo traviesas (USP), con 0,1 N/mm³ de módulo de rigidez estática y suelas bajo carril con una rigidez de 450 kN/mm.
- Se ensayaron dos situaciones diferentes en la capa de balasto: limpia y contaminada con arena del desierto en diferentes proporciones entre 0 y 100 %.
- Los elementos de la sección ferroviaria indicados anteriormente hicieron que la vía tuviera diferentes valores de rigidez vertical (K) entre 65 y 125 kN/mm.
- En todos los ensayos, el espesor de la capa de balasto fue de 35 cm, medido bajo la traviesa del carril interno, formada por partículas de andesita.
- En todos los ensayos, se aplicaron, al menos, un millón de ejes.

En estos ensayos, se obtuvieron las curvas de asiento permanente correspondientes a las capas de balasto, sub-balasto y capa de forma. El conjunto de curvas

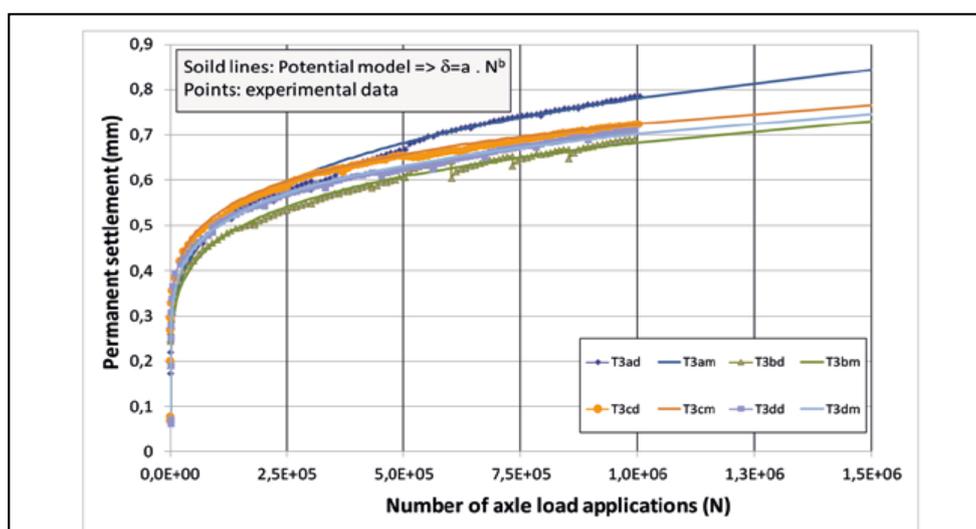


Figura 13. Algunas curvas de asentamiento de balasto y su modelado.

de asiento permanente obtenidas para la capa de balasto, como las que se muestran en la figura 13, se analizó para discriminar los principales factores que tienen influencia en el asiento de la vía y para obtener una expresión matemática que ajustara los resultados (Estaire *et al.*, 2021).

Los principales aspectos que se pueden destacar del análisis de las curvas experimentales y su modelización numérica son:

- Los valores del asiento permanente obtenidos en los ensayos son, en promedio, alrededor de 1 mm en la capa de balasto, 0,03 mm en la capa de sub-balasto bituminoso y 0,02 mm en la capa de forma, una vez aplicados 1 millón de ejes de carga, independientemente de la velocidad de los trenes y de las cargas por eje aplicadas.
- Las curvas de asiento del balasto se modelizaron utilizando una expresión potencial ($\delta = a \cdot N^b$), en la que “a” representa el asiento en el primer ciclo de carga y “b” la tasa de crecimiento del asiento con el número de ejes aplicados. Desde un punto de vista conceptual, el parámetro “a” se puede relacionar con la carga por eje y el parámetro “b” con la velocidad del tren.
- Se obtuvo un buen ajuste de las curvas de ensayo que confirmó la validez de la expresión potencial utilizada en la modelización.
- El resumen del análisis realizado conduce a la siguiente expresión de la ley de asiento permanente de balasto, en función de la carga por eje (Q), de la rigidez de vía (K) y del número de aplicaciones de carga (N), válida para cargas por eje entre 110 y 250 kN y para trenes circulando hasta 320 km/h:

$$\delta [mm] = \frac{Q [kN]}{25 K [kN/mm]} N^{0.165} \quad [2]$$

2.4.2. Comportamiento dinámico de los diferentes elementos de la sección de ferrocarril

Durante los ensayos de fatiga descritos anteriormente, se pudo determinar el comportamiento dinámico de los elementos de la vía. Por un lado, se ha demostrado que la rigidez de vía obtenida en los ensayos cuasi-estáticos coincide prácticamente con los valores recogidos en la tabla 1, mostrada anteriormente, siendo las diferencias encontradas en todos los casos de alrededor de 2-4 %. Por otro lado, la instalación de geófonos y acelerómetros permitió medir velocidades y aceleraciones en diferentes elementos de la vía, como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Velocidad y aceleración de pico obtenidos en los ensayos de fatiga

	Velocidad de pico (mm/s)		Aceleración de pico (g)	
	Pasajeros	Mercancías	Pasajeros	Mercancías
Tren ⁽¹⁾				
Carril	40–45	15–20	1–1.5	0.5–0.8
Traviesa	20–30	10–15	0.5–1	0.15–0.3
Balasto	15–20	7–10	< 0.5	< 0.15

⁽¹⁾ Pasajeros: 300 km/h; 165 kN/eje; Mercancías: 120 km/h; 225–250 kN/eje.

Estos valores deben ser considerados como valores de referencia para vías férreas en buenas condiciones mecánicas, por lo que se pueden utilizar para determinar la necesidad de realizar trabajos de mantenimiento o reparación en aquellos casos en los que los valores medidos presenten diferencias apreciables.

2.4.3. Determinación de las deflexiones de carril para diferentes velocidades

Se han realizado ensayos en el CFC simulando el paso de trenes a diferentes velocidades (50-100-150-200-250-300-350-400 km/h), mediante los actuadores servohidráulicos, para analizar el efecto de la velocidad en la respuesta global de la vía. Para ello, se simuló un tren Alstom tipo S-100 (un tren con 13 bogies y casi 200 m de longitud), suponiendo una carga constante por rueda de 79,5 kN en lugar de las cargas reales, que se encuentran en el rango entre 68 y 85 kN, para facilitar la interpretación de los resultados.

Algunos de los resultados de los ensayos realizados con diferentes velocidades, en términos de deflexiones de carril, se muestran en la figura 14. Los resultados medidos de aceleración en traviesas y carril se recogen en Estaire *et al.* (2018).

El análisis de los resultados mostrados anteriormente permite destacar los siguientes aspectos de los ensayos:

- Los ensayos se pueden dividir en tres grupos según la deflexión del carril obtenida, como puede verse en la figura 15 (izda):
 - Velocidades inferiores a 100 km/h: deflexión del carril inferior a 1 mm.
 - Velocidades entre 150 y 300 km/h: deflexión del carril ligeramente superior a 1 mm.
 - Velocidades superiores a 300 km/h: la deflexión del carril aumenta de forma constante hasta 1,15 mm.
- El aumento de la deflexión del carril es de 0,93 a 1,15 mm cuando la velocidad del tren pasa de 0 a 400 km/h. Eso supone un incremento del 25 %, aunque apenas suponga un incremento de 0,2 mm.
- Las deflexiones de carril obtenidas para velocidades superiores a 300 km/h pueden considerarse bastante constantes, mientras que para 350 y 400 km/h las deflexiones de carril máximas son más irregulares y oscilan mucho más que las obtenidas para velocidades menores.
- También se puede observar que la oscilación libre del carril tras el paso del bogie aumenta significativamente con la velocidad.
- Los resultados se pueden utilizar para deducir la velocidad crítica del modelo a escala 1:1 construido en CFC, con la ayuda del gráfico de la figura 15 (dcha) que relaciona el aumento de las deflexiones del carril con el aumento de la velocidad del tren (Estaire y Crespo-Chacón, 2018). Las curvas de dicha figura, para diferentes relaciones de amortiguamiento, aparecen como la solución de la ecuación diferencial cuya solución proporciona la deflexión vertical de una viga infinita sobre una base elástica cuando una carga se mueve sobre ella (Frýba, 1999).

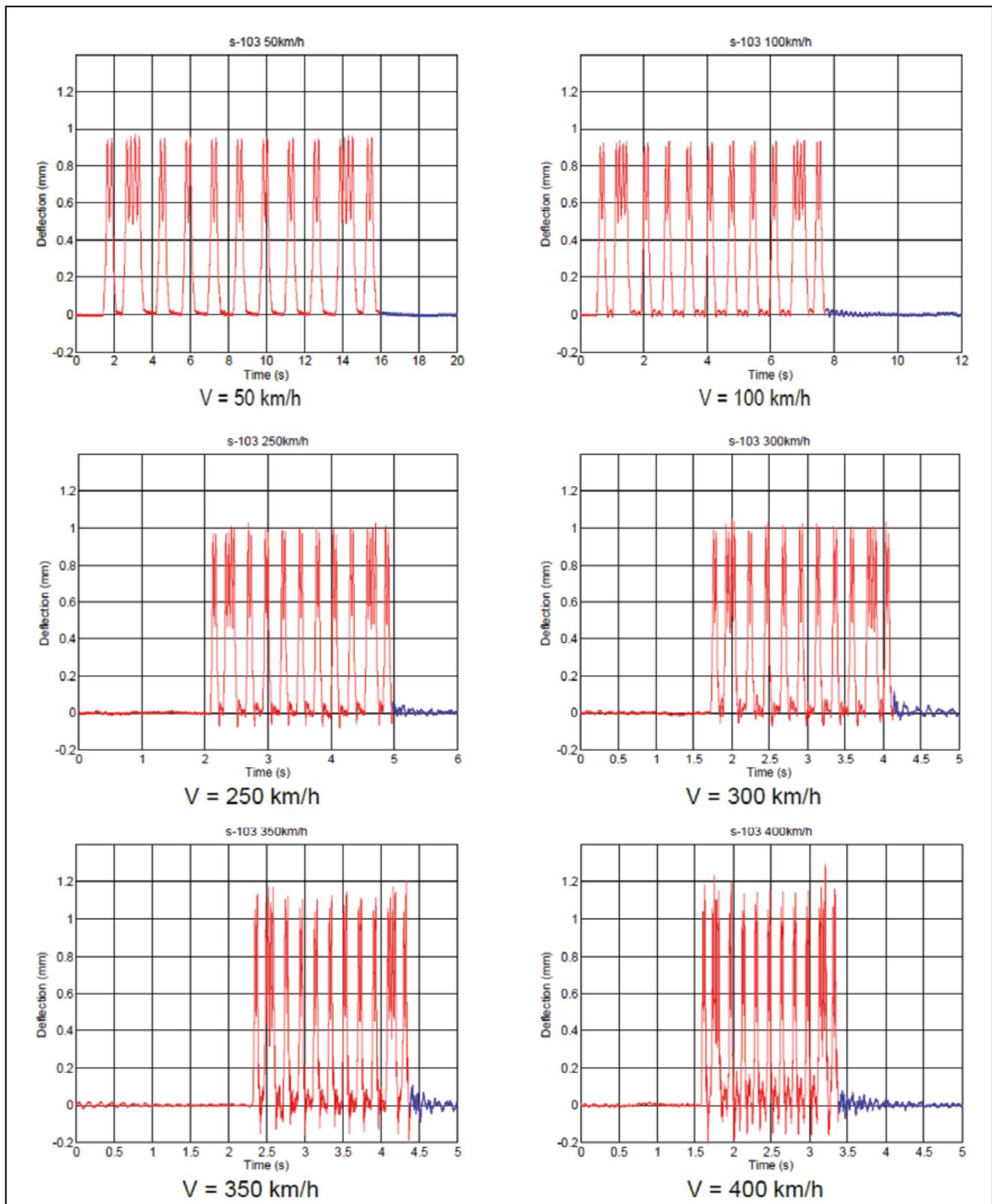


Figura 14. Curvas de deflexión de carril obtenidas para diferentes velocidades de tren en ensayos realizados en el CFC.

- El mejor ajuste de los resultados se obtiene, en este caso, para una velocidad crítica de 640 km/h, valor que se puede considerar suficientemente preciso para una vía de alta velocidad ferroviaria de buenas características.

El concepto de velocidad crítica y sus métodos de determinación han sido objeto de múltiples estudios en los últimos años en el LG, destacándose por su novedad el método basado en el Análisis Espectral de las Ondas Superficiales (Kausel *et al.*, 2020).

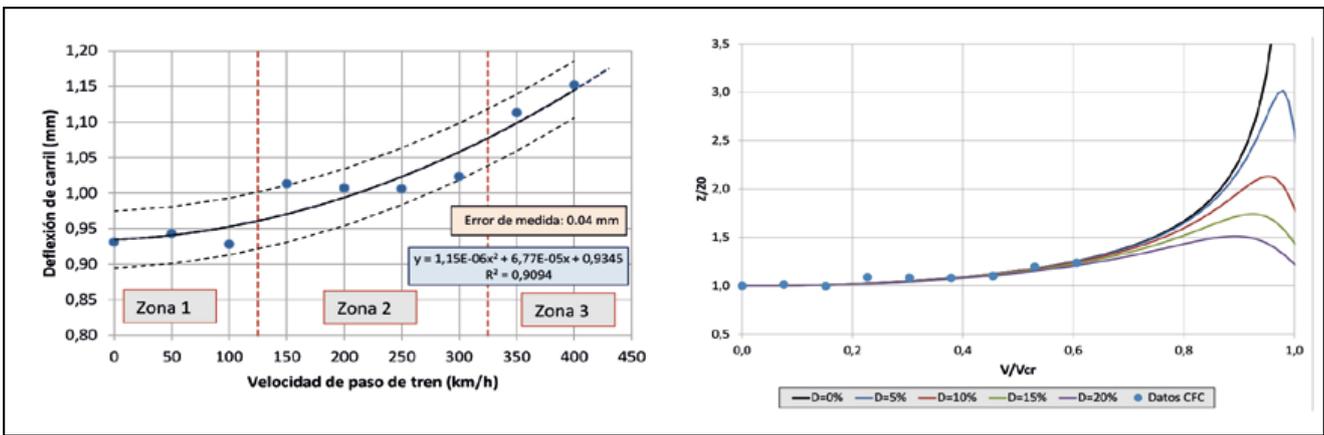


Figura 15. Análisis de los desplazamientos obtenidos para diferentes velocidades del tren para deducir la velocidad crítica del modelo a escala 1: 1 construido en CFC.

3. INSTRUMENTACIÓN DE VÍAS FERROVIARIAS

3.1. Introducción

La actividad llevada a cabo en el ámbito de la infraestructura ferroviaria ha dado lugar a la puesta a punto de una serie de equipos y técnicas de instrumentación y modelización numérica muy diferentes a los utilizados por el LG en el ámbito de las carreteras.

Pueden destacarse los siguientes objetivos básicos de estos trabajos:

- Mejora en el conocimiento del comportamiento de las secciones utilizadas por ADIF.
- Obtención de información destinada a optimizar el diseño, cálculo y mantenimiento de la infraestructura.
- Toma de datos *in situ* para el contraste de los trabajos llevados a cabo en el CFC.
- Calibración de modelos numéricos.
- Evaluación de la colaboración de las distintas capas en la rigidez global de la vía.
- Análisis de patologías y comportamiento de transiciones y secciones singulares.

Las líneas de actividad principales han sido las siguientes:

- Instrumentación general. Datos para calibrado del CFC en secciones con instrumentación superficial y profunda dispuesta en fase de obra.
- Estudio de transiciones terraplén - estructura.
- Estudio de transiciones vía en placa - vía sobre balasto.
- Estudio y contraste del comportamiento de secciones con sub-balasto granular y con sub-balasto bituminoso.
- Estudio de secciones con espesores importantes de balasto.
- Patologías de sujeciones en vía en placa.
- Estudio de la utilización de instrumentación con fibra óptica en líneas de alta velocidad.
- Detección de la evolución de cavidades en túneles en materiales salinos.
- Análisis de diferentes técnicas para el control del grado de compactación del sub-balasto granular.

Con el objetivo de describir las técnicas empleadas, se describen los trabajos realizados en el tramo Fuencaerral-Canto Blanco, de la línea de alta velocidad Madrid-Segovia-Valladolid, descritos en el trabajo de García de la Oliva y Moreno (2019). En la figura 16 se muestran los tramos de líneas de alta velocidad en los que el CEDEX ha trabajado en los últimos años.



Figura 16. Secciones de LAV instrumentadas por el CEDEX.

3.2. Instrumentación de una sección ferroviaria desde la fase de construcción

La instrumentación de una sección ferroviaria se puede dividir en instrumentación interna y externa.

La instrumentación interna incluye los sensores colocados en las distintas partes del terraplén y en las capas de forma, sub-balasto y balasto que se suelen instalar de forma simultánea a la ejecución de la sección. Generalmente se han usado los siguientes equipos (figura 17):

- Micrómetros deslizantes.
- Transductores de desplazamiento con sensor LVDT para medir las deformaciones de las distintas capas.
- Células de presión para definir la transmisión de tensiones en profundidad.

Como instrumentación externa se han empleado los siguientes sensores (figura 18):

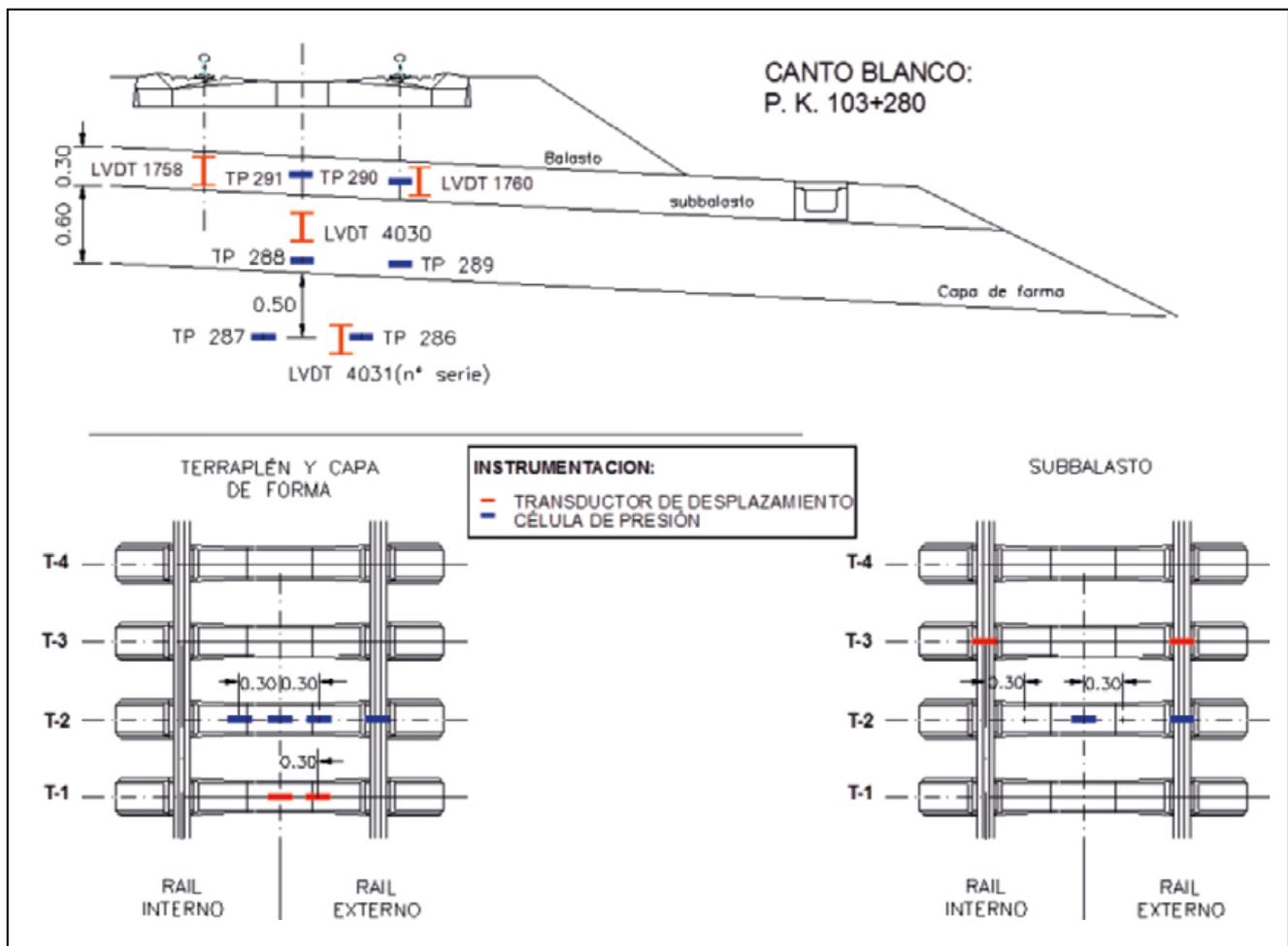


Figura 17. Instrumentación dispuesta en coronación de terraplén y subestructura.

- Bandas extensométricas a puente completo colocadas en el alma del carril para definir las cargas transmitidas por las ruedas y las reacciones sobre las traviesas. Estos sensores se han utilizado asimismo para determinar las velocidades de los trenes registrados.
- Geófonos de 2 Hz y láser para las medidas de desplazamiento absoluto de carril.
- Geófonos de 1 Hz para medidas del desplazamiento de las traviesas.
- Potenciómetros de medida de desplazamiento relativo entre traviesa y patín de carril.
- Acelerómetros para medir la aceleración de los movimientos de carril y traviesa, fundamentalmente.

3.3. Determinación de movimientos postconstructivos

La cuantificación de los asientos postconstructivos de la plataforma se realiza mediante el micrómetro deslizante vertical que se suele instalar una vez que el terraplén alcanza la cota de capa de forma.

En el caso que se enseña, en los primeros cinco años después de la entrada en servicio, el asiento sufrido por la plataforma fue de 9,5 mm, y según se aprecia en la figura 19, la mayor parte del asiento se desarrolló por deformaciones del material entre 5 y 14 m bajo la cota del sub-balasto (la mitad inferior del terraplén y la zona más superficial del cimentado). El asiento citado (9,5 mm) representa un 0,8 % de la altura del terraplén lo que corresponde a un relleno de buena calidad geotécnica.



Figura 18. Instrumentación externa en sección ferroviaria.

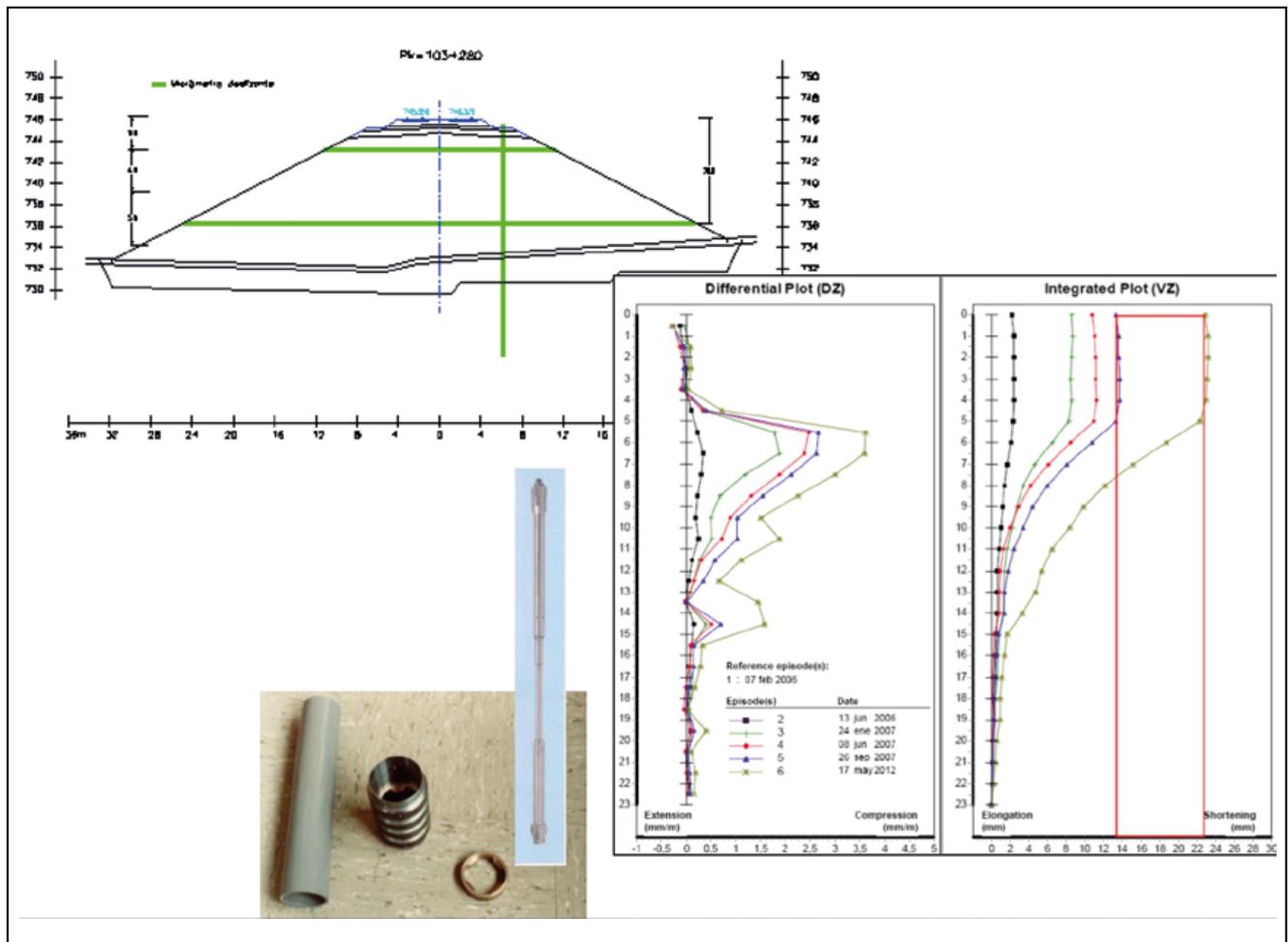


Figura 19. Micrómetro deslizante.

3.4. Obtención de cargas, reacciones y velocidades de paso de tren mediante bandas extensométricas

Las bandas extensométricas se utilizan para la medida del esfuerzo cortante sufrido por el carril al paso de los trenes. En la figura 20 se muestra la colocación de dichas bandas extensométricas en el carril durante la auscultación de un tramo.

Por su parte, en la figura 21 se indica el esquema operativo utilizado para determinar la carga Q inducida en la vía por el paso de una rueda del tren. Se obtiene restando las historias de los esfuerzos cortantes Q_2 , determinadas en



Figura 20. Colocación de bandas extensométricas en el carril.

dos puntos de un vano de vía situado entre dos traviesas consecutivas. Teniendo en cuenta que la longitud de dichos vanos es de 0,60 m, se ha considerado conveniente separar dichos puntos 0,30 m, situándolos a 0,15 m del centro del vano elegido.

Como ejemplo de las historias de cargas que pueden obtenerse en un punto de la vía con esta técnica, en la parte superior de la figura 22 se han representado las historias de esfuerzos cortantes Q_2 y Q_1 inducidas por un tren ALVIA circulando a 200 km/h en un vano de vía, instrumentado según el esquema de la figura 21. En la parte inferior de dicha figura se muestra la historia de las cargas Q producidas en el carril instrumentado por el paso de las ruedas de dicho tren, obtenido restando los valores de Q_2 y Q_1 .

De manera análoga, pero disponiendo de bandas extensométricas a cada lado de una traviesa puede obtenerse la historia de la resultante de las cargas que actúan sobre la misma al paso de un tren y deducirse la historia de reacciones sobre ella (R_1 y R_2 en la figura 21) ya que se conoce, gracias al procedimiento descrito anteriormente, la historia de carga por rueda (Q).

Se han realizado cálculos numéricos tridimensionales con objeto de confirmar la bondad del método de análisis de datos procedentes de la auscultación de cargas empleada en las secciones ferroviarias de campo. El procedimiento empleado en los trabajos de campo consiste en determinar la deformación en el alma del carril con las bandas extensométricas, y a partir de ella, calcular la tensión tangencial y el esfuerzo cortante en la sección.

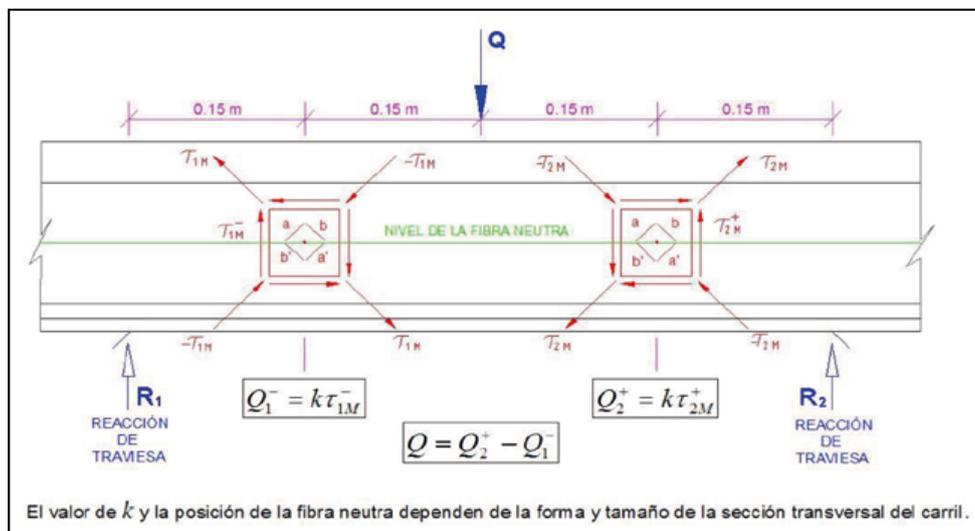


Figura 21. Esquema seguido para el pegado de bandas extensométricas en un vano de vía entre traviesas.

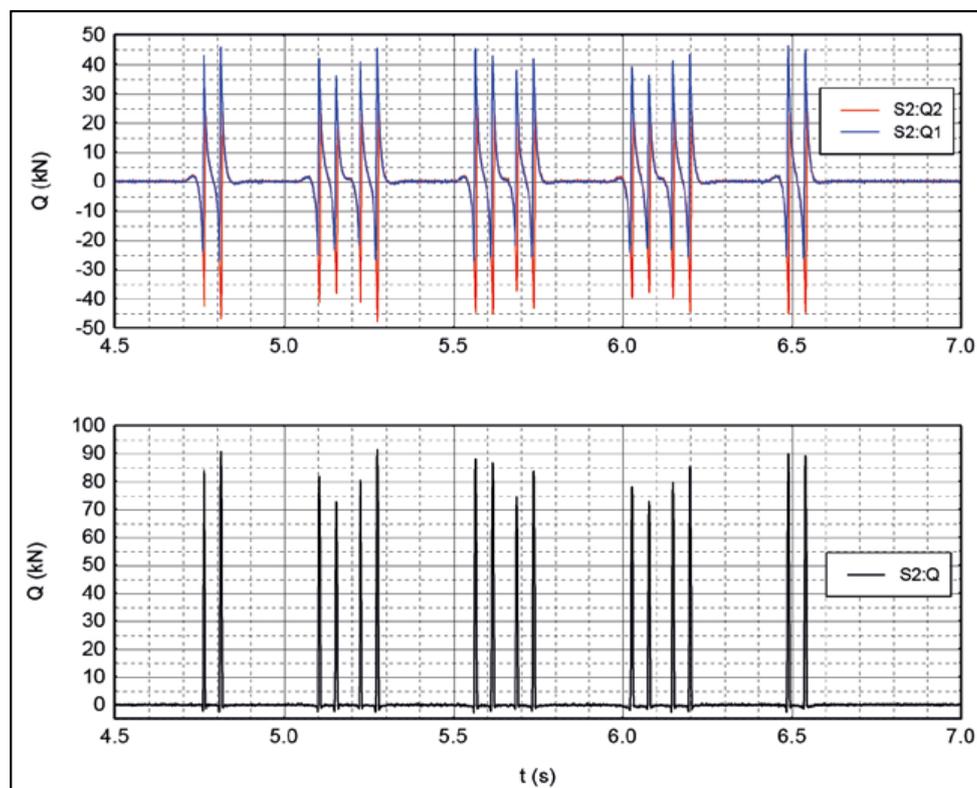


Figura 22. Historia de cargas Q por rueda obtenida restando las historias de esfuerzos cortantes Q_2 y Q_1 inducidas en un vano de alta velocidad por un tren ALVIA a 200 km/h.

En la figura 23 se recogen los resultados de estos cálculos. Se compara el cortante obtenido integrando las tensiones tangenciales con el obtenido a partir de la formulación que relaciona la tensión tangencial en el alma de una viga con el esfuerzo cortante de la sección.

Se observa que el procedimiento de obtención del esfuerzo cortante a partir de las bandas extensométricas presenta un error inferior a 2 % a partir de una distancia de 10 cm del punto de aplicación de la carga, aunque a 5 cm del punto de aplicación el error sube hasta el 17 %.

La medida de cargas se está realizando con bandas extensométricas separadas 30 cm entre sí, obteniendo la carga cuando ésta está situada a mitad de distancia entre ellas (15 cm) con lo que la precisión debería ser superior al 2 % citado.

Con el fin de comprobar la precisión del conjunto del sistema de medida de cargas se han efectuado ensayos en el CFC en los que se han contrastado las cargas aplicadas por el actuador con los valores registrados empleando la misma tecnología utilizada en la sección instrumentada en Cantoblanco (figura 24).

El error obtenido es del 1 %. Estas medidas se han realizado en un ambiente con menor ruido que el que se observa en el campo por lo que previsiblemente la precisión obtenida en el campo sea ligeramente inferior.

Mediante las bandas extensométricas se ha evaluado la reacción sobre las traviesas denominadas T2 y T3, así como su relación con la carga por rueda. Se observa que hay un diferente comportamiento en las dos traviesas: para T2 se obtienen valores medios de 39 kN para S-130 a los 2 años

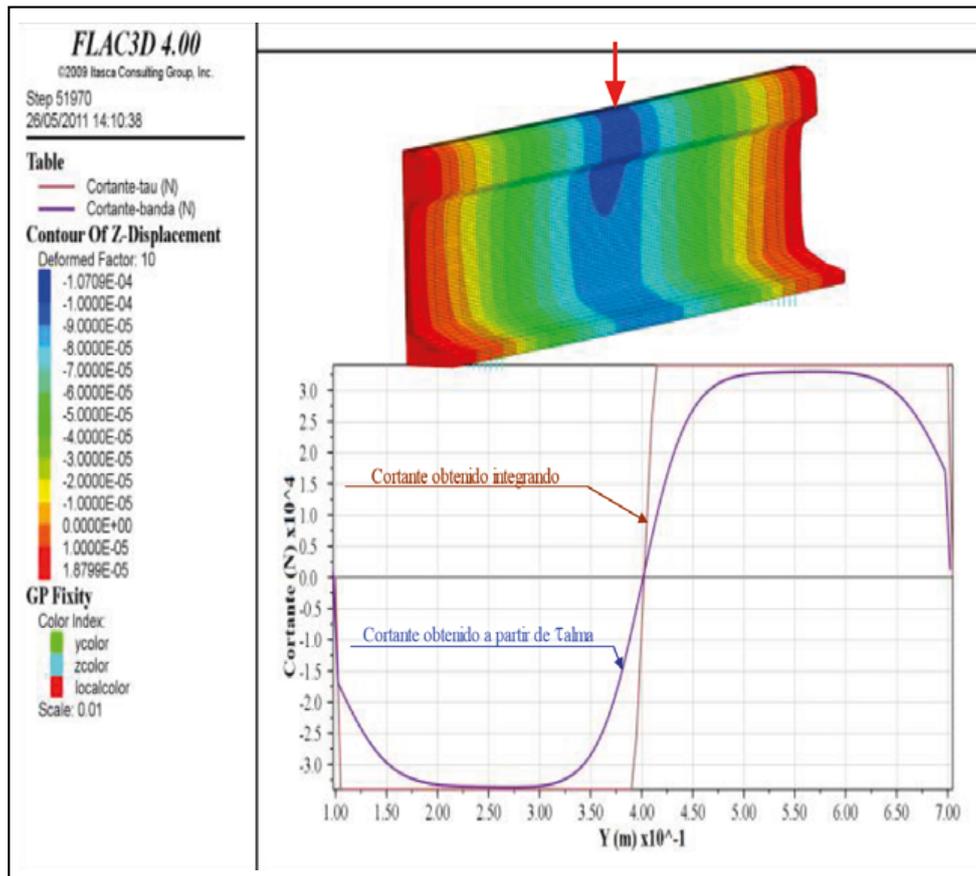


Figura 23. Modelo numérico para estudiar la validez del procedimiento de cálculo del esfuerzo cortante.

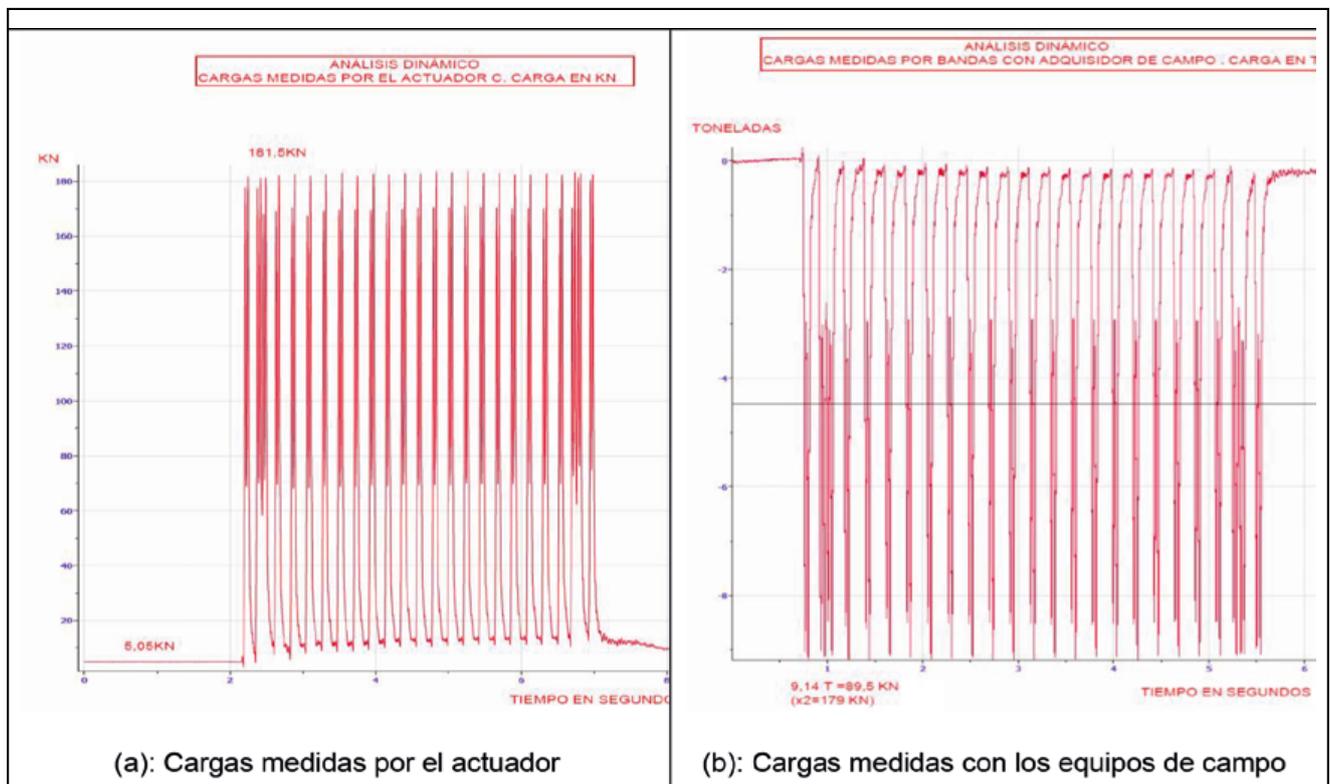


Figura 24. Contraste del procedimiento de medidas de cargas en la Instalación para Ensayos de Infraestructura Ferroviaria del CEDEX.

de 37-38 kN a los 4 años de la puesta en servicio, mientras que para estos mismos trenes en T3 se miden valores medios de 24 kN a los 2 años y 27 kN en a los 4 años. Para el tren tipo S-121 las reacciones medias en ambas traviesas son ligeramente inferiores a las anteriores: 34 kN en T2 y

21 kN en T3 (campana de 2009). Los trenes circularon por esta sección con una velocidad en torno a 105 a 110 km/h.

El cociente entre la reacción en traviesa y la carga por rueda bajo el hilo exterior de la traviesa T2 baja de un valor medio del 54,9 % a los 2 años de la puesta en servicio al

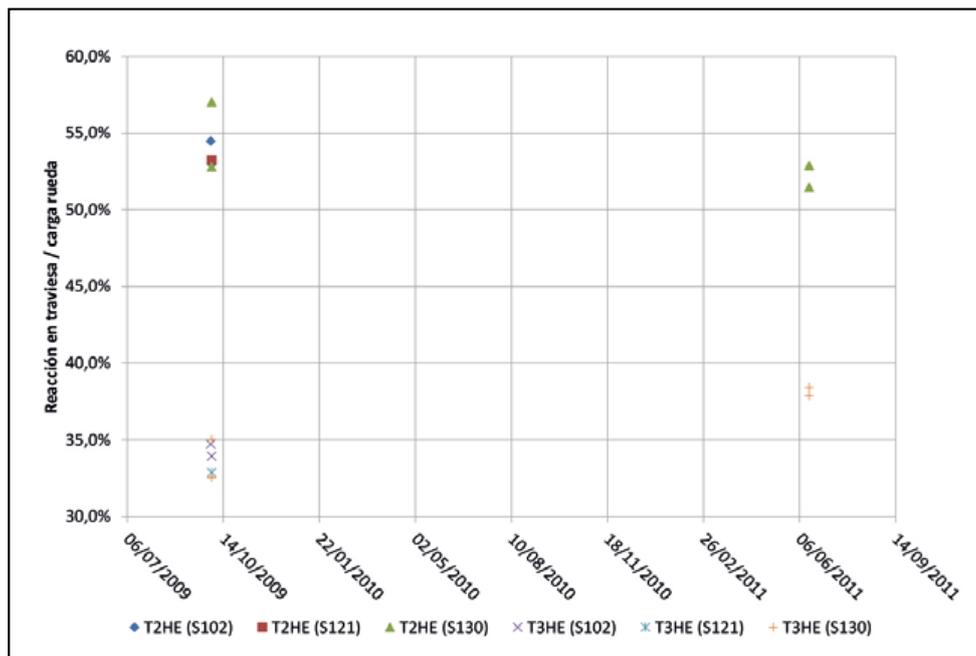


Figura 25. Razón entre reacciones medias en traviesa y carga por rueda.

52,2 % a los 4 años mientras que bajo el hilo exterior de la traviesa T3 sube del 33,8 % al 38,2 % (figura 25). Esto puede deberse a la evolución del comportamiento del apoyo de las travéses o bien a la ejecución de un bateo intermedio, del que se tiene constancia por la información recibida de los técnicos de mantenimiento.

De estas medidas puede resaltarse la diferencia de comportamiento entre travéses contiguas. Las reacciones obtenidas en otros emplazamientos presentan valores intermedios entre los detectados en estas dos travéses.

3.5. Obtención de movimientos del carril y rigidez de vía mediante láser y geófonos

La medida de los desplazamientos absolutos de carril bajo cargas estáticas (tren parado) o dinámicas (tren con velocidad) se realiza mediante dos sistemas de medida sin contacto: el primero basado en un emisor láser y sus sensores de desplazamiento del tipo PSD (*Position Sensitive Device*) y el segundo, mediante la integración de la señal proporcionada por geófonos (figura 26).

Estos sensores láser son una variedad especial de fotodiodos de silicio que proporcionan una señal analógica de

salida directamente proporcional a la posición del punto luminoso procedente del láser de excitación sobre el área activa del sensor.

El sensor láser por su filosofía de medida requiere de un punto fijo en la posición del emisor que emita un rayo horizontal de luz cuya posición constante en el espacio sirve de nivel de referencia de las medidas que se toman en el receptor (figura 26). En campo, este punto fijo no es tal ya que el trípode que se utiliza como soporte del emisor se apoya sobre la capa de sub-balasto junto a la canaleta de vía y, por tanto, se ve afectado por las vibraciones generadas por el propio tren, tanto las que se propagan por el aire como por el terreno. Estas vibraciones pueden explicar la dispersión de las medidas tomadas con el sensor láser en los registros de campo frente a la gran calidad obtenida con el mismo equipo en las medidas efectuadas en el CFC. La obtención de un punto fijo situado junto a la vía necesario por la distancia requerida para medir con el sensor láser es un asunto a considerar. En otros emplazamientos, con el objetivo de intentar solventar este problema, se ha dispuesto el emisor láser en las torres de soporte de la catenaria. Los resultados así obtenidos han sido, sin embargo, más desfavorables por el aumento de la distancia.

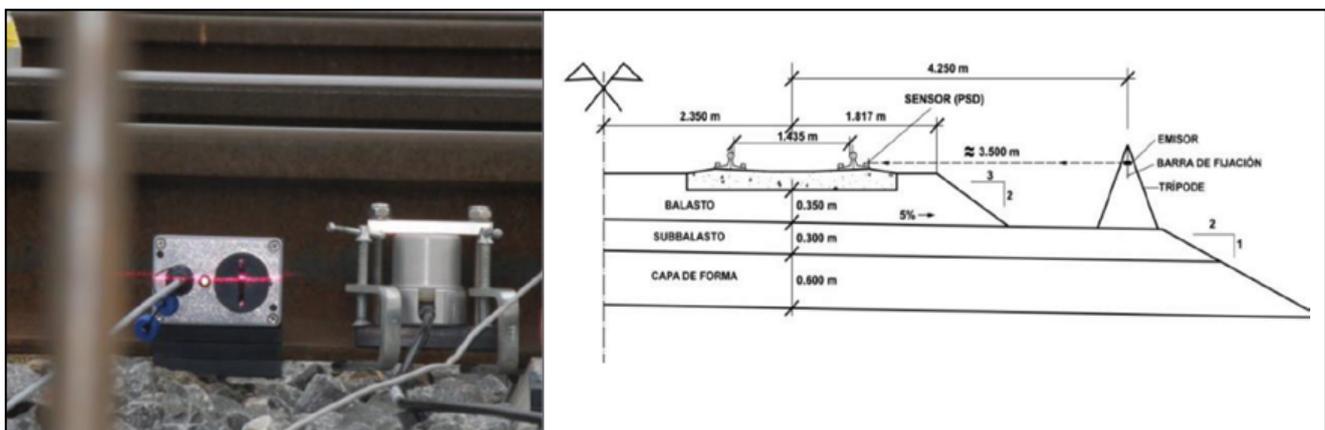


Figura 26. Sensor láser y geófono (izda). Esquema de medida con sensor láser (dcha).

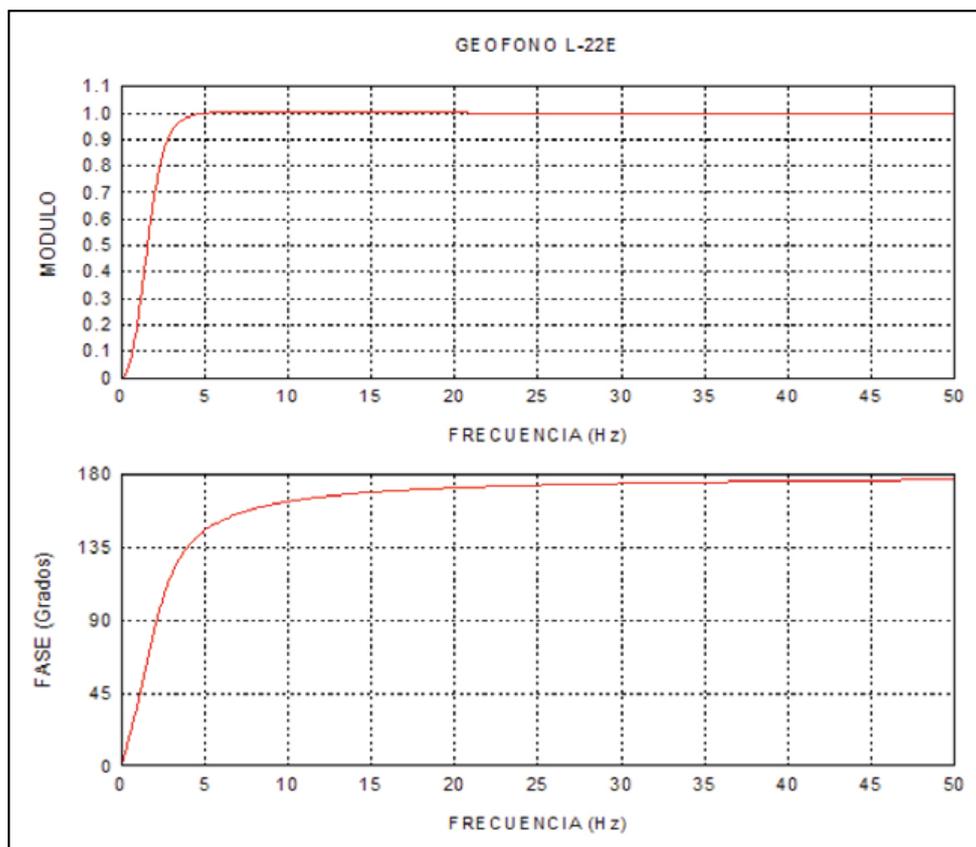


Figura 27. Curvas de respuesta de un geófono de 2 Hz.

Para la medida de desplazamientos se han empleado asimismo geófonos. Son transductores pasivos electrodinámicos de baja frecuencia de resonancia y alta sensibilidad. El registro procedente de estos sensores es en términos de velocidad, por lo que debe integrarse para obtener las deflexiones del carril.

Se han utilizado geófonos de 2 Hz solidarios al carril (figura 26 - izda), cuyas curvas de respuesta se muestran en la figura 27. La posición en la que se instalaron los sensores, con un gálibo reducido, ha impedido utilizar geófonos con menor frecuencia de resonancia para la medida de los movimientos del carril que pudiera mejorar la bondad de los registros obtenidos.

Antes de integrar las señales captadas por el geófono para obtener las deflexiones del carril, es necesario modificar las fases de los armónicos que constituyen dichas señales. Con ello se han conseguido registros de la deflexión de gran calidad para velocidades superiores a 100km/h (figura 28).

Frente a otros tipos de sensores de similares dimensiones, como pueden ser los acelerómetros, los geófonos ofrecen la ventaja de no necesitar alimentación eléctrica externa y de permitir corregir la línea base de las señales integradas de una manera relativamente sencilla.

Según la experiencia del LG, se consideran más precisas las medidas obtenidas a partir de la integración de los registros de los geófonos de 2 Hz que las obtenidas con el láser debido a la dificultad de conseguir un punto fijo para la sujeción del emisor, y por ello son las utilizadas normalmente en este tipo de estudio. Las medidas con los sensores láser sirven por el momento para confirmar el orden de magnitud de las medidas tomadas con los geófonos.

En la campaña de medidas del año 2009 (2 años después de la puesta en servicio), tanto para los trenes tipo S-102 como tipo S-130, se obtiene un valor medio de desplazamiento de carril de aproximadamente 0,66 mm. En 2011, el valor medio de las medidas de desplazamiento de carril asciende a 0,74 mm para los trenes tipo S102 y hasta 0,78 mm para los trenes tipo S-130. Nótese que estas medidas son las obtenidas a partir de los geófonos de 2 Hz. Las deflexiones medidas son generalmente similares en los dos hilos de cada vano.

Al comparar los registros 2 y 4 años después de la puesta en servicio, y teniendo en cuenta los valores de las cargas medidas en ambos años, se observa que siendo iguales las cargas, la deflexión de carril registrada a los 4 años es de un 10 a un 20 % superior a la medida a los 2 años.

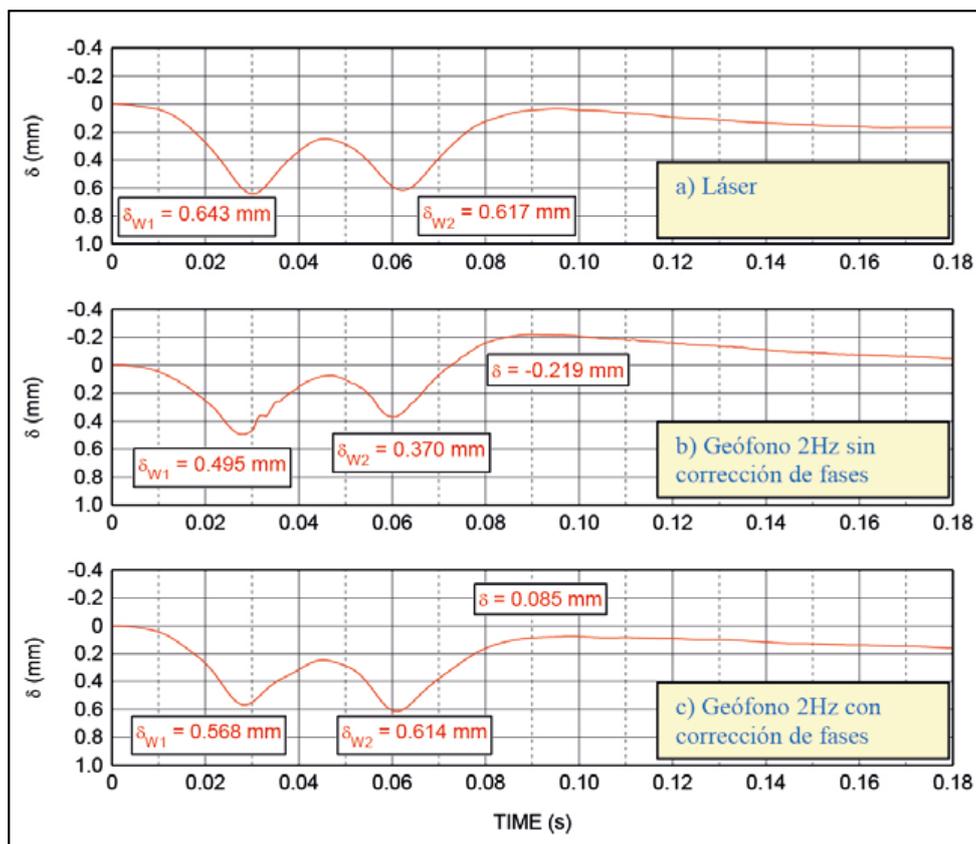


Figura 28. Deflexiones absolutas de la vía obtenidas: a) con un sistema de rayos láser; b) sin corregir las fases de la señal recibida en un geófono de 2Hz; y c), corrigiendo previamente las fases de la señal captada con el geófono.

3.6. Obtención de la rigidez de vía

La rigidez de vía se puede obtener como cociente entre la carga por rueda y la deflexión del carril, una vez que se han medidos en el mismo punto, tal como se comentaba en apartados anteriores.

En el caso de Cantoblanco, la rigidez media de vía obtenida (K) presenta valores entre 109 y 115 kN/mm en 2009 y entre 91 y 96 kN/mm en 2011. A la luz de estos resultados, se concluye que la rigidez de la vía ha bajado en el periodo entre los 2 y 4 años desde la puesta en servicio. Podría esperarse, sin embargo, que los esfuerzos verticales producidos por el paso de las circulaciones produjesen con el tiempo un asiento remanente en la banqueta de balasto y una rigidización de ésta. La pérdida de rigidez detectada podría achacarse a las operaciones de bateo que se han llevado a cabo en parte para alcanzar la rasante inicial perdida por el asiento en la plataforma.

3.7. Obtención de movimientos de suela bajo carril y traviesa mediante potenciómetros y geófonos

Los potenciómetros miden el desplazamiento relativo entre la traviesa y el patín del carril, por lo que son una medida del acortamiento de la suela bajo carril (PAD) al paso de los ejes del tren (figura 29).

En el caso de Cantoblanco, el cociente entre la reacción sobre una traviesa y el desplazamiento de la suela bajo carril fue de unos 180 kN/mm.

Del valor de descenso de las traviesas instrumentadas con geófonos de 1 Hz se deduce que, dentro de una misma



Figura 29. Potenciómetro y geófonos.

campana de medidas, el descenso medio de una traviesa fue de 0,40 a 0,50 mm en el año 2009, y se incrementó aproximadamente en 0,1 mm en el año 2011.

3.8. Obtención de presiones y movimientos en las capas ferroviarias

Las presiones verticales generadas por la circulación de los trenes en las diferentes capas de la infraestructura ferroviaria se miden con células de presión que se colocan en posiciones estratégicas de la sección instrumentada.

Así, por ejemplo, en el caso de Cantoblanco, en la figura 17, mostrada anteriormente, se presenta la situación de la instrumentación empleada en estos trabajos. Las células de presión se colocaron bajo los carriles, justo debajo de cuatro traviesas. Además, se colocaron dos células en la parte central de 2 de ellas.

En la figura 30 se recoge un momento de la instalación de las células de presión bajo una traviesa y en la figura 31

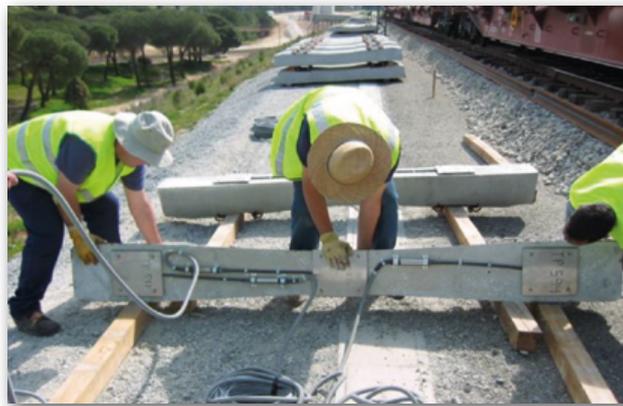


Figura 30. Instalación de células de presión bajo las traviesas.

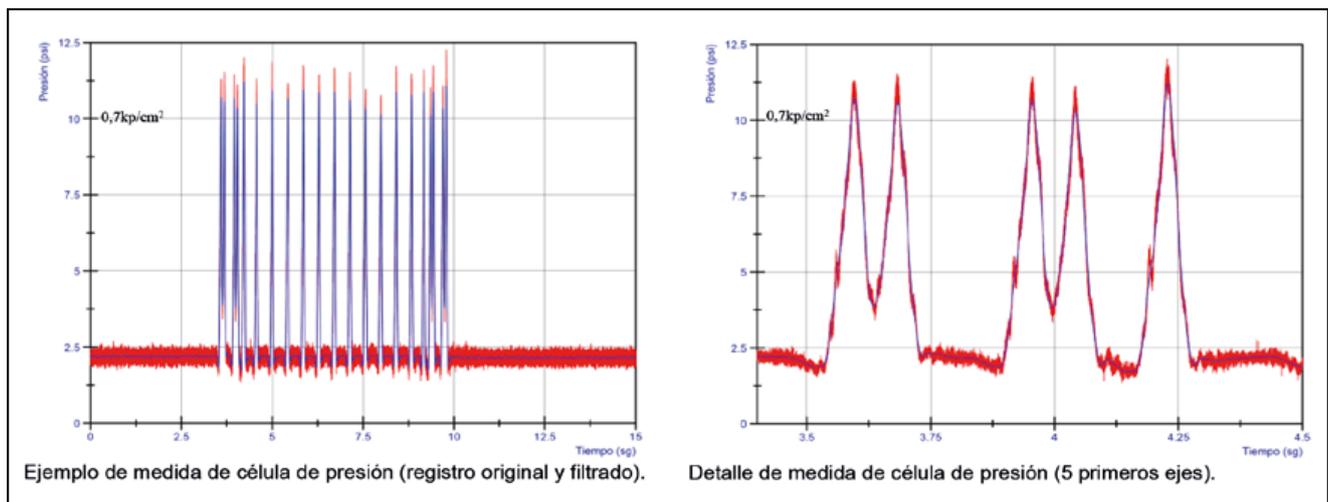


Figura 31. Registros original y filtrado de medidas de célula de presión.

un ejemplo de los registros obtenidos. En rojo se dibuja la señal original y en azul la señal filtrada, ambas en unidades PSI y sin corregir de cero. Se observa que la coincidencia entre ambas señales es buena, puesto que existe poco ruido en la señal original. Este ruido desaparece prácticamente en su totalidad al realizar el filtrado. El análisis espectral de la señal registrada por las células de presión condujo a la aplicación de un filtro tipo pasa-baja (*low-pass filter*) con frecuencia de corte en 40 Hz.

El análisis de estas presiones muestra dispersión de medidas entre los distintos sensores. Los valores medios obtenidos de las 8 células situadas bajo traviesa son de 110 a 120 kPa. Las medidas bajo traviesa tomadas en el punto medio de las mismas son obviamente menores que las obtenidas bajo los carriles, presentando valores de 35 y 10 kPa. Estos valores se han obtenido en otros estudios realizados, por lo que se puede considerar ese rango de valores como representativos para trenes de pasajeros.

Los valores de presión obtenidos en la región de contacto balasto/sub-balasto son más uniformes que los obtenidos en los sensores dispuestos bajo traviesa. Los valores medios resultantes en las células dispuestas bajo carriles en el contacto de las capas de balasto y sub-balasto son de 55 a 70 kPa. Según estos datos la transmisión de la carga dinámica a lo largo de la capa de balasto es bastante vertical, o en otras palabras, el reparto de carga a lo largo de la capa de balasto es pequeño. Por otro lado, en el punto medio de las traviesas, en el contacto balasto-sub-balasto se obtienen valores medios de 20 kPa.

Los transductores de desplazamiento (LVDT) se utilizan para medir el acortamiento de las capas internas (balasto, sub-balasto, capa de forma y coronación de terraplén). En el caso de Cantoblanco, en la capa de balasto se colocaron transductores de desplazamiento bajo el punto medio de las traviesas instrumentadas (figura 32). En la



Figura 32. Sensor LVDT utilizado en la capa de balasto.

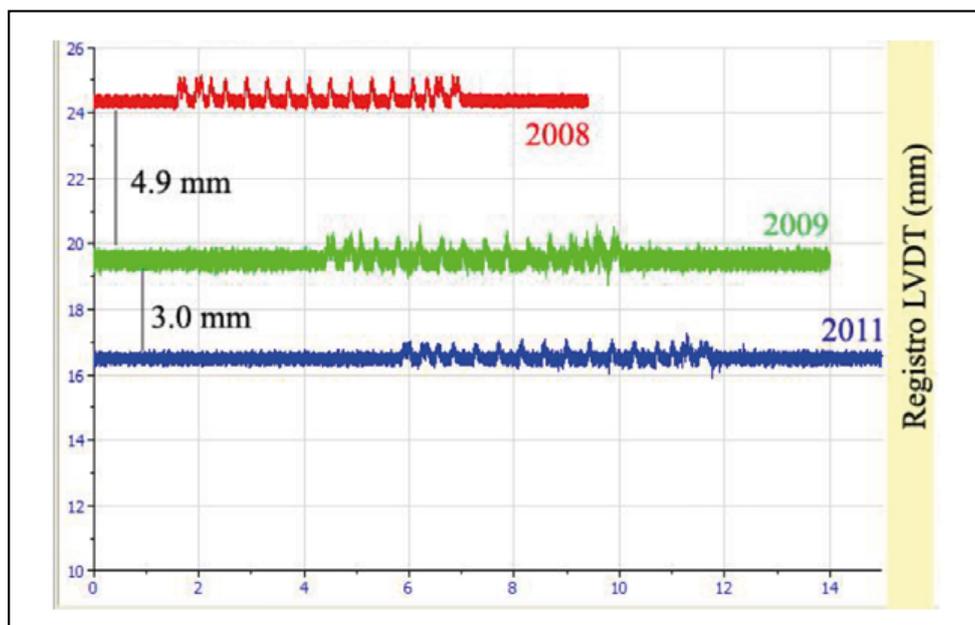


Figura 33. Evolución temporal del nivel basal registrado en los transductores de desplazamiento situados en la capa de balasto en una de las traviesas auscultadas.

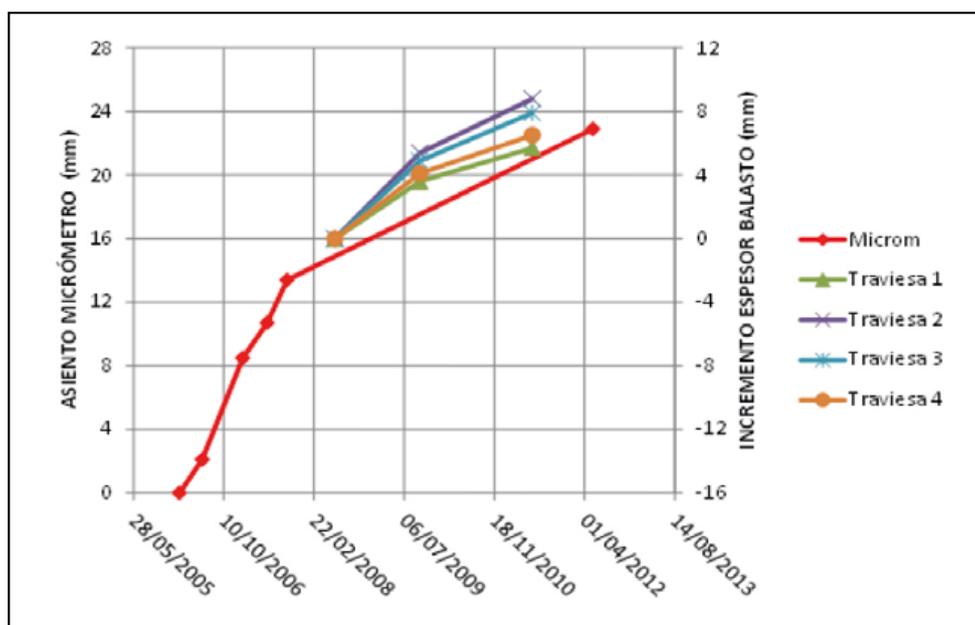


Figura 34. Asiento de la coronación del terraplén frente a la evolución del espesor de balasto.

capa de sub-balasto se dispusieron transductores de desplazamiento, bajo el hilo interior y el hilo exterior. En la capa de forma y coronación de terraplén se situaron sendos transductores de desplazamiento, ambos bajo el punto medio de una traviesa.

Para eliminar el ruido en las señales de los LVDT se suele utilizar un filtro tipo pasa-baja. En este caso, se empleó una frecuencia de corte diferente para cada registro (variando entre 18 y 40 Hz), elegida en función del resultado obtenido al analizar espectralmente cada una de las señales.

En la figura 33 se representa la deformación del balasto al paso de trenes en los años 2008, 2009 y 2011. En cada una de las curvas se aprecia el paso de un tren marcándose los distintos ejes y la deformación de compresión provocada por cada uno de ellos.

Los sensores LVDT registran un incremento del espesor de balasto bajo las traviesas en el periodo de

medidas que concuerda correctamente con los asientos de la plataforma registrados con el micrómetro deslizante (figuras 33 y 34). A la vista de estos resultados parece reflejarse que el asiento de la coronación del terraplén se ha contrarrestado en las operaciones de bateo incrementando el espesor de la capa de balasto para mantener la cota de rasante.

En la capa de sub-balasto se registraron deformaciones al paso de los trenes comprendidas entre 0,05 y 0,15 mm.

4. ANÁLISIS NUMÉRICO DE SECCIONES FERROVIARIAS

En los últimos años, el LG ha impulsado la modelización numérica de diversos aspectos singulares de las vías férreas, entendiendo esta metodología de cálculo como una herramienta adecuada para el análisis de detalle del

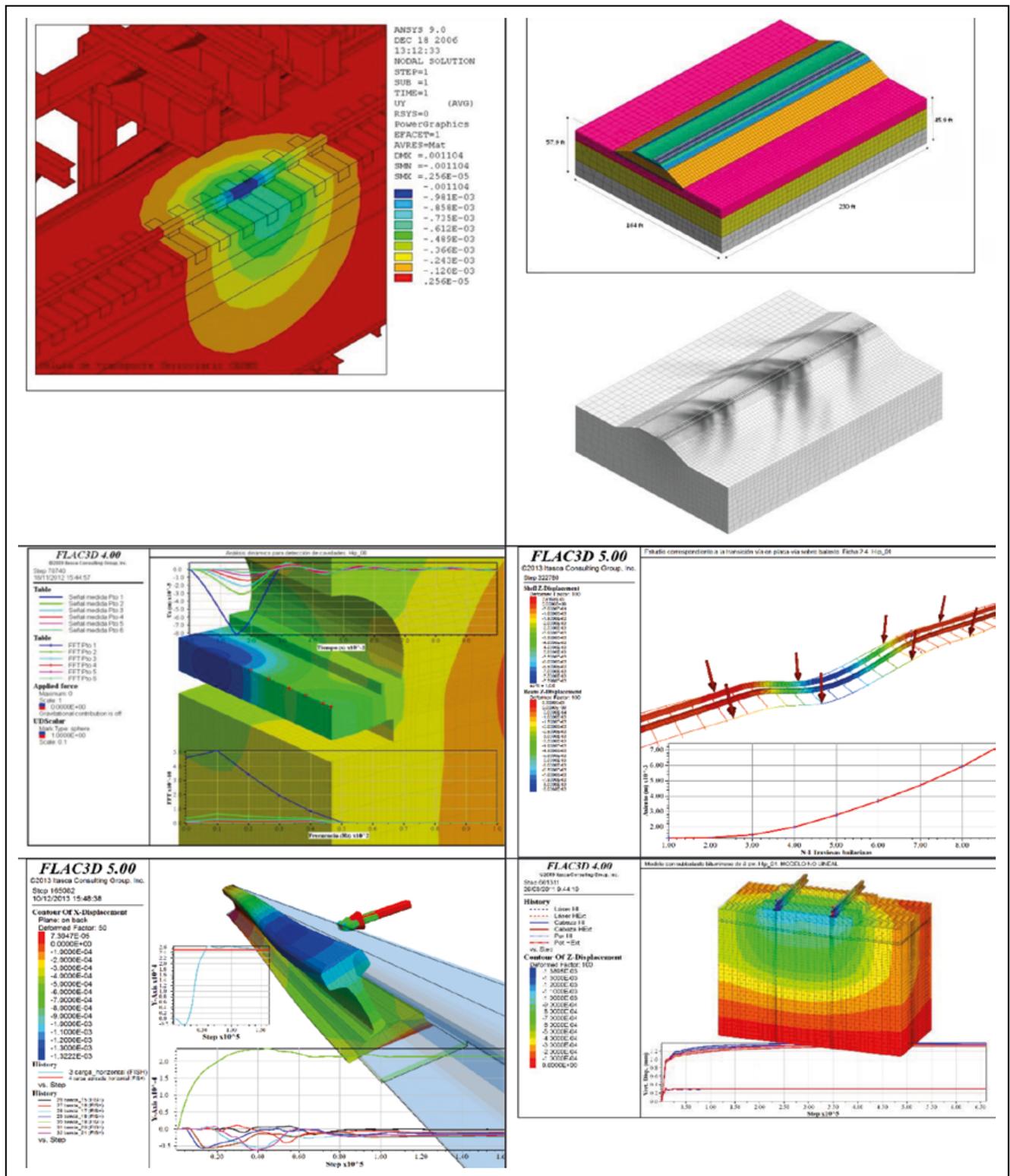


Figura 35. Modelización numérica de la infraestructura ferroviaria.

comportamiento dinámico de la vía al paso de trenes con diferentes velocidades de circulación.

A modo de ejemplo, y sin ánimo de exhaustividad, se enumeran los modelos más relevantes que se han realizado, indicando el programa utilizado en cada caso:

- Validación de las tres zonas de ensayo disponible en el CFC (realizado con ANSYS).
- Modificación de la estructura metálica del CFC para permitir simulaciones de circulaciones a velocidades superiores a 300 km/h (realizado con ANSYS).

- Estudio del efecto del espesor de sub-balasto bituminoso (8, 12 y 16 cm) en el comportamiento del resto de los elementos de la vía (asientos, tensiones y deformaciones). Modelización no lineal de los materiales (realizado con ANSYS y Flac3D).
- Validación de la medida de cargas verticales con bandas extensométricas (realizado con Flac3D).
- Validación y optimización de la medida de cargas horizontales con bandas extensométricas (realizado con Flac3D).
- Desarrollo de procedimiento para la determinación de la aparición de cavidades bajo el sostenimiento

to-revestimiento de los túneles ejecutados en macizos evaporíticos (realizado con Flac3D).

- Estudio estructural de la rotura mecánica de los elementos de fijación carril-traviesa (realizado con Flac3D).
- Análisis de la patología de las secciones de transición vía en balasto-vía en placa debido a la variación de deformabilidad de los apoyos. Estudio de diferentes soluciones estructurales para corrección de la patología (realizado con Flac3D).
- Determinación de la velocidad crítica de circulación ferroviaria para corroborar los resultados obtenidos con un modelo basado en el Análisis Espectral de Ondas Superficiales (SASW) desarrollado en el LG en colaboración con el MIT (Massachusetts Institute of Technology). A este respecto, la velocidad crítica es la velocidad de circulación del tren que produce un fenómeno de amplificación del movimiento vertical de los componentes de la vía y del terreno, que pueden comprometer la estabilidad de la vía y la seguridad de los pasajeros (realizado con MIDAS GTS NX).

Tal y como se puede colegir de la anterior enumeración de trabajos, la complejidad de los modelos es elevada ya que combinan los elementos estructurales de geometría compleja, los modelos constitutivos del terreno con formulación no lineal y los cálculos dinámicos en el dominio del tiempo.

En todos los casos se han empleado programas comerciales basados en las técnicas de los elementos finitos (MEF) o de diferencias finitas (MDF).

En la figura 35 se muestran algunos de los resultados de dicha modelización.

5. ENSAYOS DE LABORATORIO SOBRE BALASTO

5.1. Ensayos en la caja de corte de grandes dimensiones con balasto

El balasto es un material granular triturado, graduado y seleccionado, con tamaños máximos habituales entre 50 y 60 mm. Estas dimensiones dificultan la determinación de sus características resistentes con los equipos habituales que tienen los laboratorios. Para estudiar la resistencia al corte de materiales gruesos como el balasto, el LG cuenta con una caja de corte de grandes dimensiones (plano de corte de 1 x 1 m) que se construyó hace aproximadamente 30 años.

Este equipo permite ensayar muestras con un espesor de hasta 80 cm, ya que la altura de la caja es de 1,20 m.

Con esas dimensiones, el tamaño máximo de partícula que se puede utilizar en los ensayos es de 8,5 cm, por lo que el equipo es adecuado para ensayar partículas de balasto, según la norma ASTM D3080-11 (2011). Este equipo también ha sido ampliamente utilizado para estudiar el relleno de rocas en puertos y presas. La figura 36 muestra una fotografía del equipo.

Las tensiones normales utilizadas en las pruebas cubrieron el rango comprendido de 10 a 400 kPa.



Figura 36. Caja de corte de grandes dimensiones del CEDEX usada para la caracterización del balasto.

El LG ha realizado un importante estudio sobre la resistencia del balasto empleando la caja de corte de grandes dimensiones. Los detalles y resultados obtenidos en los estudios se recopilan en el trabajo publicado por Estaire y Santana (2018), incluyéndose aquí un breve resumen. Se ensayaron más de 20 muestras de balasto, en condiciones secas. Las muestras de balasto se agruparon en cuatro tipos de ensayos en función del material empleado y la preparación de muestra realizada, tal y como se muestra en la tabla 3. Antes de realizar los ensayos, se obtuvieron las propiedades geométricas y físicas de las dos clases de balasto analizadas (milonita y andesita), obteniéndose valores similares en las propiedades geométricas, físicas y resistentes, que permitían clasificar al balasto con la clase de calidad muy alta. Las tensiones normales utilizadas en las pruebas cubrieron el rango comprendido de 10 a 400 kPa.

Algunos de los resultados de los ensayos se muestran en las figuras 37 y 38. En la figura 37 se presentan las curvas de rotura obtenidas para el balasto andesítico, lo que permite comparar el efecto de la preparación de la muestra, por vertido y por compactación.

Los resultados se interpretaron según el criterio de rotura de Mohr-Coulomb y con un modelo parabólico no lineal. Además, se analizaron los ángulos de rozamiento secantes obtenidos en los ensayos. Algunas conclusiones obtenidas del estudio fueron las siguientes (Estaire y Santana, 2018):

Tabla 3. Ensayos de corte realizados sobre balasto en la caja de corte de grandes dimensiones

Ensayo	Material	Preparación muestra	Tensión normal (kPa)	Peso específico de la muestra (kN/m ³)
1	Milonita	Vertido ¹	48-98-196	13,5-14,2
2	Andesita	Vertido ¹	10-25-49-49-98-147-196-196-294-392	13,0-14,0
3	Milonita	Ligera compactación ²	30-73-147	15,7-15,9
4	Andesita	Ligera compactación ²	48-98-196	14,6-14,9

¹ Muestras preparadas por vertido del material dentro de la caja de corte sin ningún tipo de compactación.

² Muestras preparadas mediante una ligera compactación, en cinco capas, con un compactador manual dinámico.

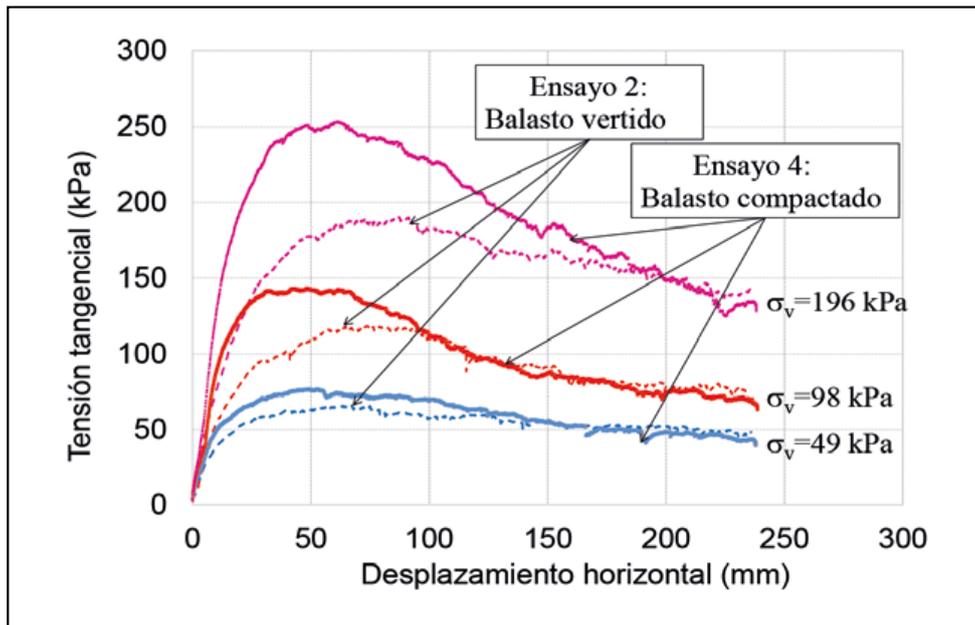


Figura 37. Curvas desplazamiento horizontal – tensión tangencial para el balasto andesítico preparado por vertido y compactado (Estaire y Santana, 2018).

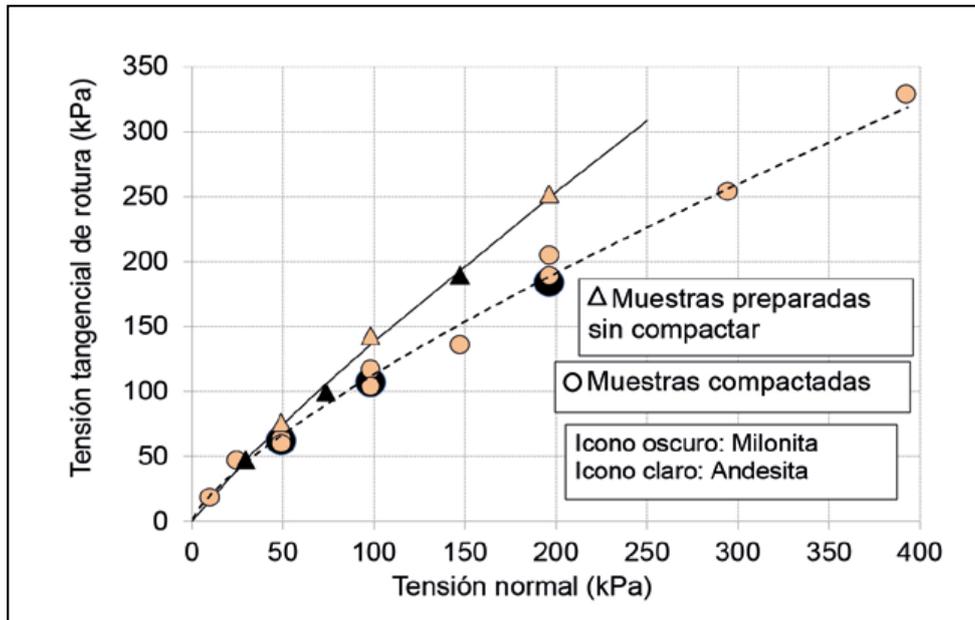


Figura 38. Envolvente de rotura obtenida en la caja de corte de grandes dimensiones para las muestras de balasto (Estaire y Santana, 2018).



Figura 39. Balasto andesítico colocado en la caja de corte de 30 x 30 cm (izda) y en la caja de corte de grandes dimensiones (dcha).

- La envolvente de rotura parabólica (cuya expresión es: $\tau = a + \sigma_v^b$) presentó el mejor ajuste para analizar los resultados de los ensayos, ya que evita considerar la cohesión aparente que se deriva de las interpretaciones lineales de Mohr-Coulomb, teniendo en cuenta la naturaleza claramente granular del balasto.
- Los valores de los parámetros del criterio de rotura de Mohr-Coulomb obtenidos de los ensayos fueron:

- a) para el balasto no compactado, un ángulo de rozamiento de 39° combinado con una cohesión aparente de 25 kPa y b) para el balasto compactado: un ángulo de rozamiento de 50° y cohesión entre 10 y 20 kPa.
- Los valores del ángulo de rozamiento disminuyen con el aumento de la tensión normal, lo que demuestra la naturaleza no lineal de la resistencia al corte del balasto. Los ángulos de rozamiento para baja tensión normal, unos 10 kPa, están entre 65° y 70° , mientras que para grandes tensiones (400 kPa) disminuye a valores en torno a los 40° .

Para analizar el efecto que tiene el tamaño del equipo en la determinación de las propiedades resistente del balasto, se realizaron ensayos de corte directo utilizando la caja convencional de 30 x 30 cm y la caja de 1 x 1 m, en condiciones similares. La figura 39 muestra las fotografías del material dentro de las cajas de corte de 30 x 30 cm y 1x1 m antes de los ensayos, que reflejan el hecho de que el ancho de la muestra solo puede contener de 6 a 7 agregados en la caja de corte de 30 x 30 cm, en comparación con los 20 agregados dentro de la caja de corte de 1 x 1 m. Estas pruebas permitieron analizar el efecto escala. Los resultados mostraron que el uso de cajas de corte directo de 30 x 30 cm produce un aumento en la fuerza de corte de entre el 40 y el 60 %, lo que debe tenerse en cuenta al revisar

muchos de los resultados de las pruebas de corte directo que se encuentran en la literatura.

5.2. Ensayos de caracterización de los materiales elastoméricos

El LG ha realizado ensayos de caracterización de los materiales elastoméricos presentes en la sección ferroviaria, concretamente, sobre la suela bajo carril y la suela bajo traviesa (USP: *Under Sleeper Pad*). Los estudios están enfocados a determinar el módulo de rigidez y el módulo estático de estos elementos, siguiendo las normativas establecidas por ADIF, en las que se calcula:

- la rigidez vertical sobre las placas estáticas de sujeción (ET 03.360.570.0 denominado “Placas elásticas de asiento para sujeción VM”); y
- el módulo estático sobre las mantas antivibratorias (apartado 2.2.1 “PPT para la contratación del suministro y transporte de manta antivibratoria de atenuación alta”).

La obtención de ambos parámetros es similar, pues se aplica una carga vertical al elemento elastomérico y se registran las deformaciones producidas. En la figura 40 se muestran varias fotografías realizadas durante los ensayos,



Figura 40. Ensayo para caracterizar los materiales elástoméricos. Detalle de los LVDTs (izda) y equipo durante el ensayo (dcha).

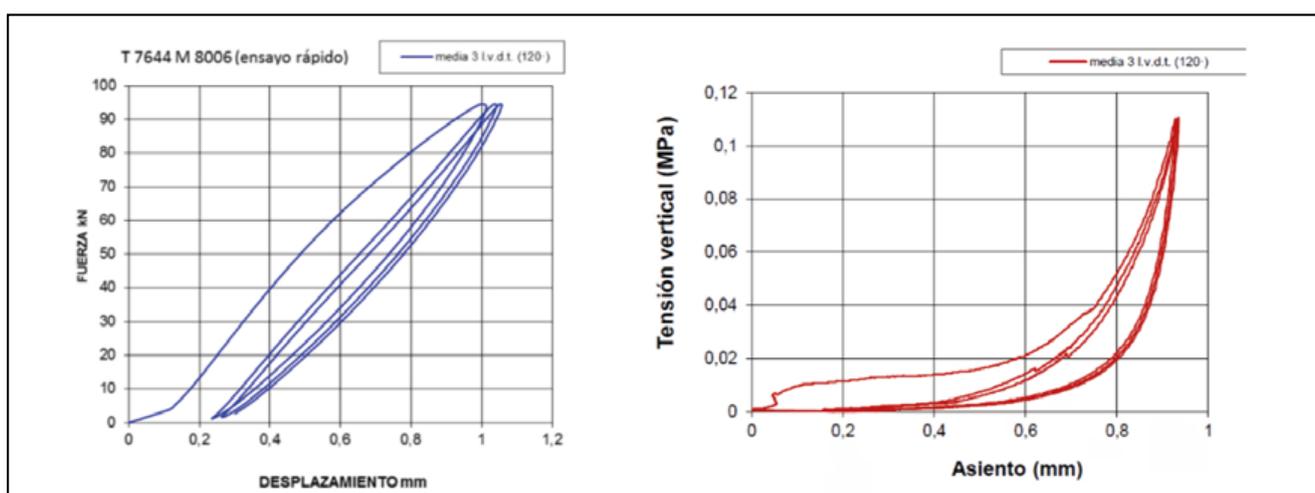


Figura 41. Resultados gráficos obtenidos para el cálculo de la rigidez vertical (izda) y el módulo estático (dcha).

con la colocación del material, detalle de los LVDTs para el registro de deformaciones, y durante la ejecución.

Por su parte, en la figura 41 se muestran ejemplos de los resultados gráficos obtenidos de la rigidez vertical (izda) y el módulo estático (dcha).

6. NORMALIZACIÓN

Dentro de los trabajos realizados por el LG en el ámbito de la Geotecnia Ferroviaria, también hay que destacar la redacción de documentos normativos. Esta labor está

enfocada, principalmente, a la actualización de normativa ferroviaria. Los ejemplos más destacados son:

Actualización del PPT tipo para los proyectos de plataforma de ADIF.

- Actualización de los folletos nº 719 y 722 de la UIC (Unión Internacional de Ferrocarriles).
- Ambos documentos determinan las condiciones de las obras de tierra y capas de forma en las secciones ferroviarias.

7. FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

Una vez descritos todos los trabajos realizados en el pasado, es conveniente lanzar una mirada hacia el futuro.

A este respecto, durante los próximos años, la intención del LG es retomar la colaboración con ADIF que tan buenos resultados dio en el pasado, a través de la firma de un nuevo encargo. Los principales trabajos en los que se pretende trabajar son los siguientes:

- Realización de campañas de medición de rigidez en vía real en secciones en recta con diferentes rigideces, en secciones en recta en zonas de transición, en secciones en curva y en secciones con traviesas de tres hilos.
- Análisis del comportamiento de la infraestructura de vía para velocidades superiores a 300 km/h, dado que se ha constatado una cierta tendencia al aumento de la velocidad comercial en las líneas de alta velocidad ferroviaria.
- Determinación de un método de cálculo para estimar la velocidad crítica de secciones ferroviarias tipo y de secciones en las que se hayan detectado mayores labores de mantenimiento, fundamentalmente en tramos sobre zonas de suelos blandos, poniendo especial atención en zonas de terraplenes de pequeña altura sobre terrenos de características geotécnicas pobres a medias.
- Determinación cuantitativa de la degradación de la infraestructura de vía al paso de trenes, con objeto de optimizar el modelo que tiene ADIF para la determinación de los costes de mantenimiento y conservación de la infraestructura ferroviaria.

Por otra parte, el LG es socio corporativo del programa europeo GEOLAB, enmarcado en la convocatoria INFRAIA del programa H2020, a través del CFC y junto a otras diez instalaciones singulares de ensayo repartidas en ocho países europeos. El objetivo básico de este proyecto es permitir que organizaciones externas al consorcio puedan realizar ensayos en las instalaciones asociadas a GEOLAB y financiadas por el propio proyecto. En este contexto, está previsto que se realicen tres ensayos en el CFC en el periodo 2022-2024.

8. AGRADECIMIENTOS

Los autores del artículo quieren hacer especial mención a Vicente Cuéllar, que fue la persona que impulsó la construcción y puesta a punto del CFC, siendo responsable de muchos de los ensayos que se describen en este trabajo, y a José Luis García de la Oliva, impulsor de todas las actividades relacionadas con la instrumentación de vías férreas.

Asimismo, se quiere agradecer su esfuerzo y dedicación a todas las personas que han trabajado y trabajan en el CFC

desde su inauguración y en la instrumentación de campo: Francisco Navarro, Miguel Ángel Andreu, Juan Luis Cámara, Sagrario Merino, Ricardo Fernández, Francisco González, Inés Crespo, Raúl Reinoso, Ángel Carballo, Pedro León, Antonio García, Felipe García, José Luis Fernández, José Manuel Cerezo, Fermín Llamas, Rubén Ruiz, Ángel Tijera, Pedro J. García, Antonio Jiménez y José Pintado.

9. REFERENCIAS

Cuéllar, V. (2016). Comportamiento dinámico de líneas férreas con balasto bajo cargas verticales. *Ingeniería Civil*, nº 183, pp. 79-108.

Estaire, J., Cuéllar, V., y Santana, M. (2017). Ensayos de resistencia lateral de vía realizados en el Cajón Ferroviario del CEDEX y su modelización. *Geotecnia*, nº 140, pp. 03-30.

Estaire, J., y Santana, M. (2018). Large direct shear tests performed with fresh ballast. *Proceedings of the ASTM Symposium on Railroad Ballast Testing and Properties, ASTM STP 1605, March 2018*. T.D. Stark, R.H. Swan, Jr., y R. Szecsy, Eds., ASTM Int. pp. 134-151.

Estaire, J., Cuéllar, V., Pardo de Santayana, F., y Santana, M. (2018). Testing railway tracks at 1:1 scale at CEDEX Track Box. *Revista de Alta Velocidad*, nº 5, pp.191-217.

Estaire, J., Crespo-Chacón, I., y Santana, M. (2018). A procedure to determine the critical speed of railway tracks based on the Winkler's hypothesis and static FEM simulations. *Minisymposium on Computational modelling of beams on foundations with application to rail tracks. 6th European Conference on Computational Mechanics (ECCM 6) Glasgow (UK), 11-15 June 2018*, pp 1045-1056.

Estaire J., Cuéllar, V., y Cámara, J.L. (2021). Settlement laws of bed layers of a ballast track as determined in 1:1 scale models performed in CEDEX Track Box. *International Conference on Transportation Geotechnics and Geoecology (to be published)*.

Fryba, L. (1999). *Vibration of Solids and Structures under Moving Loads*. London: Thomas Telford Limited.

García de la Oliva, J.L., y Moreno, J. (2019). Instrumentación de obras ferroviarias. Patologías y comportamiento de las diferentes capas de asiento. *Boletín de la Sociedad Española de Mecánica del Suelo e Ingeniería Geotécnica*, nº 198, pp. 3-23.

Kausel, E., Estaire, J., y Crespo-Chacón, I. (2020). Proof of critical speed of high-speed rail underlain by stratified media. *Proceedings of the The Royal Society A*. 476: 20200083. <https://doi.org/10.1098/rspa.2020.0083>

Kish, A. (2011). On the Fundamentals of Track Lateral Resistance. *2011AREMA/Railway Interchange Conference, September 18-21, Minneapolis, USA*.

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

Ministerio de Fomento (2015). Orden FOM/1631/2015, de 14 de julio, por la que se aprueba la Instrucción para el proyecto y construcción de obras ferroviarias IF-3. Vía sobre balasto. Cálculo de espesores de capas de la sección transversal. BOE, 4 de agosto de 2015.

Samavedam, G., Sluz, A., y Kish, A. (1999). The effect of realignment on track lateral stability. *Proceedings of the AREMA 1999 Track & Structures Annual Conference, 12-15 September 1999, Chicago, USA*.

UIC (2020). IRS 70719: Railway Application. Track & Structure. *Earthworks and track bed layers for railway lines - Design and construction principles*.