

# Instrumentación de obras ferroviarias. Patologías y comportamiento de las diferentes capas de asiento

## *Instrumentation of Railway Works. Pathologies and Behavior of the Railway Track Structure*

José Luis García de la Oliva<sup>1\*</sup>, Javier Moreno Robles<sup>2</sup>

### Resumen

El Laboratorio Geotécnico del CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas) ha desarrollado para ADIF (Administrador de Infraestructuras Ferroviarias) una serie de técnicas de instrumentación (con diferentes tipos de sensores) que se han utilizado en combinación con modelos numéricos para definir el comportamiento dinámico de la estructura de la vía en líneas ferroviarias de alta velocidad.

Este documento resume los aspectos más significativos de estas actividades en las que la instrumentación ha tenido un peso importante.

Estos trabajos han permitido mejorar el conocimiento del comportamiento de diferentes secciones ferroviarias (secciones con un espesor significativo de balasto, transiciones de vía en placa - vía con balasto, secciones con subbalasto bituminoso, etc.) y optimizar su diseño.

**Palabras clave:** Patología, Ferrocarriles de alta velocidad, Superestructura de vía, Carriles, Técnicas de monitorización, Instrumentación.

### Abstract

*The Spanish Geotechnical Laboratory of CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas) has developed for ADIF (Administrador de Infraestructuras Ferroviarias) a series of monitoring techniques (with different types of sensors) to be used in combination with numerical models in order to define the dynamic behaviour of the track structure in high-speed railways.*

*This document summarizes the most significant aspects of these activities in which the instrumentation has had an important weight.*

*These works have allowed to improve the knowledge of the behaviour of different railway sections (sections with significant thickness of ballast, transitions slab track - ballasted track, sections with bituminous sub-ballast, etc.), and optimizing their design.*

**Keywords:** Pathology, High-speed railways, Track superstructure, Rails, Monitoring techniques, Instrumentation.

## 1. INTRODUCCIÓN

El Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), es un Organismo Autónomo adscrito al Ministerio de Fomento que depende funcionalmente de éste y del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, cuyas funciones son la de asistencia técnica, asesoramiento, colaboración y difusión de todas aquellas materias tecnológicas que tienen relación con la obra pública y el medio ambiente asociado.

Históricamente el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX ha trabajado con RENFE, GIF y posteriormente con ADIF en el estudio de las líneas ferroviarias, inicialmente en aspectos relacionados con problemáticas geotécnicas “convencionales”.

En los últimos 15 años se han desarrollado una serie de trabajos muy diferentes a los anteriores, destinados al estudio de la infraestructura de las líneas de alta velocidad y al análisis

de diferentes patologías, lo que ha requerido un importante esfuerzo profesional por el carácter singular de cada una de las actuaciones y la puesta a punto de técnicas de instrumentación adaptadas a los objetivos buscados en estos trabajos.

Pueden destacarse los trabajos realizados en el marco de las Encomiendas de Gestión con ADIF (Administrador de Infraestructuras Ferroviarias) y la participación en los siguientes programas i+d+i:

- SUPERTRACK (2002 – 2005)
- INNOTRACK (2006 - 2009)
- RIVAS (2010 – 2013)
- CAPACITY4RAIL (2013-2017)

En los puntos siguientes se resumen los aspectos más significativos de estas actividades en las que la instrumentación ha tenido un peso importante.

## 2. OBJETIVOS DE LA APLICACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE AUSCULTACIÓN, INSTRUMENTACIÓN Y MODELIZACIÓN NUMÉRICA PARA EL ESTUDIO DE LA INFRAESTRUCTURA FERROVIARIA

La actividad llevada a cabo en el ámbito de la infraestructura ferroviaria ha dado lugar a la puesta a punto de

\* Autor de contacto: jose.g.oliva@cedex.es

<sup>1</sup> Ingeniero de Caminos Canales y Puertos UPM. Laboratorio de Geotecnia del CEDEX.

<sup>2</sup> Dr. Ingeniero de Caminos Canales y Puertos UPM. Laboratorio de Geotecnia del CEDEX.

una serie de equipos y técnicas de instrumentación y modelización numérica muy diferentes a los utilizados por el CEDEX 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 la instalación a escala 1:1 disponible en el CEDEX.
- Calibración de modelos numéricos.
- Evaluación de la colaboración en la rigidez de la vía de las distintas capas.
- Análisis de patologías y comportamiento de transiciones y secciones singulares.

Las líneas de actividad principales han sido las siguientes:

- Patología geotécnica clásica.
- Instrumentación general. Datos para calibrado de la Instalación para Ensayos de Infraestructura Ferroviaria del CEDEX 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 subbalasto granular y con subbalasto 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 subbalasto granular.

En los puntos siguientes se describen los aspectos más reseñables de estos trabajos. Inicialmente, como introducción a las técnicas empleadas, se describen los trabajos realizados en el tramo Fuencarral-Canto Blanco de la línea de alta velocidad Madrid-Segovia-Valladolid, y posteriormente se describen otros trabajos relacionados con el comportamiento y el estudio de patologías de la infraestructura ferroviaria.

### 3. INSTRUMENTACIÓN DE UNA SECCIÓN FERROVIARIA DESDE LA FASE DE CONSTRUCCIÓN

En el marco de los trabajos realizados con ADIF, el Laboratorio de Geotecnia instrumentó un terraplén de unos 10 m de altura y su plataforma ferroviaria, en el tramo Fuencarral - Cantoblanco de la Línea de Alta Velocidad Madrid - Segovia - Valladolid.

Este trabajo tuvo especial interés por permitir caracterizar la evolución del comportamiento de una plataforma ferroviaria joven durante sus primeros años de vida. Supuso la primera oportunidad de instrumentar una sección ferroviaria de alta velocidad en España durante su construcción.

Asimismo sirvió para poner a punto técnicas de auscultación que se han utilizado posteriormente en otras secciones para el estudio de diferentes patologías.

Simultáneamente a la ejecución de la sección se fueron instrumentando las diversas capas de terraplén y plataforma ferroviaria con el fin de que la instalación de los sensores no interfiriese, como en otros trabajos previos, en los resultados de las medidas.

Con estos trabajos se pretendía caracterizar el comportamiento de una sección ferroviaria de alta velocidad situada en terraplén, desde su puesta en servicio, permitiendo también conseguir información de contraste con la procedente de la Instalación para Ensayos de Infraestructura Ferroviaria del CEDEX.

El emplazamiento corresponde a una alineación recta en terraplén, de unos 10 m de altura y con taludes 2H:1V. En esta zona el terreno natural adoptaba un relieve alomado suave y con un sustrato moderadamente homogéneo y rígido.

La instrumentación interna incluye los sensores colocados en núcleo y cimiento de terraplén, capa de forma, subbalasto y balasto. Se han instalado los siguientes equipos (Figura 1, Figura 2 y Figura 3):

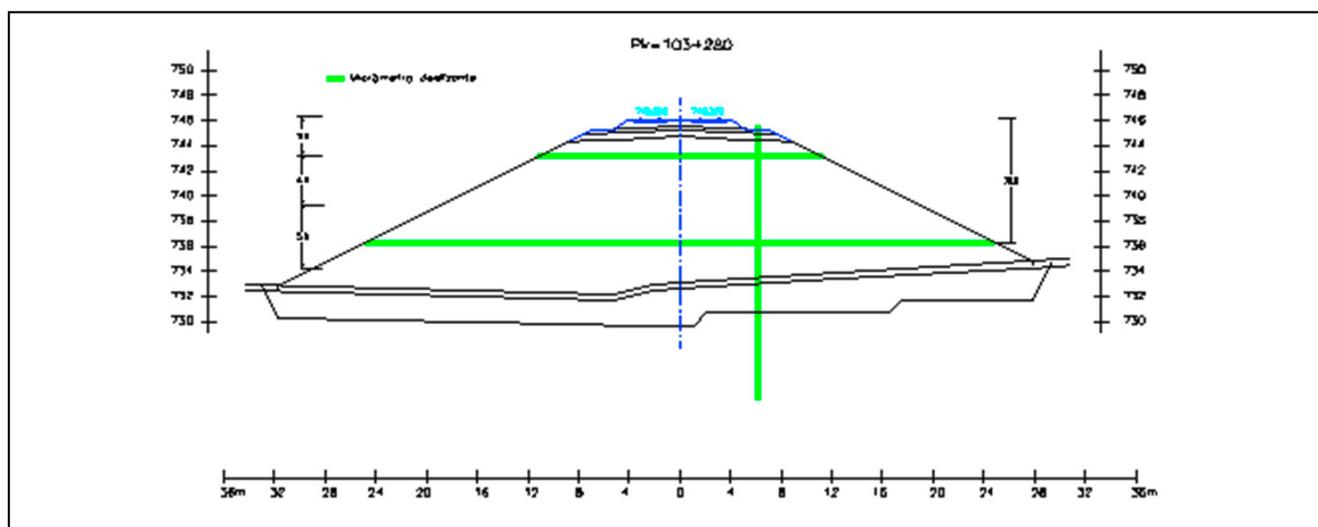


Figura 1. Auscultación mediante micrómetro deslizante.

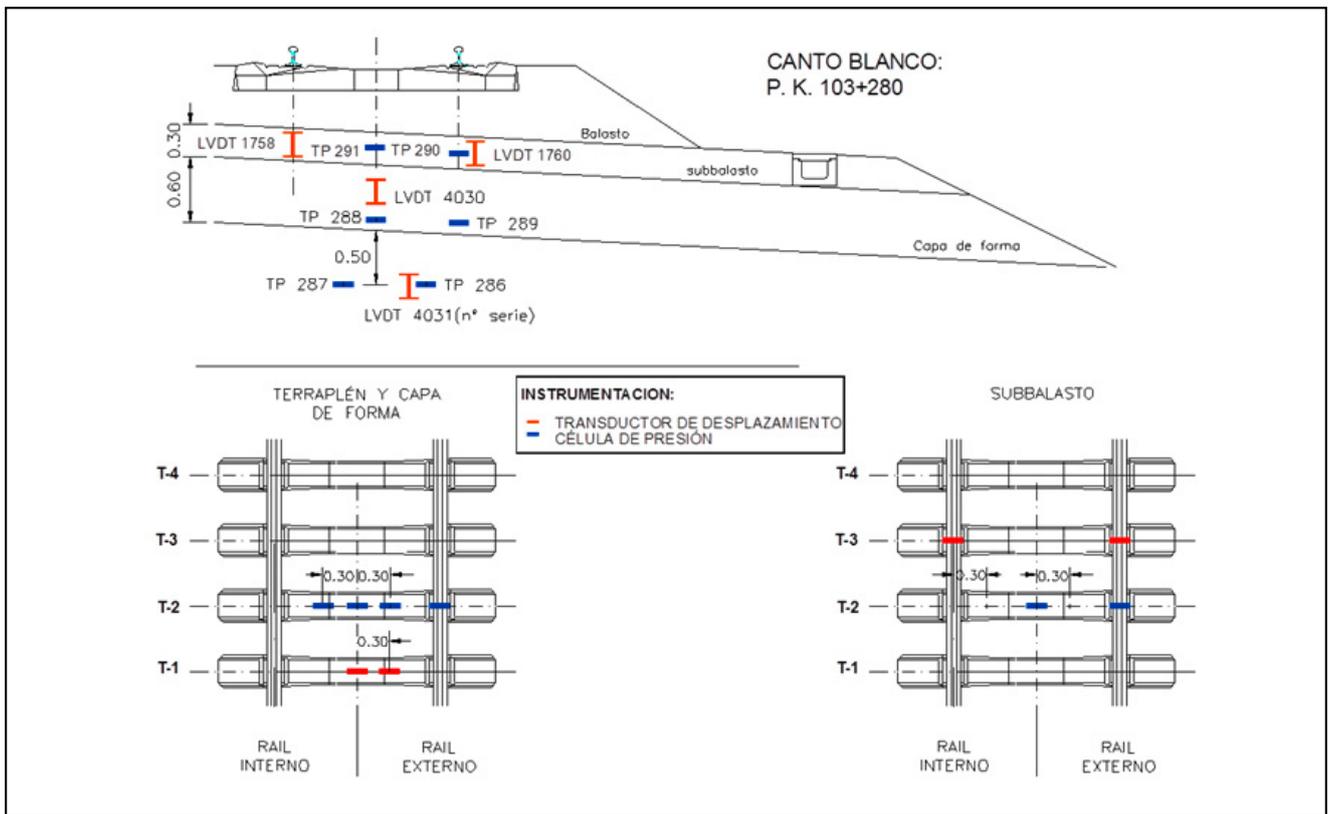


Figura 2. Instrumentación dispuesta en coronación de terraplén y subestructura.

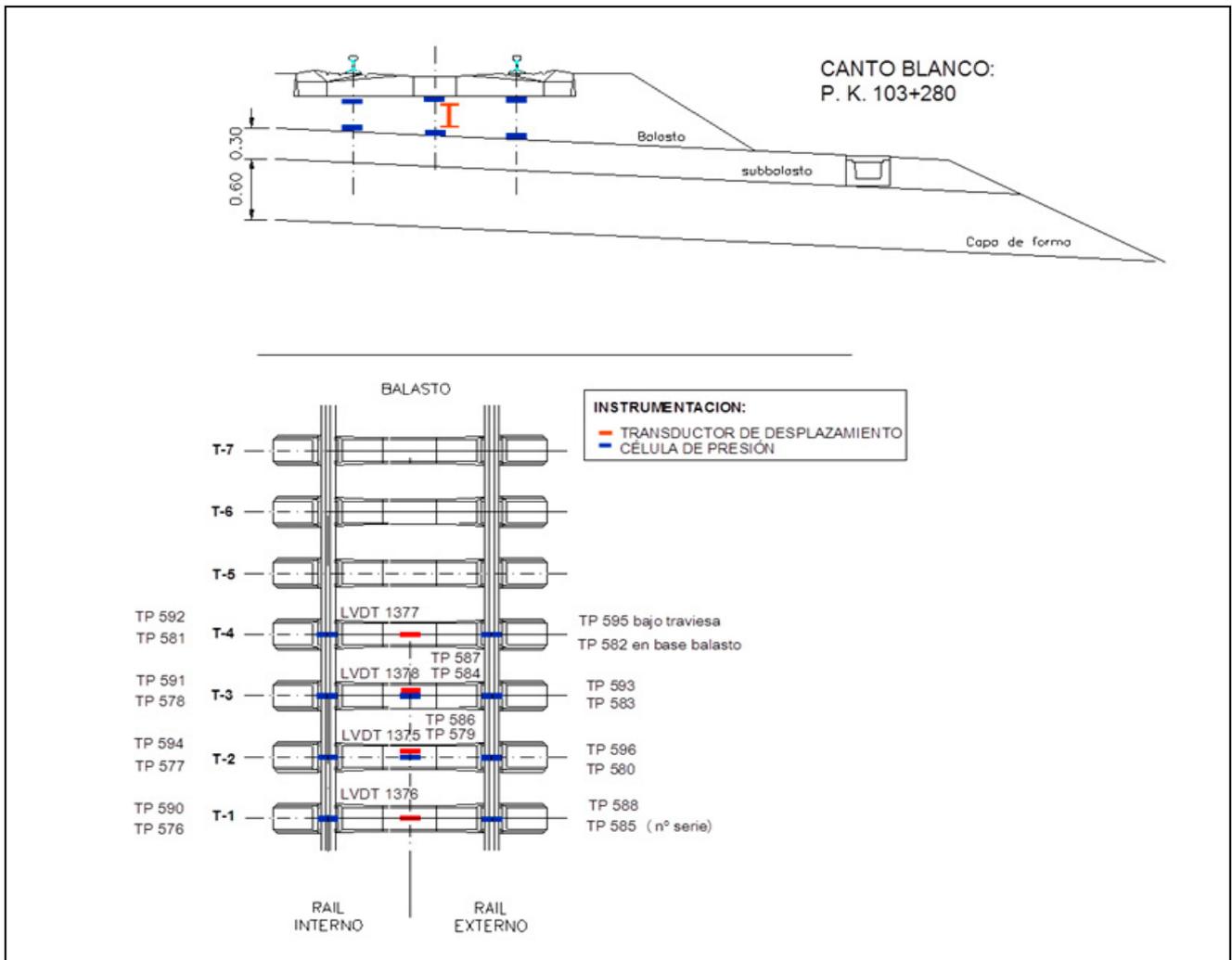


Figura 3. Instrumentación interna de la superestructura.

- 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:

- 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.

En los puntos siguientes se describen estas medidas.

### 3.1. Medidas estáticas

El micrómetro deslizante vertical se instaló una vez que el terraplén alcanzó la cota de capa de forma, a finales del

mes de enero de 2005. Ha permitido cuantificar los asientos postconstructivos de la plataforma.

Desde la entrada en servicio de la línea en diciembre de 2007 hasta mayo de 2012, el asiento sufrido por la plataforma ha sido de 9,5mm y según se aprecia en la Figura 1, la mayor parte del asiento se ha desarrollado por deformaciones del material entre 5 y 14m bajo la cota del subbalasto (la mitad inferior del terraplén y la zona más superficial del cimientto).

El asiento citado (9,5mm) representa un 0,8‰ de la altura del terraplén en un periodo de 4,5 años. Es un asiento diferido bajo que se corresponde con un relleno de buena calidad.

El asiento debido a las deformaciones de los 4m superiores es prácticamente nulo. Al interpretar estos resultados hay que tener en cuenta que la cabeza del micrómetro deslizante está situada en el subbalasto, exteriormente a la banqueta de balasto, con lo que, al menos en los 1 a 2m superiores no se vería afectado por las sollicitaciones debidas al tráfico ferroviario.

### 3.2. Medidas dinámicas

#### 3.2.1. Obtención de cargas, reacciones y velocidades de paso de tren mediante bandas extensométricas en puente completo

Estas bandas son utilizadas para la medida del esfuerzo cortante en carril.

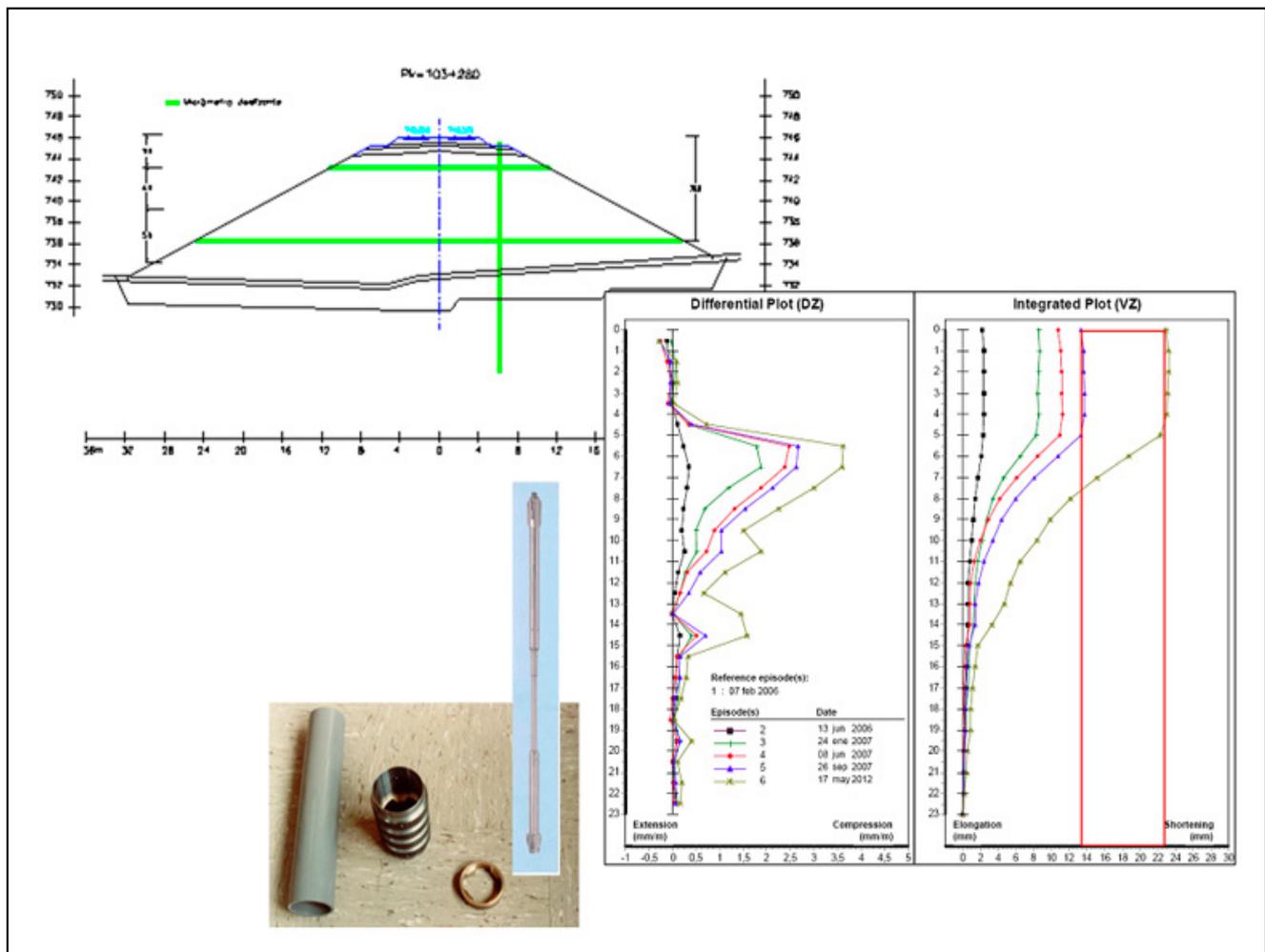


Figura 4. Micrómetro deslizante.



Foto 1. Colocación de bandas extensométricas en Cantoblanco.

En la Figura 5 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  $Q_1$ , determinadas en 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 6 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 5. 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. Dicha historia se ha obtenido restando de la historia  $Q_2$  la  $Q_1$ .

De manera análoga pero disponiendo sendas 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 5) 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

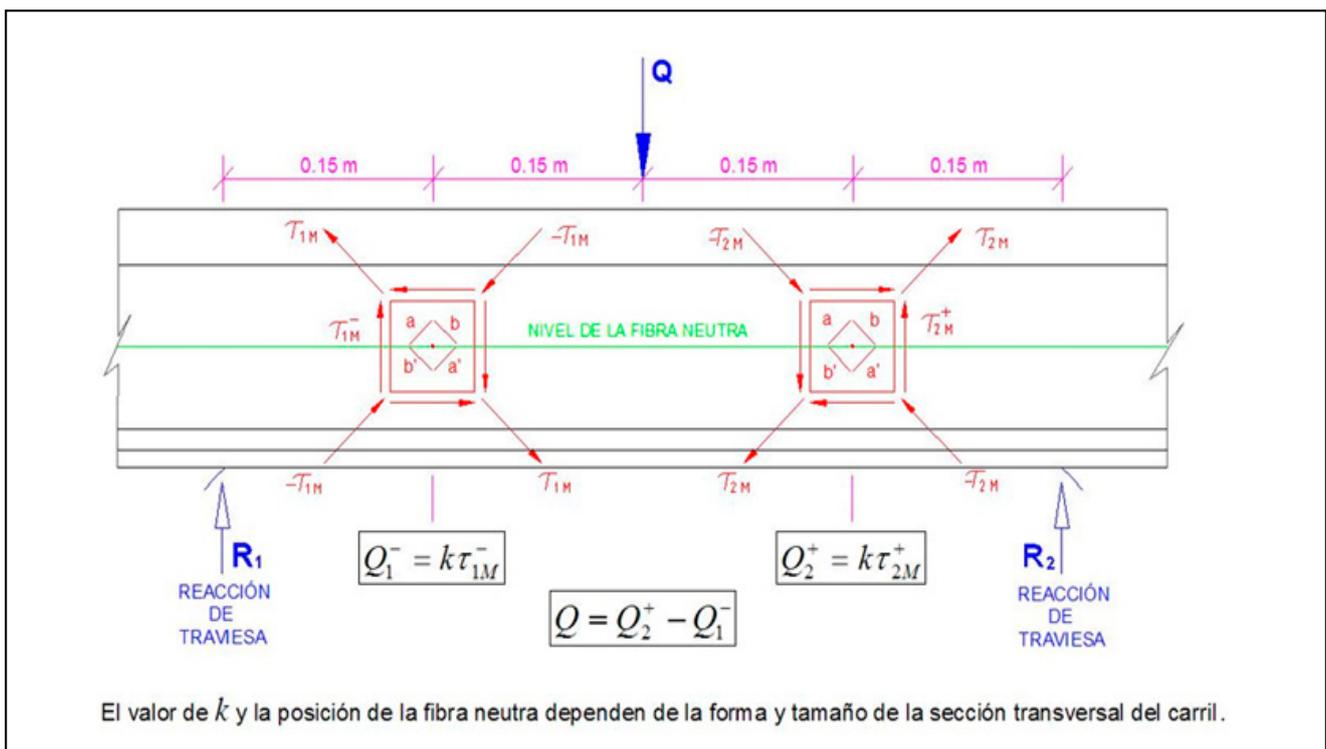
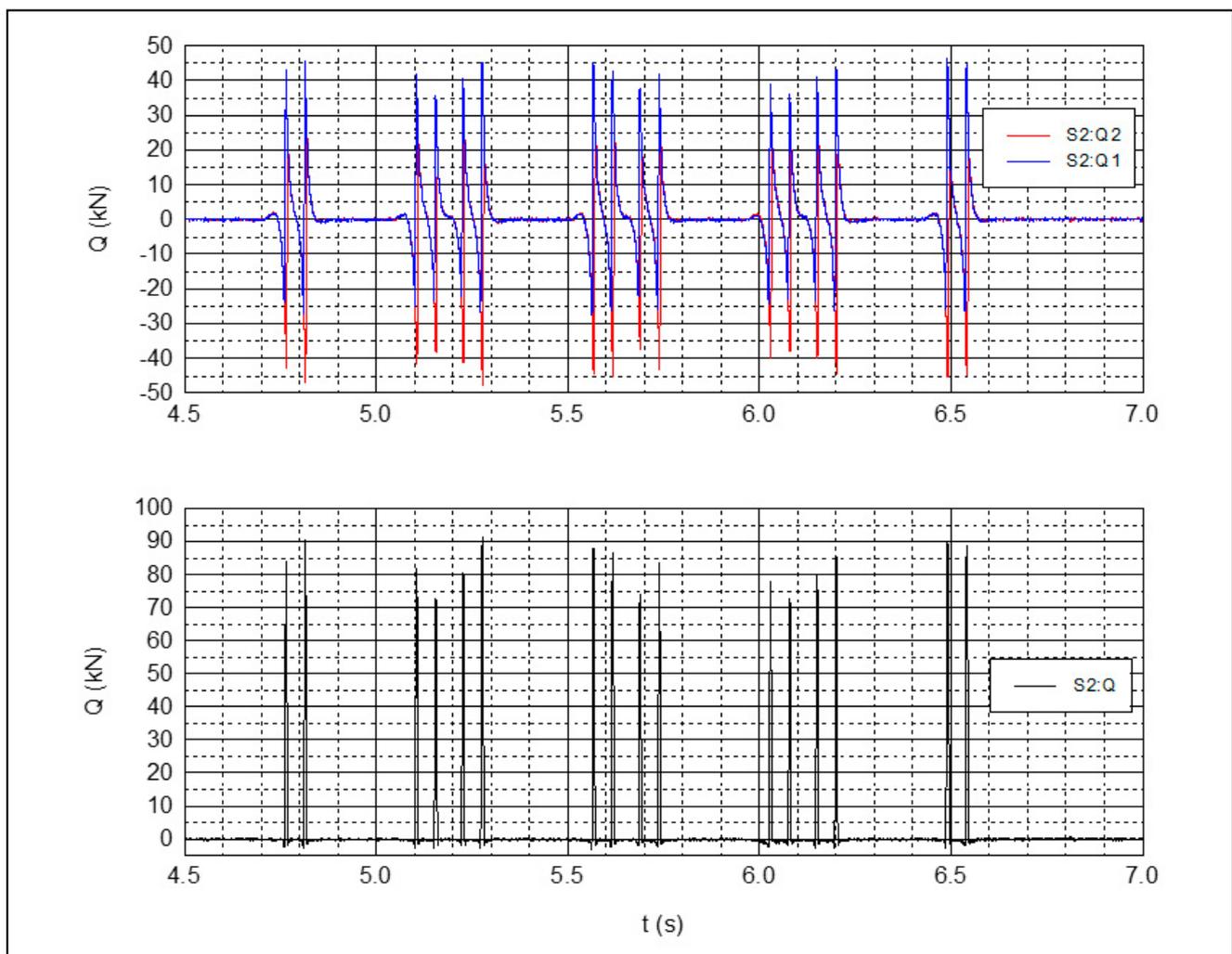


Figura 5. Esquema seguido para el pegado de bandas extensométricas en un vano de vía entre traviesas.



**Figura 6.** 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.

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.

En la Figura 7 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. A 5 cm del punto de aplicación el error es del 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 la Instalación para Ensayos de Infraestructura Ferroviaria del CEDEX 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.

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.

Para un mismo tipo de tren, se obtienen cargas prácticamente idénticas 2 y 4 años después de la puesta en servicio de la línea. La carga por rueda de los trenes tipo S-102 y S-130 es de unos 70 kN. El tren tipo S-121, formado por bogies, es algo más ligero presentando una carga por rueda de 65 kN.

Mediante las bandas extensométricas se ha evaluado la reacción sobre 2 de 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 y 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).

El cociente reacción en traviesa/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 52,2% a los

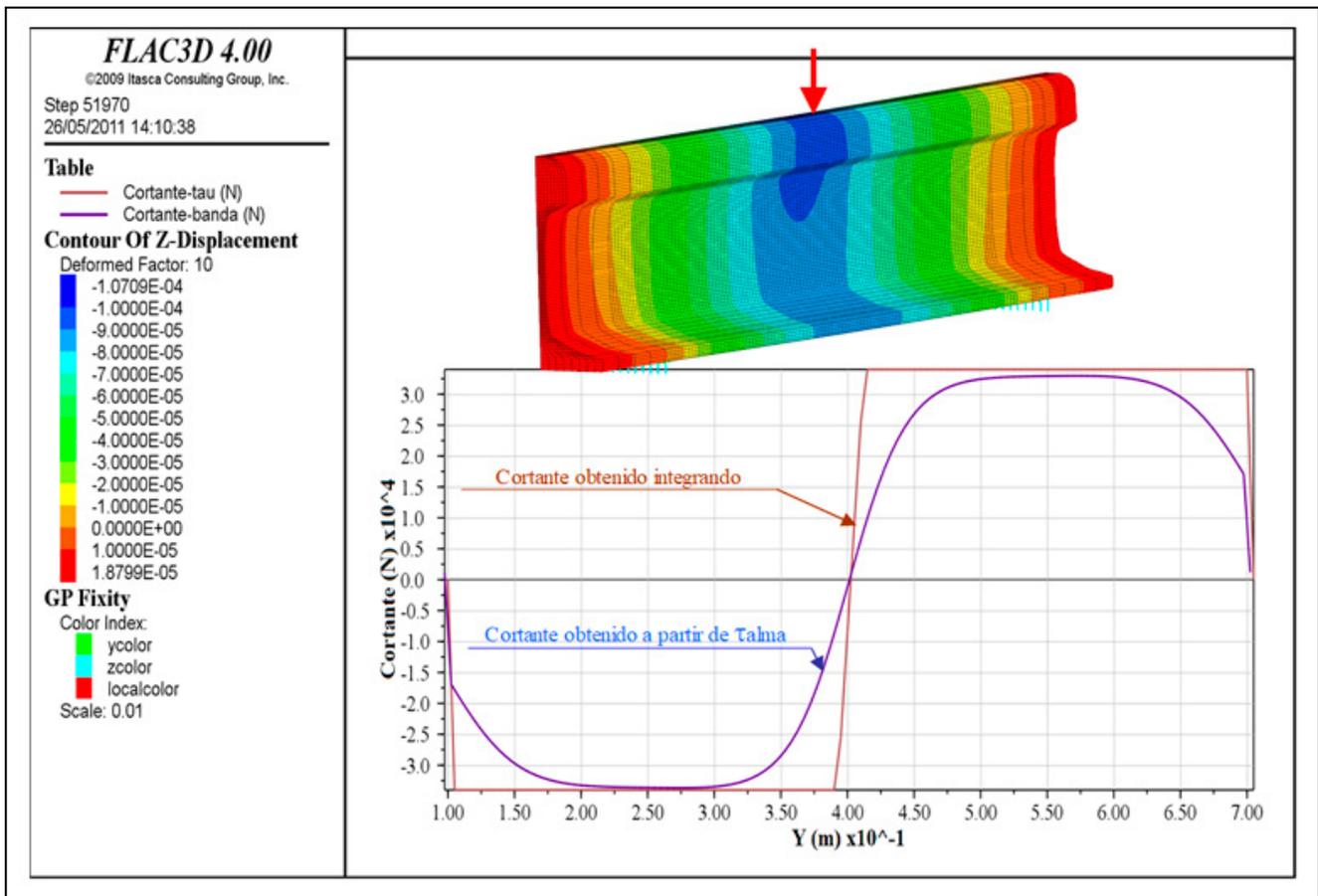


Figura 7. Modelo numérico para estudiar la validez del procedimiento de cálculo del esfuerzo cortante.

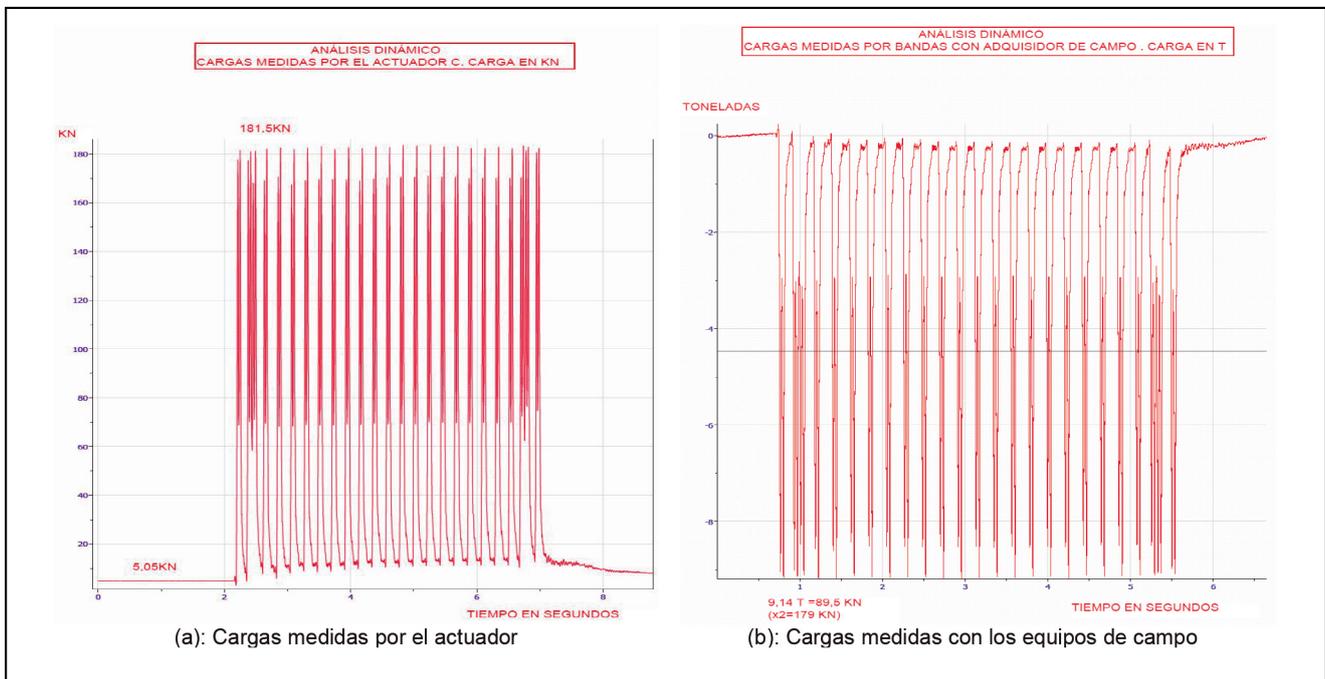
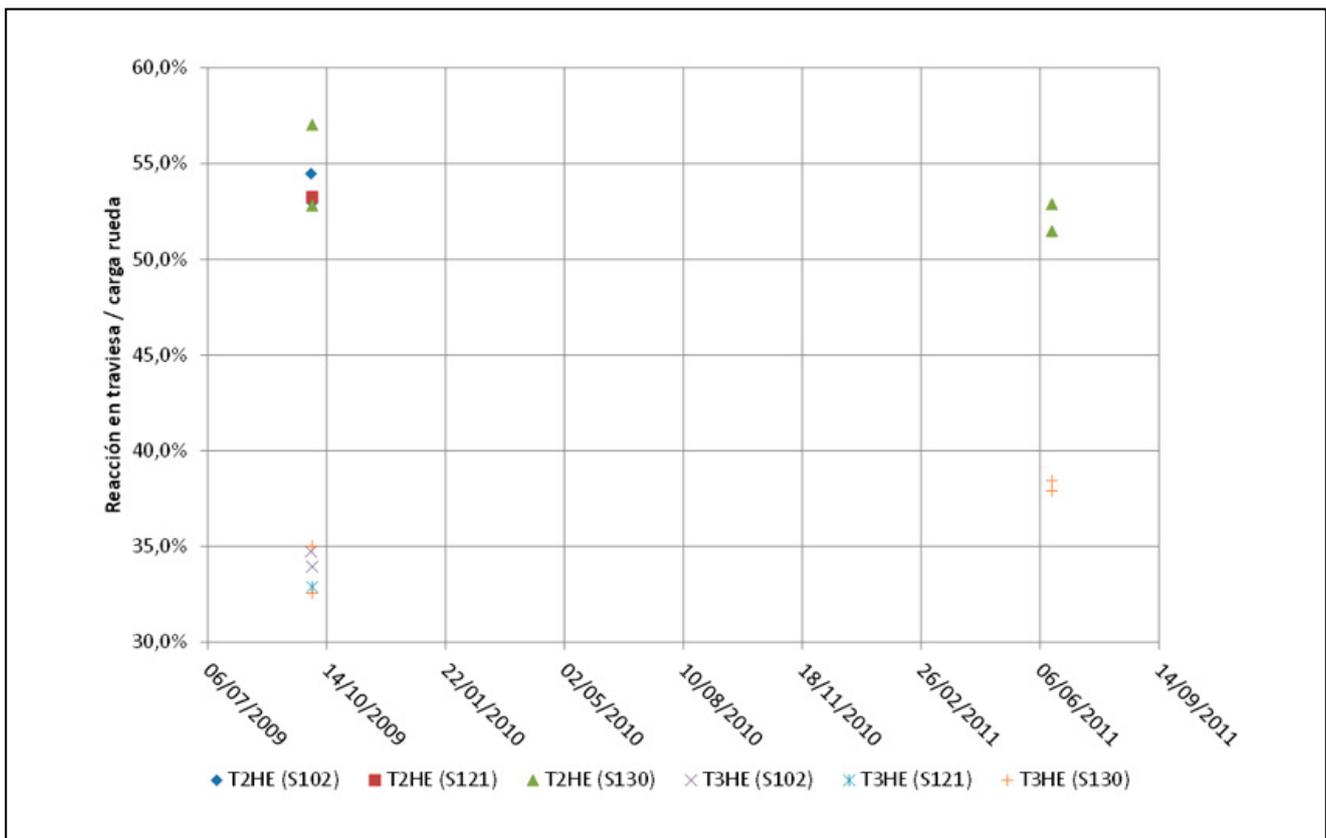


Figura 8. Contraste del procedimiento de medidas de cargas en la Instalación para Ensayos de Infraestructura Ferroviaria del CEDEX.



**Figura 9.** Reacciones medias en traviesa / carga por rueda.

4 años mientras que bajo el hilo exterior de la traviesa T3 sube del 33,8% al 38,2%. Esto puede deberse a la evolución del comportamiento del apoyo de las traviesas o bien a la ejecución de un bateo intermedio (los técnicos de mantenimiento informaron verbalmente de que se habían realizado operaciones de bateo).

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

Los trenes circularon por esta sección con una velocidad en torno a 105 a 110 km/h.

### 3.2.2. Obtención de movimientos del carril y rigidez de vía mediante medidas con láser y geófonos.

Para la medida de los desplazamientos absolutos de carril bajo las cargas estáticas o dinámicas se han utilizado 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 (Foto 2).

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



**Foto 2.** Sensor láser y geófono.

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 10). 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 subbalasto junto a la canaleta de vía. Por otro lado

el propio efecto aerodinámico provocado por el paso del tren puede influir en la estabilidad del emisor. Este movimiento puede explicar la dispersión de las medidas tomadas con el láser en los registros de campo frente a la gran calidad obtenida con el mismo equipo en las medidas efectuadas en el Cajón de Infraestructuras Ferroviarias del CEDEX. 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

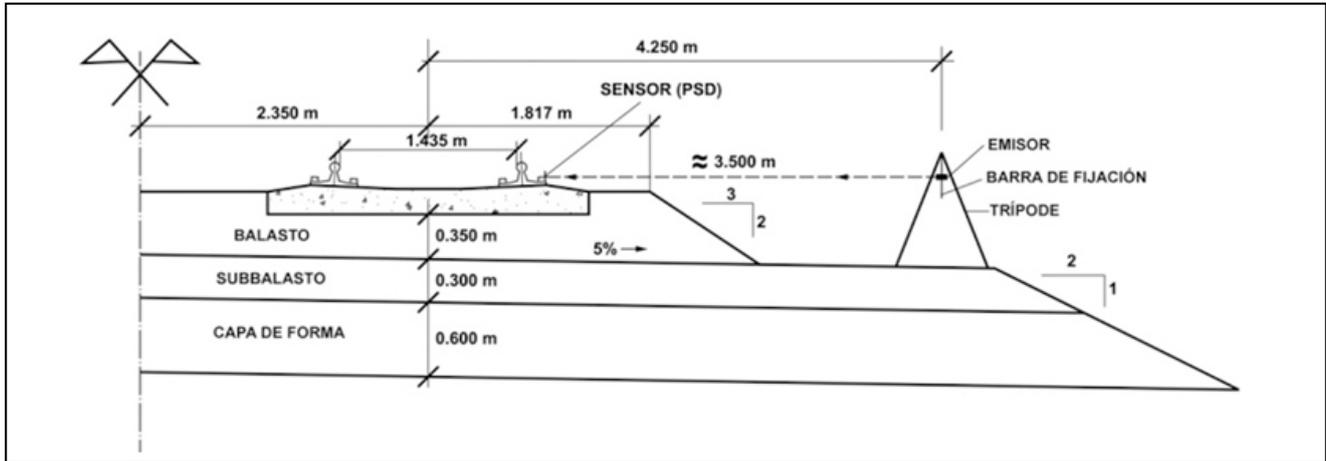


Figura 10. Esquema de medida con sensor láser.

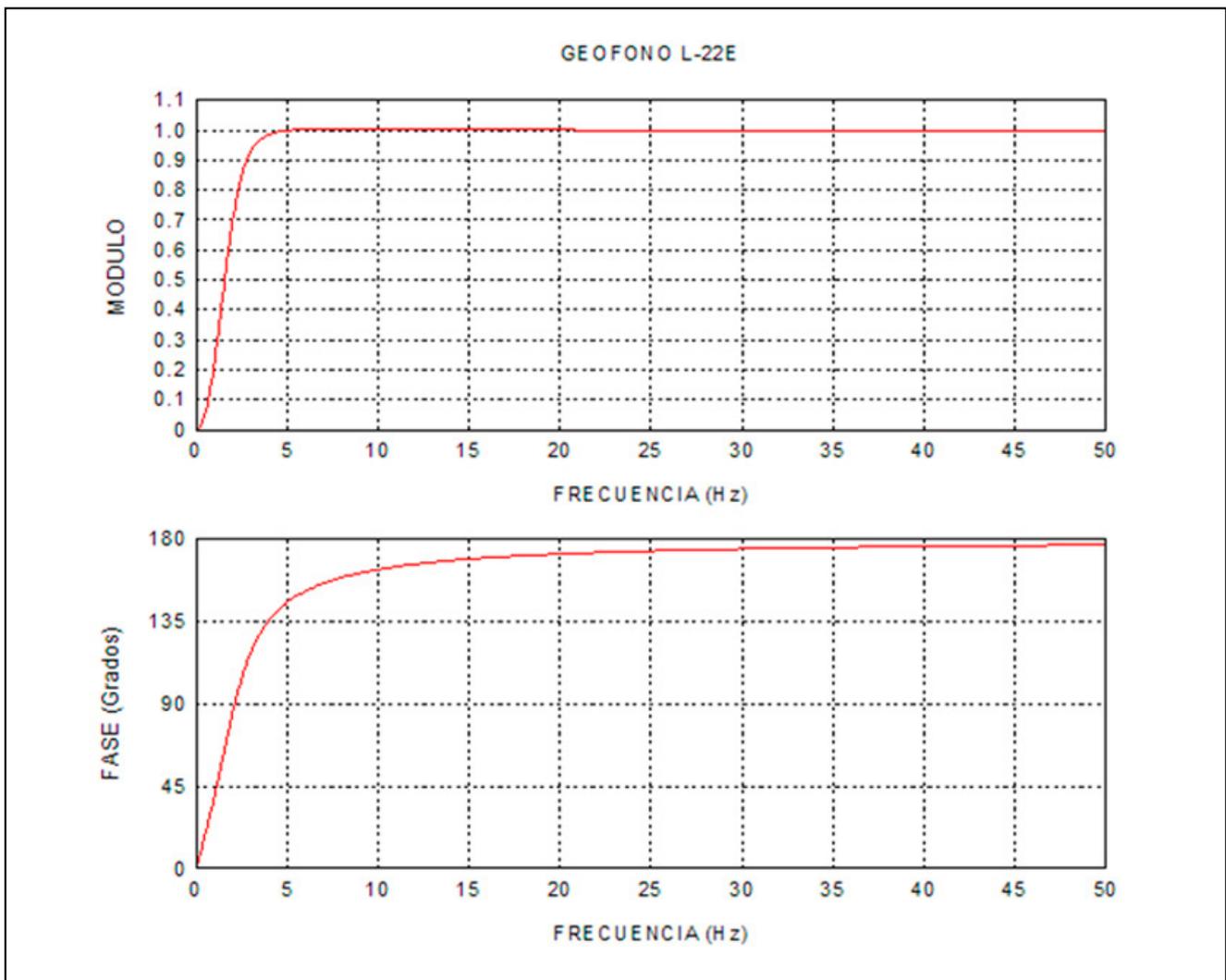


Figura 11. Curvas de respuesta del geófono de 2 Hz elegido.

solventar este problema, se ha dispuesto el emisor láser en las torres de soporte de la catenaria. Los resultados así obtenidos han sido más desfavorables.

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 (velocidad) debe integrarse para obtener las deflexiones del carril.

Se han utilizado geófonos de 2 Hz solidarios al carril (Foto 2). La situación de los sensores, con un gálibo reducido, ha impedido utilizar geófonos con menor frecuencia de resonancia para la medida de los movimientos del carril.

Antes de integrar las señales captadas por el geófono para obtener las deflexiones del carril, ha sido necesario modificar las fases de los armónicos que constituyen dichas señales. Con ello se ha conseguido registros de la deflexión de gran calidad para velocidades superiores a 100km/h (Figura 12).

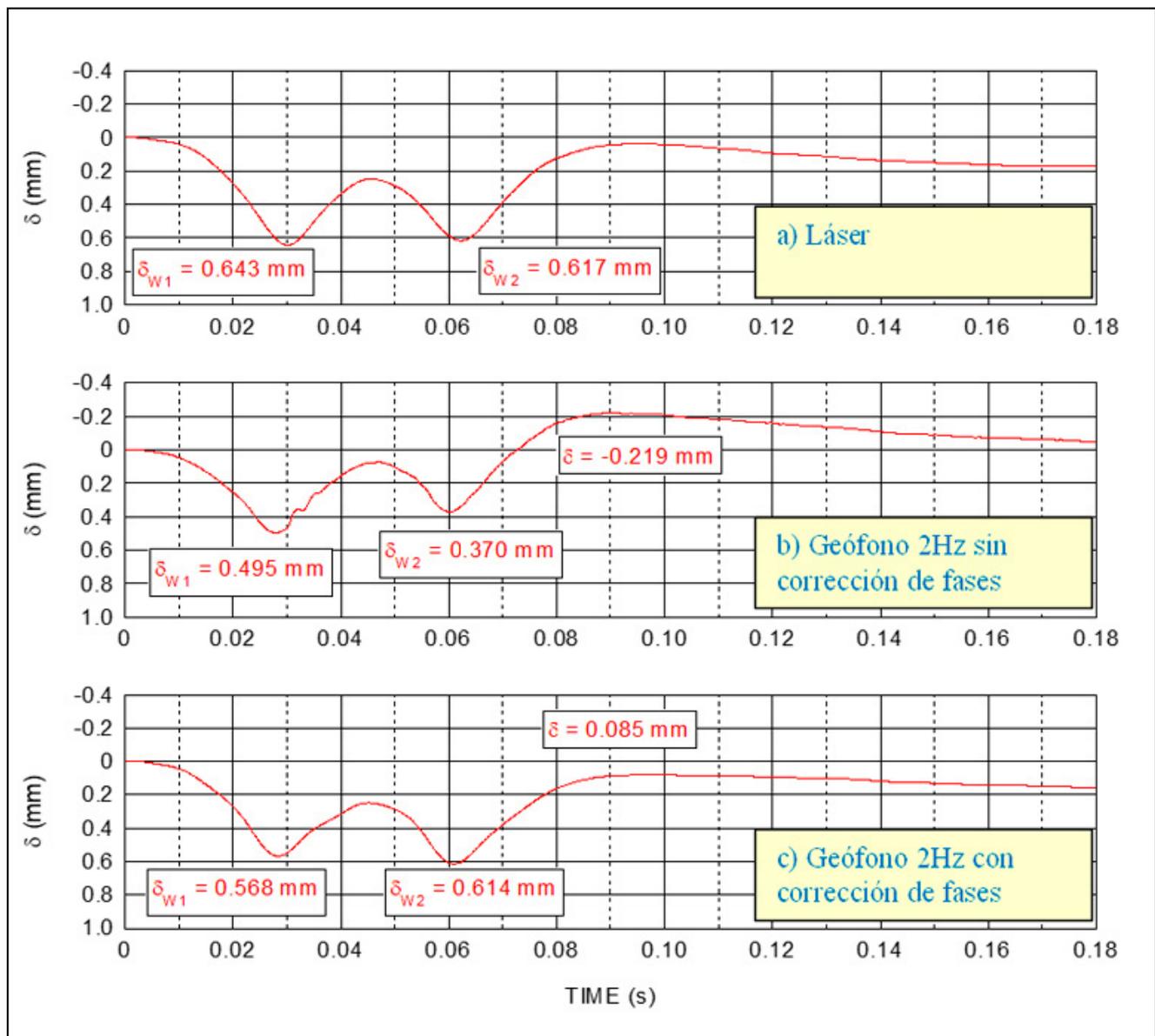
Frente a otros tipos de sensores de similares dimensiones, como pueden ser los acelerómetros, los geófonos ofrecen la ventaja de no necesitar alimentación eléctrica

externa y de permitir corregir la línea base de las señales integradas de una manera relativamente sencilla.

Según la experiencia del Laboratorio de Geotecnia, 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 han sido las utilizadas en el 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.



**Figura 12.** 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.

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.

### 3.2.3. Obtención de la rigidez de vía

La rigidez media obtenida (cociente entre la carga por rueda y la deflexión del carril) 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.

### 3.2.4. Obtención de movimientos de pad y traviesa mediante medidas con potenciómetros y geófonos

Los potenciómetros miden el desplazamiento relativo entre la traviesa y el patín del carril, por tanto son una medida del acortamiento del PAD al paso de los ejes del tren (Foto 3).



Foto 3. Potenciómetro y geófonos.

El cociente entre la reacción sobre una traviesa y la deformación del pad es de unos 180kN/mm.

Del valor de descenso de las traviesas instrumentadas con geófonos de 1 Hz se deduce que, dentro de una misma campaña de medidas, el descenso medio de una traviesa ha sido de 0,40 a 0,50 mm en el año 2009 y se incrementó aproximadamente en 0,1 mm en el año 2011.

### 3.2.5. Representación comparada de los movimientos de carril, PAD y traviesa

En la Figura 13 se comparan, para cada uno de los ejes de uno de los trenes analizados, los valores relativos a desplazamiento de traviesa, acortamiento de su PAD correspondiente y movimiento de carril en el vano

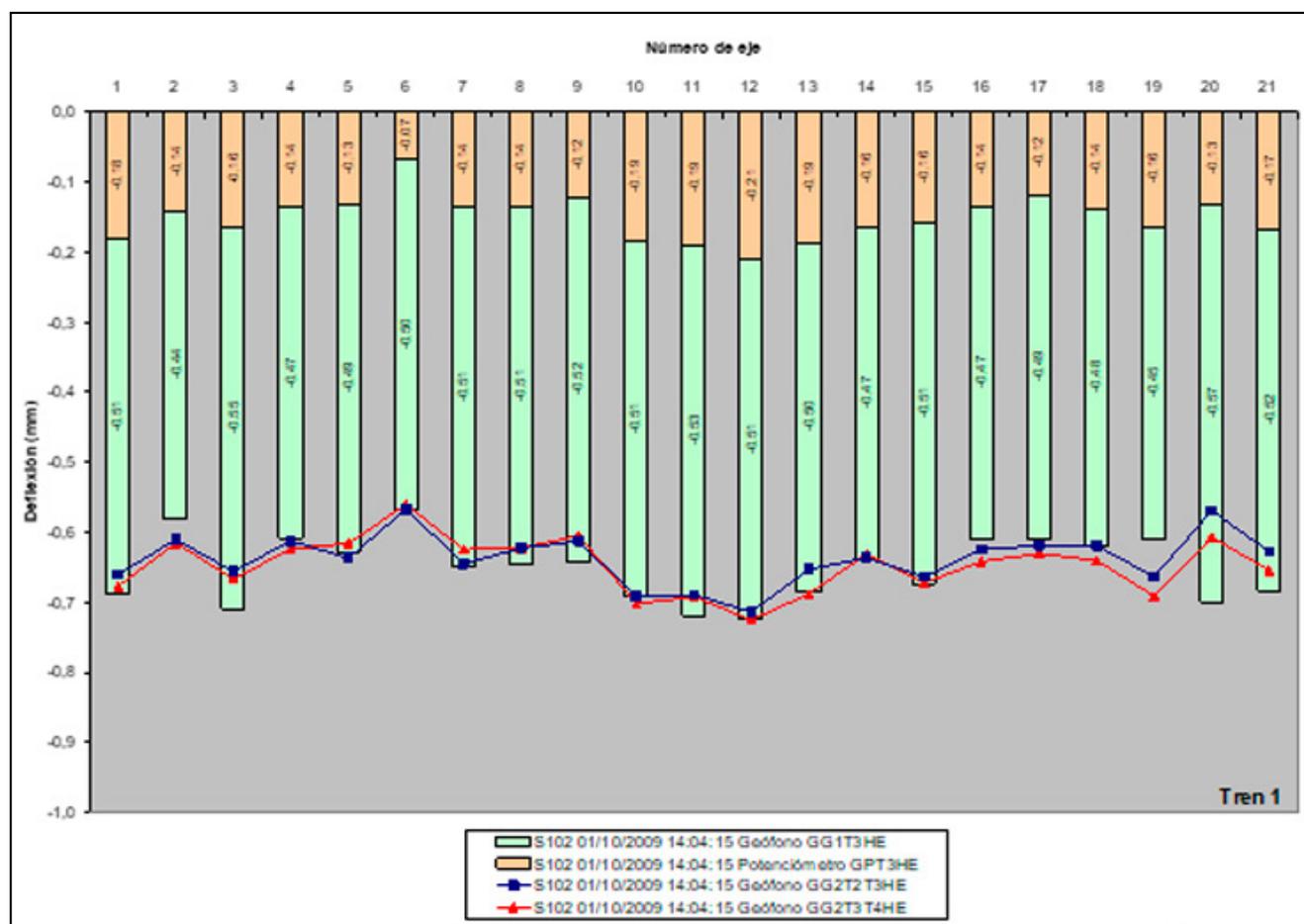


Figura 13. Comparación entre las deflexiones del carril (geófono de 2 Hz) para cada uno de los ejes de un tren frente a la suma de los asientos de la traviesa (geófono de 1 Hz) y el acortamiento del pad (potenciómetro).

inmediatamente anterior y/o posterior a dicha traviesa. Hay que tener presente que el movimiento del carril en el vano puede ser algo diferente al movimiento del carril sobre la traviesa.

La medida conjunta, o suma, del descenso de traviesa (medido con los geófonos de 1 Hz) y acortamiento del PAD (medido con los potenciómetros) permite realizar una comprobación de la medida de deflexión del carril que se registró con los geófonos de 2 Hz. De esta manera la deflexión del carril que se mide entre dos traviesas debería ser similar a la suma del descenso de cada una de estas traviesas y el acortamiento (o movimiento relativo traviesa - carril) de su correspondiente PAD. Junto a la medida conjunta de descenso de traviesa y acortamiento de su PAD correspondiente, en la Figura 13 se han representado los desplazamientos de carril tanto en el vano inmediatamente anterior a dicha traviesa como en el inmediatamente posterior.

### 3.2.6. Obtención de presiones y movimientos en las capas de balasto e infraestructura mediante células de presión y LVDT

En la Figura 2 y la Figura 3 incluidas en páginas anteriores, se presenta la situación de la instrumentación empleada en estos trabajos.

Las células de presión se colocaron bajo los carriles justo debajo de las 4 traviesas. Además se colocaron dos células en la parte central de 2 de ellas.

En la Foto 4 se recoge un momento de la instalación de las células de presión bajo una traviesa y en la Figura 14 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. Del análisis espectral de la señal registrada por las células de presión se concluyó aplicar un filtro tipo pasa baja (low pass) 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 1,1 a 1,2 kp/cm<sup>2</sup>.

Las medidas bajo traviesa tomadas en el punto medio de las mismas son obviamente menores que las obtenidas bajo los carriles, presentando valores de 0,38 y 0,10 kp/cm<sup>2</sup>.

Los valores de presión obtenidos en la región de contacto balasto-subbalasto 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 subbalasto son de 0,55 a 0,70 Kp/cm<sup>2</sup>. Según estos datos la transmisión de la carga dinámica a lo largo de la capa de balasto es bastante



Foto 4. Instalación de células de presión bajo las traviesas.

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-subbalasto se obtienen valores medios de 0,22 kp/cm<sup>2</sup>.

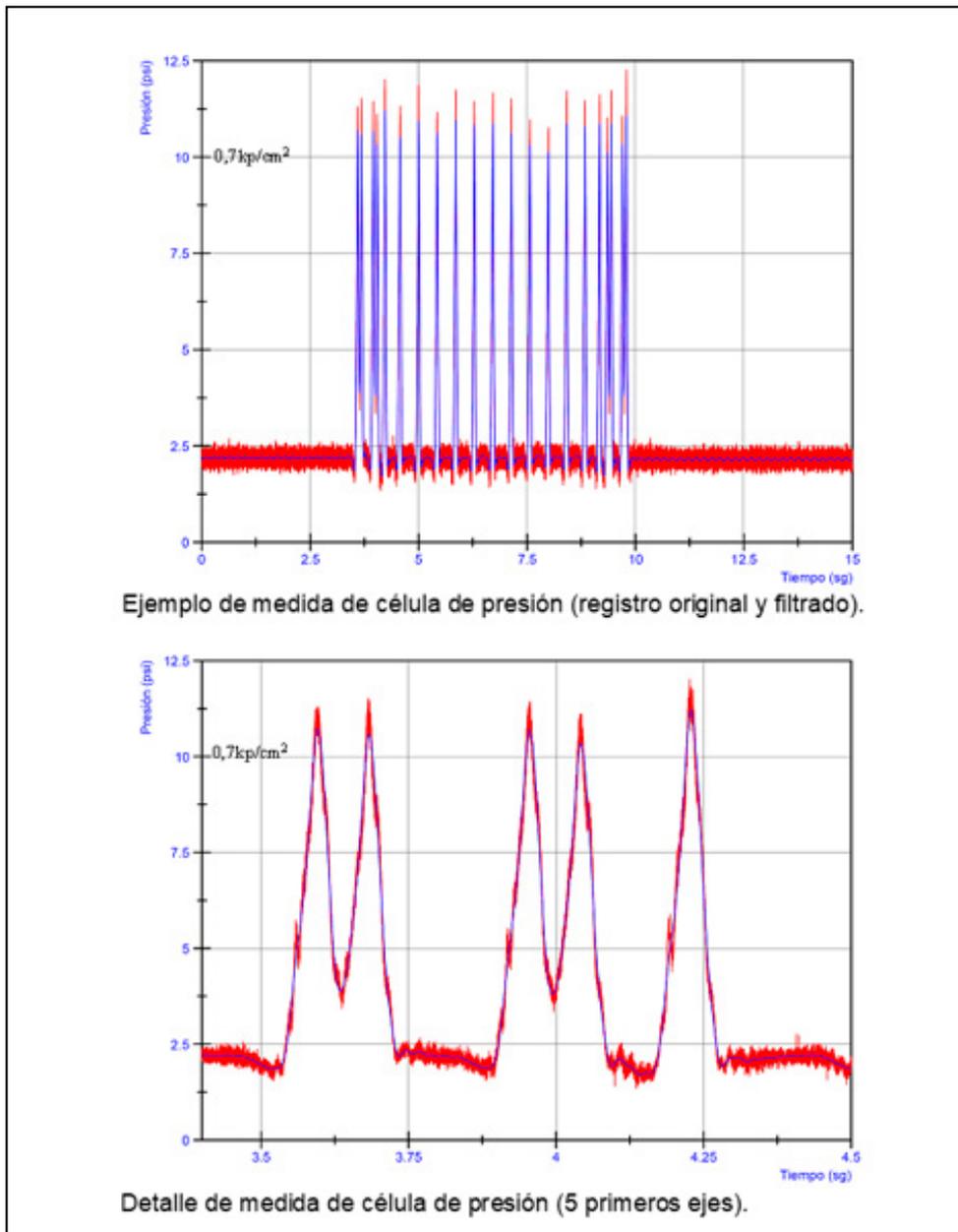
Los transductores de desplazamiento (LVDT) han sido utilizados para medir el acortamiento de las capas internas (balasto, subbalasto, capa de forma y coronación de terraplén). En la capa de balasto se colocaron transductores de desplazamiento bajo el punto medio de las traviesas instrumentadas (Foto 5). En la capa de subbalasto 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 eligió un filtro tipo pasa baja. 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 15 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 (Figura 15 y Figura 16). 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.

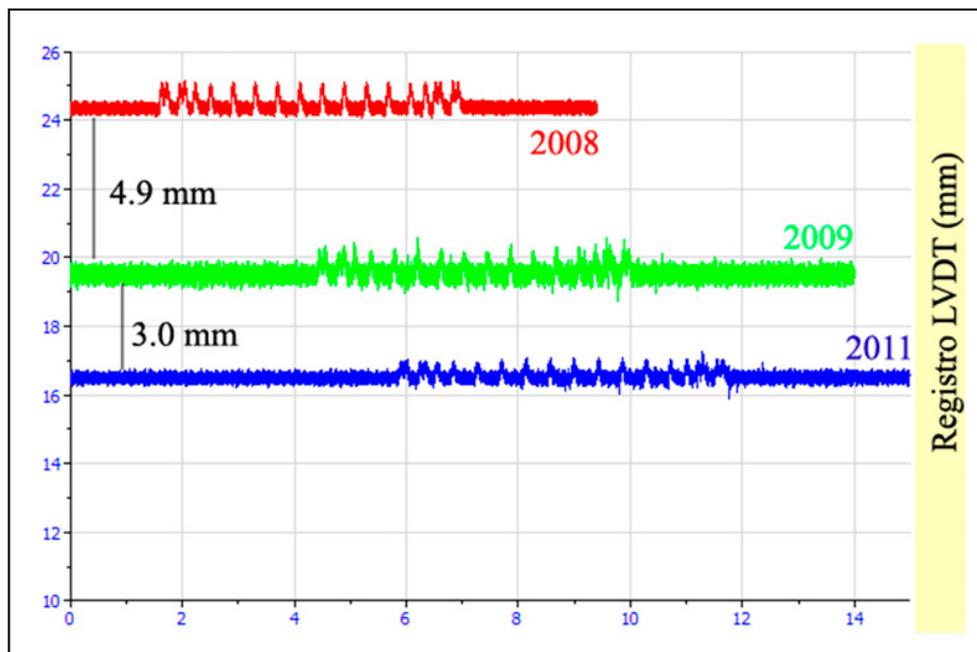
En la capa de subbalasto se registraron deformaciones al paso de los trenes comprendidas entre 0,05 y 0,15mm.



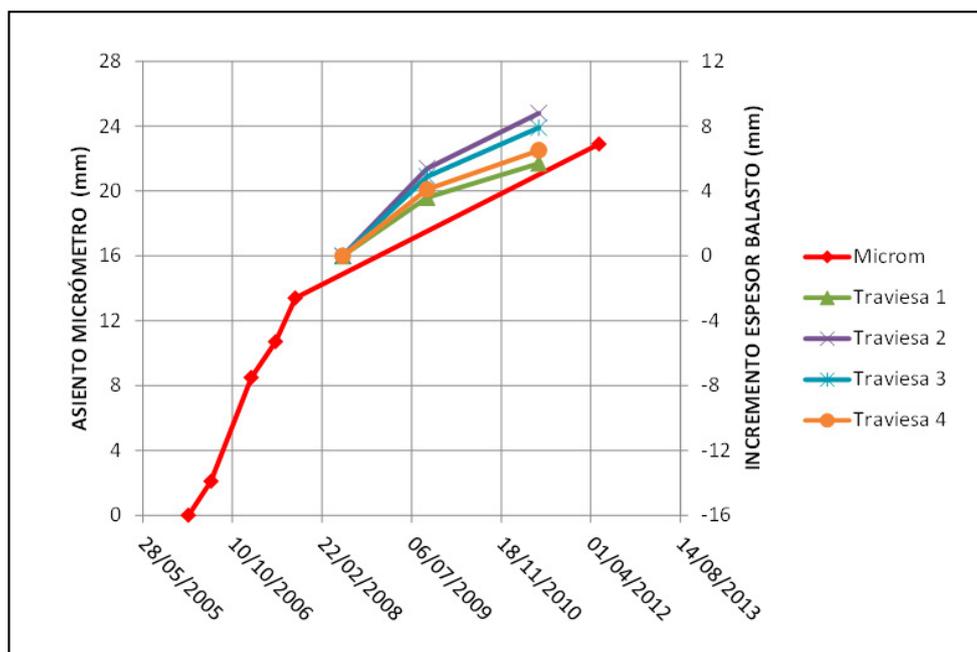
**Figura 14.** Registros original y filtrado de medidas de célula de presión.



**Foto 5.** Sensor LVDT utilizado en la capa de balasto.



**Figura 15.** Evolución temporal del nivel basal registrado en los transductores de desplazamiento situados en la capa de balasto en una de las traviesas auscultadas.



**Figura 16.** Asiento de la coronación del terraplén frente a la evolución del espesor de balasto.

#### 4. ANÁLISIS DE PATOLOGÍAS Y COMPORTAMIENTO DE TRANSICIONES Y SECCIONES SINGULARES

En la Tabla 1 y la Figura 17 se indican los trabajos más significativos llevados a cabo principalmente con ADIF

en los que la instrumentación y la modelización numérica han tenido un papel importante.

En las figuras siguientes se recoge información descriptiva de estos trabajos.





Foto 7. Instrumentación externa de sección bituminosa.



Foto 8. Medida de deflexiones en traviesa (geófono izquierdo) y carril (geófono central y láser).

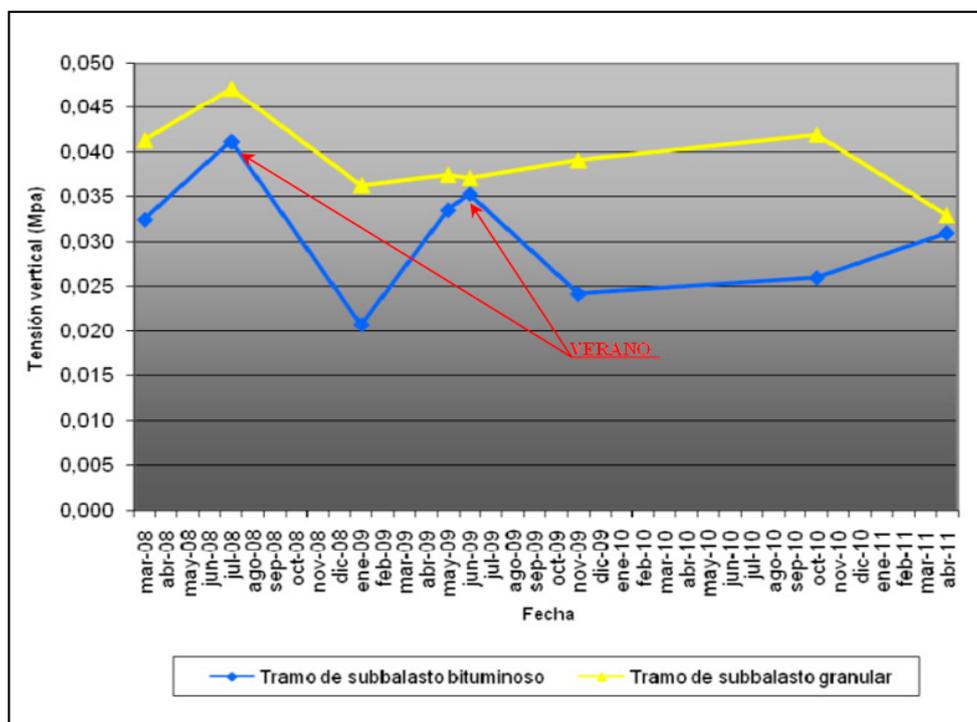


Figura 18. Tensión vertical en el contacto capa de forma - subbalasto.



Foto 9. Sección instrumentada con espesor importante de balasto.

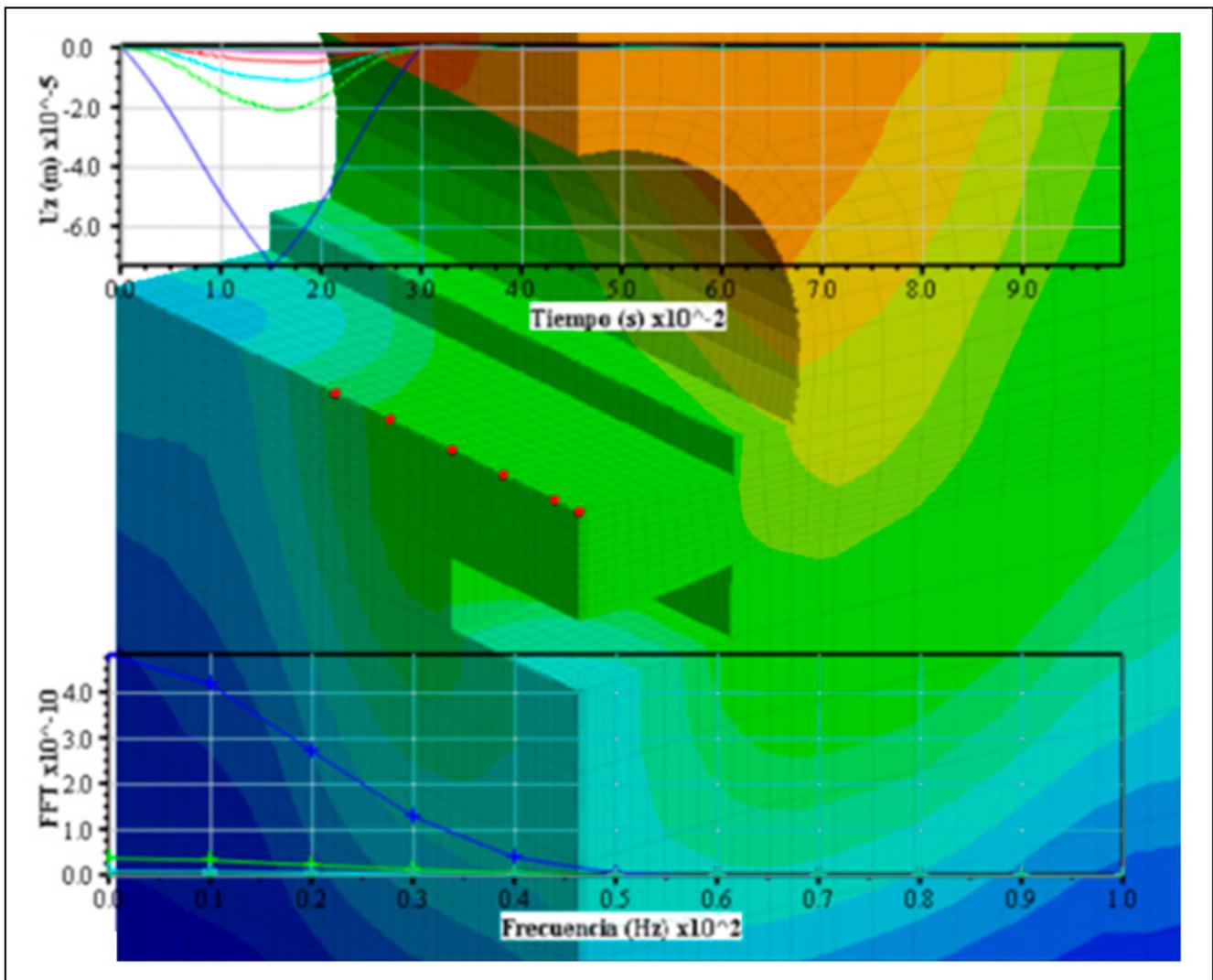


Figura 19. Análisis de la respuesta del túnel con una cavidad bajo la contrabóveda (FLAC3D).

## 5. INSTALACIÓN PARA ENSAYOS DE INFRAESTRUCTURA FERROVIARIA DEL CEDEX

El Laboratorio de Geotecnia dispone de una célula de ensayos que permite ensayar de forma acelerada a escala 1:1 secciones de vía real, tanto convencional como de alta velocidad con tráfico mixto, hasta velocidades de 400 km/h.

Tiene unas dimensiones de 21 m de longitud, 5 m de anchura y 4 m de profundidad y 3 zonas de ensayo de 7 m cada una.

Dispone de 6 gatos que permiten simular el movimiento horizontal de trenes hasta 400 km/h, incorporando la rotación de las tensiones principales en las capas de la vía.

Con este equipo pueden realizarse ensayos acelerados para analizar el comportamiento de secciones durante su vida útil (una semana de trabajo ↔ un año de tráfico).



Foto 10. Cajón ferroviario del CEDEX.



Foto 11. Cajón ferroviario del CEDEX (detalle de la instrumentación).

Para su puesta a punto se realizó una modelización numérica destinada a optimizar su comportamiento frente a sollicitaciones dinámicas.

En las figuras siguientes se recoge una sección de la instrumentación empleada para el estudio de secciones con subbalasto bituminoso y un ejemplo de distribución

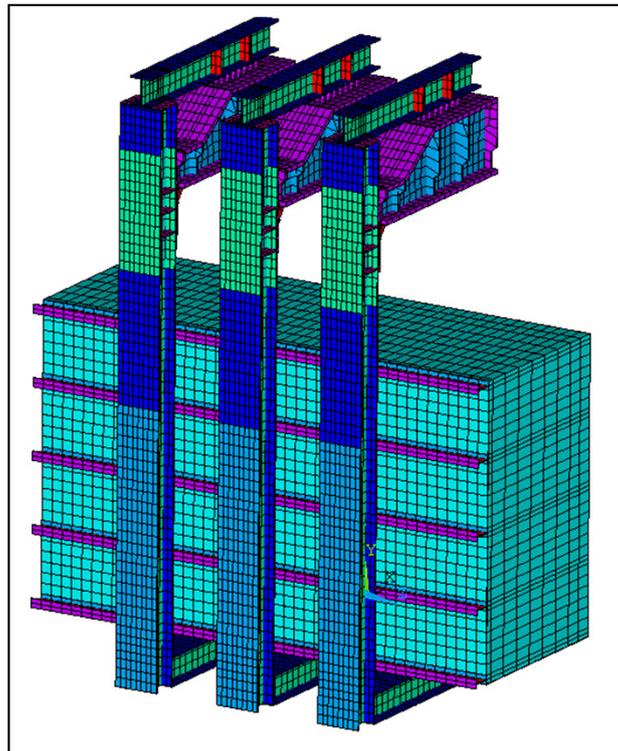


Figura 20. Modelización numérica del Cajón.

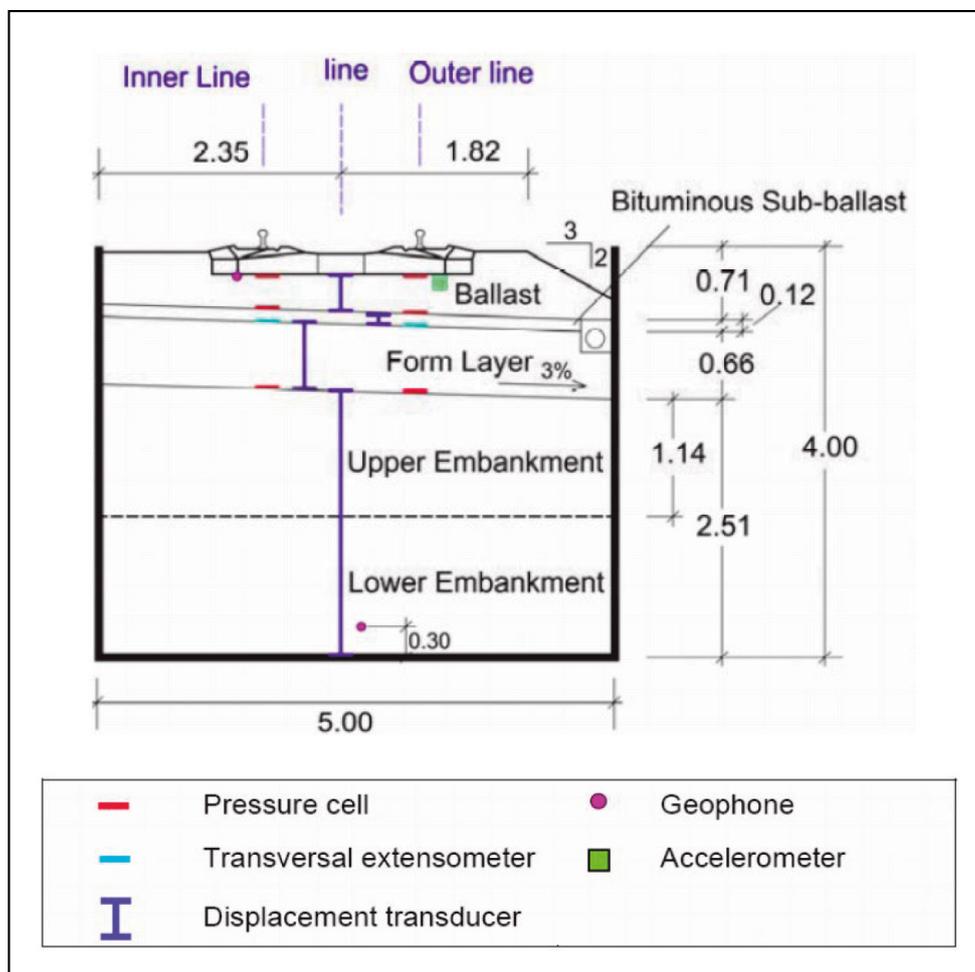


Figura 21. Ejemplo de sección instrumentada.

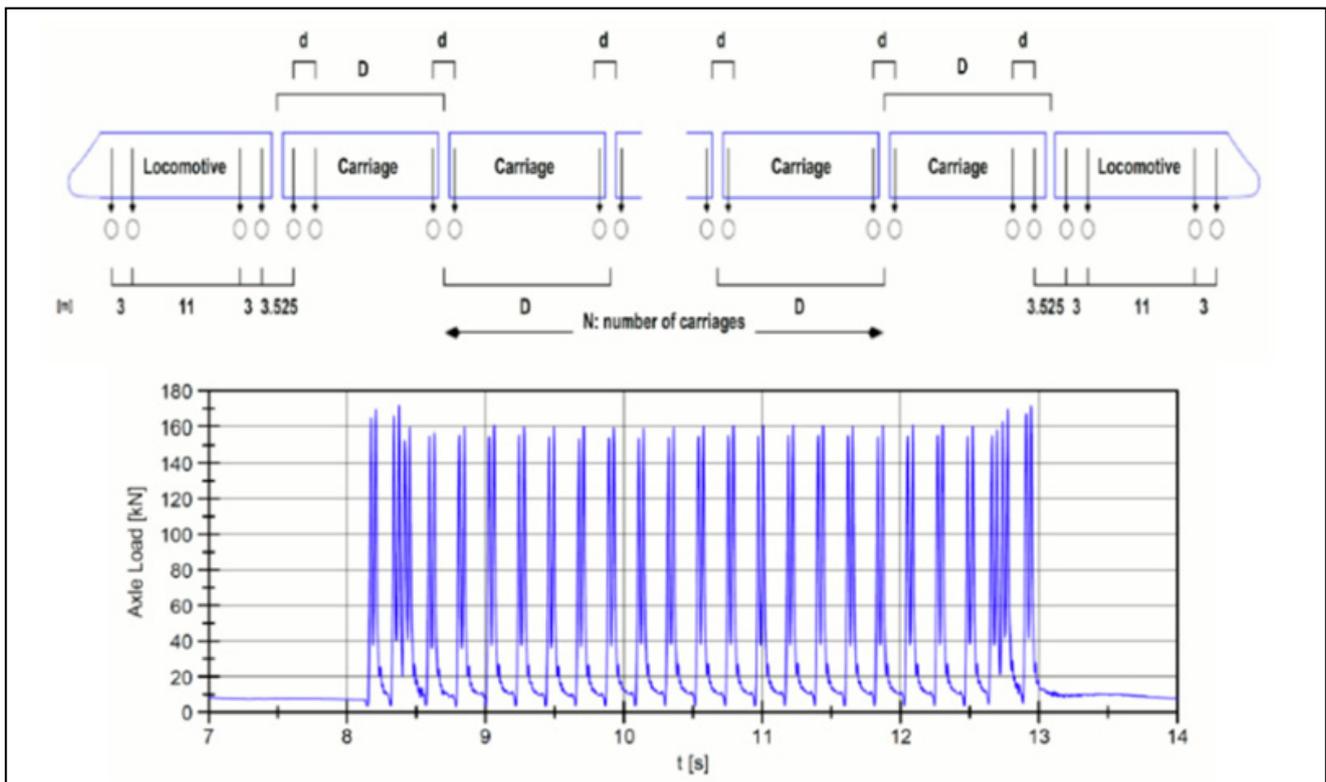


Figura 22. Ejemplo de distribución temporal de cargas al paso de un tren.

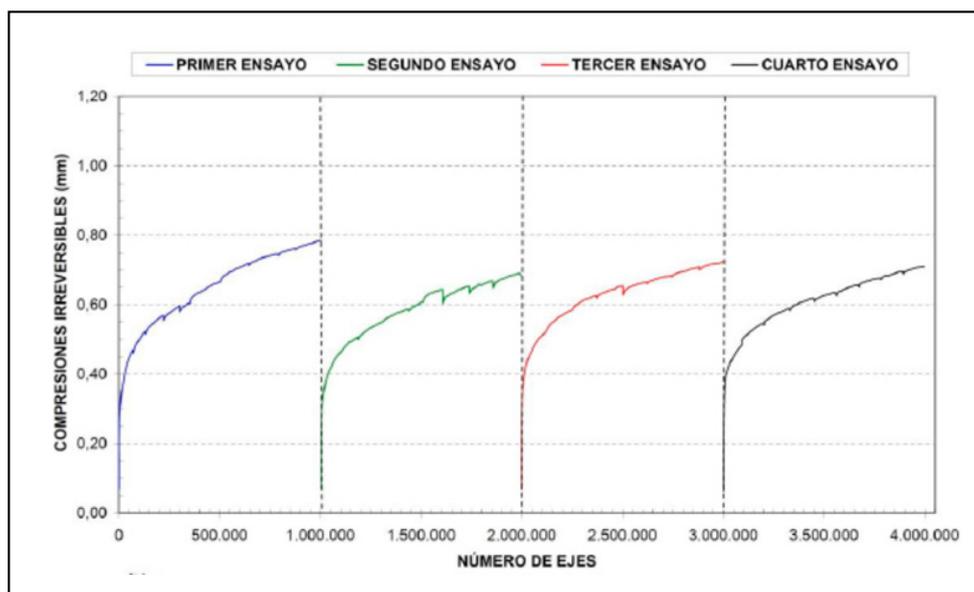


Figura 23. Asiento irreversible al paso de  $4 \cdot 10^6$  ejes.

temporal de cargas al paso de un tren así como el asiento remanente registrado en función del nº de ejes (hasta 4 millones de ejes). Estos equipos se describen en páginas posteriores.

De forma singular, en alguno de los trabajos realizados se solicitó al CEDEX la medida de aceleraciones en las partículas de balasto ferroviario. Para ello se decidió incluir internamente en cuatro piedras de balasto acelerómetros triaxiales integrados con características estáticas (medición de aceleración gravitatoria), asegurando el movimiento solidario piedra-acelerómetro mediante empotramiento con resina epoxi (Foto 12).



Foto 12. Partícula de balasto instrumentada.

En la Foto 13 se presenta un ejemplo del empleo en el cajón de ensayos de partículas de balasto instrumentadas. En esta aplicación, las piedras instrumentadas se instalaron buscando posiciones representativas del comportamiento del balasto. Para ello, la piedra 1 registró las aceleraciones en piedra aislada sobre traviesa central, en el eje de simetría de la misma, y la piedra 2 se dispuso en forma similar en el lateral de la misma traviesa. Las piedras 3 y 4 se instalaron en superficie del balasto a 30 cm del eje longitudinal de la traviesa de referencia.



Foto 13. Situación de piedras instrumentadas.

La utilización de acelerómetros triaxiales incluidos en piedras de balasto ha permitido registrar las aceleraciones producidas por el paso de trenes en amplitud y tiempo, así como su orientación en el espacio, tanto en la instalación del CEDEX como en medidas de campo. La respuesta estática de los sensores utilizados orienta la posición de la piedra, por lo que los resultados son independientes de la posición de la misma.

Entre los trabajos llevados a cabo en el Cajón Ferroviario pueden destacarse:

- Reproducción de la sección de la vía en el P.K.69+500 de la LAV Madrid-Barcelona a la salida de Guadalajara (2004-2006). Fue el primer modelo físico estudiado. Esta sección se instrumentó para disponer de un elemento de calibración y/o confirmación de la información proporcionada por la instalación del CEDEX.
- Optimización del espesor de subbalasto bituminoso frente a circulaciones a alta velocidad (2007-2009). Se contrastó con la información obtenida en un tramo experimental de 500 m construido con subbalasto bituminoso en la localidad de Valdestillas situada en la LAV Madrid-Valladolid. Para optimizar dicho espesor, se ensayaron 3 secciones transversales con subbalasto bituminoso, cada una de ellas en una zona distinta del Cajón.
- Influencia del tipo de traviesa en la propagación de la vibración a través de la infraestructura férrea (Programa Europeo RIVAS 2009-2013).
- Estudio del comportamiento de líneas de alta velocidad sometidas a tráfico mixto (2013).
- Colaboración en el marco del proyecto FASTRACK: "Nuevo sistema de vía en placa para alta velocidad sostenible y respetuoso con el medio ambiente" (2014).

- Estudio de la influencia de la contaminación del balasto con arena en la línea de alta velocidad Medina-La Meca.
- Estudio del comportamiento mecánico de prototipos de vía en placa (Programa Europeo Capacity For Rails (2013-2017)).
- Estudio del efecto de la muy alta velocidad (hasta 400 km/h) en el comportamiento mecánico de las capas de balasto y subbalasto (2017).

## 6. CONCLUSIONES

En los puntos anteriores se intenta presentar una panorámica de los trabajos que realiza el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX en el ámbito de la Instrumentación de obras ferroviarias y el estudio de patologías y comportamiento de las diferentes capas de asiento.

Es una actividad relativamente nueva que ha surgido de la relación con ADIF y que ha requerido un importante esfuerzo profesional.

### Agradecimientos

Deseo agradecer a las personas que han colaborado en los trabajos a los que se refiere este documento, tanto de ADIF como del equipo multidisciplinar que llevó a cabo estos trabajos.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- Barzilai, A. (2000). Improving a geophone to produce an affordable broadband seismometer. Ph.D. Thesis, Stanford University.
- Brincker, R., Lago, T., Andersen, P. & Ventura, C. (2001). Improving the classical geophone sensor element by digital correction. Proceedings: IMAC-XXIII Conference & Exposition on Structural Dynamics.
- Coulier, P. & Degrande, G. & Lombaert, G. & Leuven, K. U. & Cuéllar, V. (2015). Ground vibration reduction by means of stiff wave barriers in the soil: a case study. Railway Engineering, art. nr. 1620, 2015.
- Coulier, P. & Cuéllar, V. & Degrande, G. & Lombaert, G. (2015). Experimental and numerical evaluation of the effectiveness of a stiff wave barrier in the soil. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 77, pp. 238-253, 2015.
- Crespo-Chacón, I., García-de-la-Oliva, J.L. & Santiago-Requerda, E. (2016). On the use of geophones in the low-frequency regime to study rail vibrations. Proceedings of the 3rd International Conference on Transportation Geotechnics, Guimarães (Portugal).
- Cuéllar, V. & Navarro, F. & Andreu, M.A. & Cámara, J.L. González, F. & Rodríguez, M. & Núñez, A. & González, P. & Díaz, R. & Navarro, J. & Rodríguez, R. (2011). Short and long term behaviour of high speed lines as determined in 1:1 scale laboratory test. XV World Congress Railway Research, May 22-26, 2011.
- Etaire, J. & Cuéllar, V. & Santana, M. (2017). Testing railway tracks at 1:1 scale at CEDEX Track Box. Intern. Cong. on High-Speed Rail. Technologies and Long Term Impacts. Ciudad Real (Spain), 4-6 October 2017
- Etaire, J. & Cuéllar, V. & Santana, M. (2017). Track stiffness in a ballast track fouled with desert sand. To be submitted to Symposium International GEORAIL 2017 International Symposium.
- Etaire, J. & Pardo, F. & Cuéllar, V. (2017). CEDEX Track Box as an experimental tool to test railway tracks at 1:1 scale. In Pro-

ceedings of the 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Seoul 2017.

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

Esveld, C. (2001). *Modern railway track*. 2nd edition, MRT-Productions, Delft.

Ebersöhn, W. & Selig, E.T. (1994). Track modulus measurements on a heavy haul line. *Transportation Research Record 1470*, TRB, National Research Council, Washington D.C.

Fraile-Mora, J. & García-Gutiérrez, P.A. & Fraile-Ardanuy, J. (2012) *Instrumentación aplicada a la Ingeniería*. Ibergaceta Publicaciones, S.L., Madrid.

Fröhling, R.D. (1997). *Deterioration of railway track due to dynamic vehicle loading and spatially varying track stiffness*. PhD-Thesis, University of Pretoria, South Africa.

García-de-la-Oliva, J.L. & Santiago-Recuerda E. (2013a). Análisis de las campañas de campo realizadas en la sección situada en el P.K. 8+430 de la línea de alta velocidad Madrid-Valladolid (Tramo Fuencarral-Cantoblanco). Documento interno.

García-de-la-Oliva, J. L. & Santiago-Recuerda, E. (2013b). Análisis e interpretación de los datos de las campañas de medidas de Valdestillas (Valladolid) pertenecientes a la ficha 2.1. “Seguimiento de las secciones de vía instrumentadas”. Documento interno.

García-de-la-Oliva, J.L. & Santiago-Recuerda, E. (2013c). Estudio del comportamiento de secciones de vía con importantes espesores de balasto. Documento interno.

García-de-la-Oliva, J.L., Moreno-Robles, J., de-las-Heras-Meco, C. & Santiago-Recuerda, E. (2013). Estado actual de los trabajos realizados de la ficha N°1 “Seguimiento y asesoramiento geotécnico para el estudio de la instrumentación postconstructiva del túnel de El Regajal”. Documento interno.

Maciel, R. & Ferreira, P. & Estaire, J. (2018). Railway track design optimization for enhanced performance at very high speeds: experimental and computational estimations. Submitted to *Structure and Infrastructure Engineering*

Manzanas, J. & Moreno, J. & Cuéllar V. (2007). CEDEX’s experimental facility for testing railway tracks. XIV Congreso Europeo de Mecánica del Suelo e Ingeniería Geotécnica. Madrid (España), 24-27 septiembre 2007

Moreno-Robles, J. (2008). Reproducción, mediante ensayos a escala real, del efecto en la vía de la circulación ferroviaria a alta velocidad. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.

Moreno-Robles, J. & García-de-la-Oliva, J.L. (2012). Determinación de las cargas aplicadas al carril mediante bandas extensométricas. *Ingeniería civil*, nº 165, Monográfico sobre FF.CC., pp. 123-129, CEDEX, Madrid.

Moreno-Robles, J., Crespo-Chacón, I. & García-de-la-Oliva, J.L. (2016). Instrumentation techniques for studying the horizontal behavior of high-speed railways. *Proceedings of the 3rd International Conference on Transportation Geotechnics*. Guimarães (Portugal).

Moreno-Robles, J., Santiago-Recuerda, E. & García-de-la-Oliva, J.L. (2013). Análisis de la transición vía en placa – vía sobre balasto situada en la boca sur del túnel de San Pedro de la línea de alta velocidad Madrid-Valladolid. Documento interno.

Sussmann, T.R., Ebersöhn, W. & Selig, E.T. (2001). Fundamental nonlinear track load deflection behavior for condition evaluation. *Transportation Research Record 1742*, Paper No. 01-2916.

Tijera, A., Ruiz, R., Cuéllar, V. & Rodríguez, M. (2012). Variaciones de rigidez de vía en zonas de transición. *Ingeniería Civil*, nº 165, pp.103-112, CEDEX, Madrid.

UIC (2006). *Earthworks and track bed for railway lines*. Code 719, 3rd edition. International Union of Railways, Paris.