

Desafíos en el ámbito de las patologías de las obras lineales

Challenges Concerning Pathologies of Roads and Railway Lines

José Luis García de la Oliva^{1*}, Javier Moreno Robles²

Resumen

En la presente comunicación se presenta una panorámica de los trabajos que realiza el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX en el ámbito de las obras lineales.

Se incluyen inicialmente, de forma muy resumida, una serie de ejemplos de la colaboración con la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento en el estudio de patologías surgidas en la red de carreteras de su competencia. Se han seleccionado por la importancia de las actuaciones, su singularidad o por el hecho de ser representativos de casos relativamente frecuentes. Esta puede considerarse una actividad tradicional del Laboratorio de Geotecnia.

Posteriormente se recogen las líneas de actuación relacionadas con la infraestructura ferroviaria. Es una actividad relativamente nueva que ha surgido de la relación con ADIF y que presenta características muy diferentes a las relacionadas con las carreteras.

Palabras clave: patología carreteras, ferrocarriles, instrumentación.

Abstract

The present communication presents an overview of the work carried out by the CEDEX's Geotechnical Laboratory in the field of linear works. Firstly, a series of examples of collaboration with the Directorate General of National Roadways of the Spanish Ministry of Public Works in the study of pathologies affecting the road network under its competence are included. They have been selected because of the importance of the actions, their singularity or because they are representative of relatively frequent pathologies. This can be considered as a traditional activity of the aforementioned Geotechnical Laboratory.

Finally, the lines of action related to the railway infrastructure are outlined. This is a relatively new activity due to the collaboration with ADIF, which presents very different characteristics from those related to roads.

Keywords: pathology, roads, railways, 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 colaborado con la Dirección General de Carreteras en el estudio de las diferentes patologías surgidas en la red de carreteras de su competencia y en el planteamiento de las actuaciones correctoras.

Asimismo ha trabajado con ADIF en el estudio de problemáticas de las líneas ferroviarias lo que ha requerido un importante esfuerzo profesional por el carácter singular de cada una de las actuaciones.

En los puntos siguientes se pretende presentar una descripción de diferentes actuaciones en el ámbito de los trabajos citados.

2. ACTIVIDADES RELACIONADAS CON LA RED DE CARRETERAS DEL ESTADO

La red de carreteras de España tiene unos 166.000 kilómetros, de los cuales 26.000 km están gestionados por la Administración Central y recogen el 51,2% del tráfico total y el 62,8% del tráfico pesado. De la totalidad de la red, 15.000 km son vías de gran capacidad (autopistas de peaje, libres y autovías).

La conservación de ese patrimonio en un entorno con la complejidad orográfica y geológico-geotécnica que presenta España es un auténtico desafío técnico.

En los puntos siguientes se presentan una serie de ejemplos representativos de esta actividad del Laboratorio de Geotecnia del CEDEX. Se han seleccionado por la importancia de las actuaciones, su singularidad o por el hecho de ser representativos de casos relativamente frecuentes.

2.1. Patologías de terraplenes

Es un tipo de patologías relativamente frecuente que suele obligar a realizar actuaciones urgentes.

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

¹ Ingeniero de Caminos Canales y Puertos UPM. Laboratorio de Geotecnia del CEDEX.

² Dr. Ingeniero de Caminos Canales y Puertos UPM. Laboratorio de Geotecnia del CEDEX.

2.1.1. Terraplén de autovía A-4 (Jaén)

La problemática de este terraplén es representativa de toda una serie de casos que han surgido en Andalucía. Los daños parecen estar asociados a una inestabilidad que afecta al terreno natural alcanzando unos 17m de profundidad máxima y afectando a unos 140 metros de extensión máxima en planta. El pie del deslizamiento alcanza la vía del ferrocarril situada ladera abajo.

La calzada está situada en terraplén sobre una ladera constituida por arcillas margosas del Guadalquivir y la inestabilidad afecta al carril derecho de la calzada sentido Córdoba, que se apoya sobre el trazado de la antigua plataforma Redia.



Foto 1. Daños en calzada y arcén de la autovía.

Se realizó una campaña de trabajos de reconocimiento basada en ensayos de penetración dinámica y sondeos mecánicos equipados con tubería inclinométrica.

En la figura siguiente se recoge la geometría de la ladera y de la superficie de inestabilidad determinada a partir de la información proporcionada por sondeos inclinométricos.

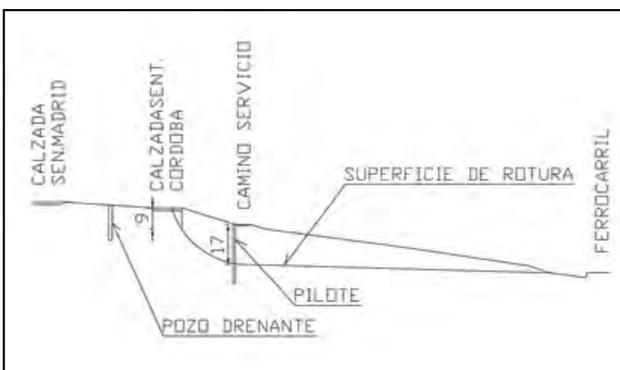


Figura 1. Perfil de la ladera.

Se propusieron y llevaron a cabo las siguientes actuaciones:

- Estabilización - contención de la masa inestable con elementos resistentes.
- Eliminación de las presiones de agua mediante un drenaje profundo (pozos drenantes).

- Medidas de drenaje superficial y retirada de tierras del actual espaldón para quitar peso a la cabeza del deslizamiento.

Se dispusieron pozos drenantes de 1500mm de diámetro y 10-11m de profundidad, espaciados 20m (foto 2) y comunicados entre sí mediante perforaciones realizadas desde el interior de los mismos (foto 3).



Foto 2. Pozos drenantes.



Foto 3. Ejecución de tubos de comunicación entre pozos y de drenes radiales desde un pozo.

La distancia entre pozos la consideramos muy elevada por la dificultad de comunicarlos entre sí con las perforaciones citadas pero la empresa que llevó a cabo los trabajos consiguió realizarlas con éxito. Desde el interior de los pozos se ejecutaron drenes radiales en dos niveles, de 12m de longitud.

Se emplean pilotes de gran diámetro para estabilizar el deslizamiento, introduciéndolos en el terreno de forma que "cosan" la superficie de deslizamiento. Se trata de elementos puntuales que atraviesan la masa deslizante y deben empujarse una cierta longitud en el terreno firme subyacente. Son elementos que trabajan fundamentalmente a flexión, con cortantes importantes en la zona de deslizamiento. A veces se les denomina "pilotes pasivos", puesto que entran en carga al deformarse bajo los empujes del terreno. Se trata de un problema de interacción suelo- estructura en

condiciones en las que el terreno natural se encuentra en situación próxima a la rotura previamente a la disposición de los elementos estabilizantes.

El cálculo se abordó por dos procedimientos diferentes, que se indican a continuación:

- Estudio mediante la técnica de los elementos finitos empleando el programa PLAXIS.
- Estudio mediante una combinación de equilibrio límite-módulo de reacción, utilizando los programas de cálculo SLOPE y RIDO.

Se realizó un análisis retrospectivo para caracterizar geotécnicamente los materiales identificados en los sondeos.

Se plantearon varias secciones de cálculo con las siguientes distribuciones de pilotes:

- Pilotes de 1000 mm de diámetro, de 20 m de longitud, separados 2,5 m entre ejes.
- Pilotes de 1250 mm de diámetro, de 24 m de longitud, separados 2,5 m entre ejes.
- Pilotes de 1500 mm de diámetro, de 30 m de longitud, separados 2,5 m entre ejes.

No existe un criterio universal para definir el incremento de factor de seguridad que se debe alcanzar. En este caso se adoptó un valor de 1 décima, valor muy utilizado en la práctica habitual para deslizamientos de esta envergadura.

En la viga de atado de las cabezas de los pilotes se dejaron dispuestos unos tubos pasantes para facilitar a disposición de anclajes en caso de que la solución ejecutada necesitase ser complementada.

La implantación de esta solución de estabilización ha tenido un buen comportamiento hasta la fecha.

2.1.2. Terraplén en Autovía A-8 en Liendo (Cantabria)

El terraplén se sitúa en una ladera natural con una inclinación aproximada de 17°, con una altura máxima de unos 20 m en el lado mar y de unos 3-4 m en el otro lado.

La zona afectada alcanza una longitud de unos 80 m.

Se observaban desplazamientos importantes en la calzada sentido Santander. La calzada sentido Bilbao de momento no estaba afectada (los daños alcanzaban la mediana).



Foto 4. Grietas de la calzada.



Foto 5. Grietas de la calzada.



Foto 6. Vista de grietas en el terraplén.

Un condicionante importante para la definición de la corrección de esta patología fue la necesidad de abrir al tráfico la calzada en un plazo de 1 mes por la proximidad de la Semana Santa.

Según información verbal recogida durante la visita, el material con el que se ejecutó el terraplén procede del desmonte cercano excavado en lutitas, por lo que la naturaleza del relleno es arcillosa.

En su desarrollo, el terraplén intercepta una vaguada que en la actualidad presenta un drenaje deficiente. En el lado montaña, donde el terraplén presenta su menor altura, existe una cuneta rectangular hormigonada que desaparece vertiendo el agua directamente en el terreno. Esta discurre por el pie del terraplén encharcando el camino existente e infiltrándose buena parte en el terreno.

Según la información verbal obtenida, los trabajos forestales realizados ladera arriba de la calzada pudieron haber modificado la escorrentía en esa zona.

Como medida inicial de urgencia se hincaron carriles UIC 54 en la zona más próxima a la barrera de mediana con el fin de limitar el riesgo de afección a la calzada Santander-Bilbao.

Asimismo se realizó una zanja dren en el pie del terraplén del lado montaña, para cortar los flujos de agua provenientes de la ladera y se dispusieron drenes subhorizontales desde el pie del terraplén de unos 25 m de longitud.

Se definieron los trabajos de reconocimiento necesarios para definir la profundidad afectada por la inestabilidad (inventario de grietas, control topográfico, ensayos DPSH, sondeos mecánicos, inclinómetros y piezómetros).



Foto 7. Hinca de carriles.



Foto 8. Zanja dren.

Los primeros resultados de estos trabajos no se recibirían hasta al menos una semana después y dada la urgencia de los trabajos se consideró importante poner en marcha los trabajos de estabilización previamente a disponer de los resultados de los trabajos de reconocimiento.

Se contemplaron varias posibles alternativas de tratamiento:

- Hinca de carriles formando una malla cubriendo la superficie a tratar.
- Ejecución de columnas de suelo estabilizado “in situ” con cemento o como alternativa, columnas de mortero.
- Jet-grouting.
- Inyecciones con tubos manguito.
- Pantalla de micropilotes o pilotes.

Los condicionantes iniciales (plazo y desconocimiento inicial de la profundidad alcanzada por la inestabilidad justificaron optar por la ejecución de una malla de columnas de mortero en la superficie de la calzada con objeto de incrementar la resistencia de la superficie de inestabilidad en ese tramo y recoger parte del peso del terraplén en la zona situada bajo la calzada, que corresponde a la cabecera de la inestabilidad con lo que se mejoraría de forma importante la estabilidad del terraplén al reducirse el “peso inestabilizante”.

Esta alternativa tiene la ventaja de que pueden comenzarse su ejecución antes de disponer de los resultados de los trabajos de reconocimiento ya que es fácil definir una

profundidad de tratamiento razonable en la zona próxima a la mediana, dejando el tratamiento de la banda próxima al carril exterior de la calzada hasta no disponer de la información de estos trabajos.

Se realizó una malla de columnas de mortero de 62cm de diámetro y de 20 a 26m de profundidad (1 columna cada 5m² en los 80 cm centrales y 1 columna cada 6,5m² en dos bandas de 20m).

El análisis se realizó inicialmente mediante el programa Slope/W de GeoStudio y posteriormente mediante el programa Plaxis, con el procedimiento basado en el análisis retrospectivo para la definición de parámetros del terreno y el posterior estudio de la mejora introducida por el tratamiento.

Se estimó un incremento del coeficiente de seguridad de 0,25 frente a la situación inicial.



Foto 9. Ejecución de las columnas de mortero.

Asimismo se planteó el seguimiento del comportamiento del terraplén mediante topografía y sondeos equipados con inclinómetros para comprobar su correcto comportamiento o en su caso la ejecución de actuaciones complementarias.

Los movimientos registrados en el periodo previo al inicio de las obras de reparación fueron elevados, superiores a 20 cm en algunos puntos; durante los trabajos de reparación los movimientos disminuyeron en gran medida, hasta unos 3-4 cm como máximo, y tras la finalización de los trabajos de reparación, los movimientos tanto en la calzada como en el talud prácticamente han desaparecido.



Foto 10. Vista de la obra finalizada.

2.2. Patologías de desmontes

Son patologías que en los últimos años han dado lugar a actuaciones de gran envergadura. En la actualidad el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX está trabajando en el estudio de la estabilización de un gran desmonte sobre una autovía que afecta aproximadamente a un millón de metros cúbicos de material. Esta actuación no se presenta en este documento por estar en fase de estudio. Se ha elegido una anterior que tiene ciertas similitudes con ella.

Se describen el estudio y las actuaciones realizadas sobre un desmonte en la autovía A2, en Barcelona.

El desmonte presentaba unos 70 m de altura total con 2 bermas intermedias.

En la zona inferior aparece una alternancia irregular de materiales: arcillas, argilitas y margas y en los 20-25m superiores, calizas tableadas más competentes y calizas margosas.



Foto 11. Desmonte durante su construcción.

En fase de construcción sufrió episodios de inestabilidad en zona inferior y se dispusieron paños de redes de cables fijados al terreno mediante bulones.

Cinco años después de su construcción comenzaron a aparecer movimientos importantes. En la foto 12 se resalta la zona afectada por la inestabilidad y en la foto 13 un detalle del límite inferior de ésta, que formaba una línea con caída hacia el Oeste, que llegaba a pasar bajo la calzada de la autovía (foto 14).



Foto 12. Zona afectada por la inestabilidad.



Foto 13. Deformación de la superficie del desmonte.

En la foto 14 se presentan daños en la plataforma de la autovía. Los daños alcanzaron la mediana. En la foto 15 se observa una grieta con salto superior a 2m en la berma superior.

Se produjeron abundantes roturas de bulones en el desmonte. Al menos 15 bulones salieron proyectados al romper, alcanzando la calzada próxima al desmonte y en algún caso, la calzada opuesta.

En la primera visita a obra se plantearon unas primeras actuaciones que básicamente consistieron en el sellado de grietas para limitar la infiltración del agua y disposición de elementos para la sujeción de la cabeza de los bulones con el fin de limitar el riesgo de afección al tráfico (foto 18) y se puso en marcha la campaña de investigación destinada a caracterizar y dar geometría a la masa inestable (básicamente cartografía, control topográfico de movimientos y ejecución de sondeos equipados con tubería inclinométrica).

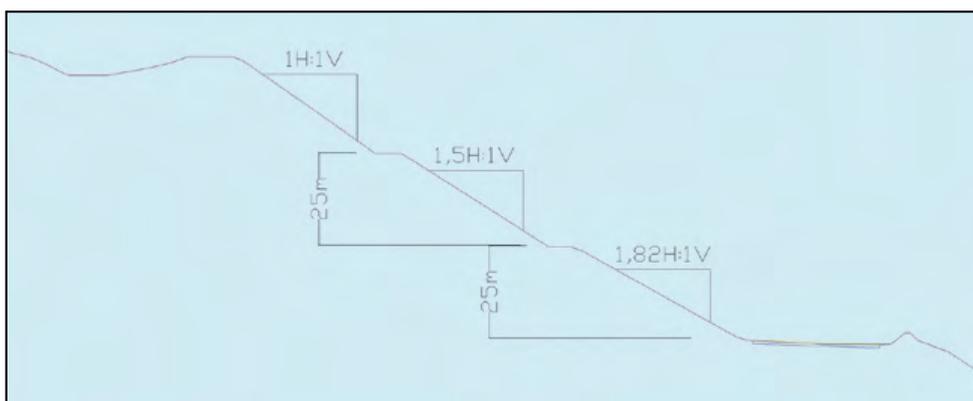


Figura 2. Perfil esquemático.



Foto 14. Daños en el pie del desmonte.



Foto 18. Sujeción de la cabeza de los bulones.



Foto 15. Grieta con salto >2m en berma superior.



Foto 16. Rotura de bulones.

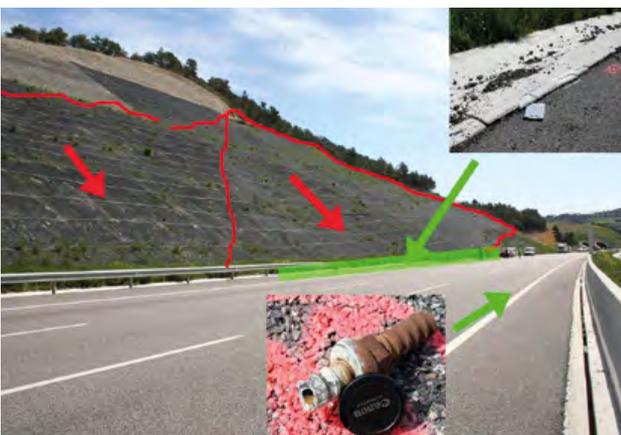


Foto 17. Caída de bulones a la calzada.

En las figuras siguientes se esquematiza la información procedente del control topográfico de movimientos. Permite acotar la zona afectada por la inestabilidad (figura 3). En la figura 4 se representa un perfil con los vectores de movimiento con una geometría propia de un deslizamiento profundo.

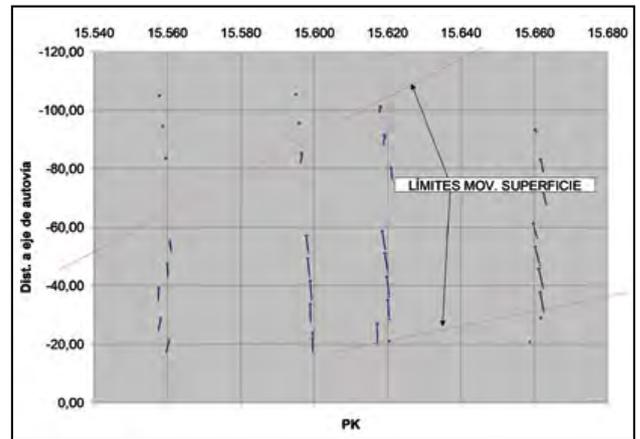


Figura 3. Planta esquemática con vectores de movimientos en superficie del desmonte.

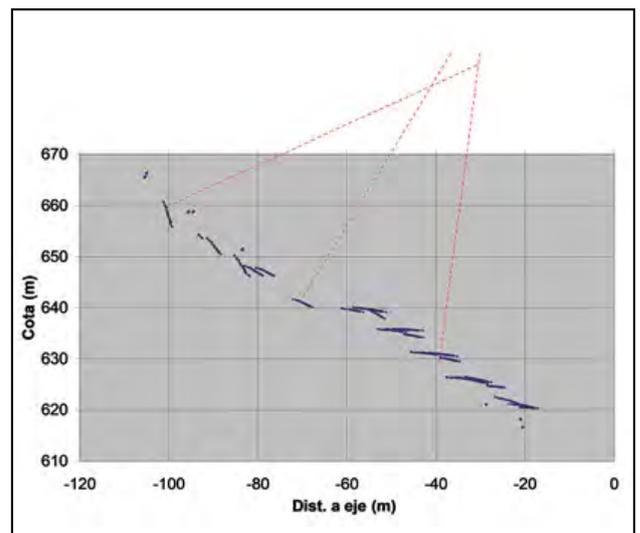


Figura 4. Perfil del desmonte con vectores de movimiento y líneas normales a éstos.

Los sondeos inclinométricos permitieron acotar la profundidad alcanzada por la inestabilidad. Bajo la mediana

de la autovía alcanzaba unos 7m de profundidad y 18-20m en la zona intermedia del desmonte.

La inestabilidad parece corresponder a la reactivación de un antiguo deslizamiento.

Según información verbal recogida en la zona, durante la construcción de la carretera nacional, ladera abajo de la autovía, se produjo un importante deslizamiento que afectó a la zona objeto de estudio provocando importantes deformaciones en superficie (figura 5).

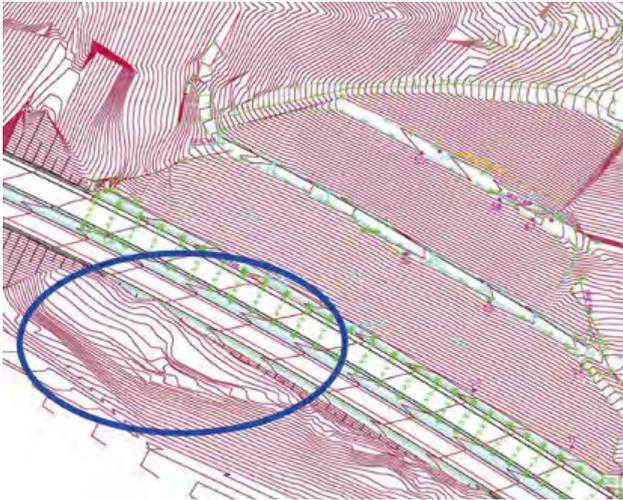


Figura 5. Planta del desmonte. Se resalta el pie del antiguo deslizamiento.

Se definieron las siguientes actuaciones para la estabilización del desmonte:

- Retaluzado del desmonte aprovechando la vaguada existente junto a la coronación.
- Tación estabilizador de pedraplén al pie del desmonte (con materiales procedentes de la excavación de la coronación del desmonte).
- Drenaje superficial y profundo.
- Protección de su superficie (mallas de guiado en la zona superior y localmente, redes de cables bulonadas).

En la figura 6 y la figura 7 se esquematiza el tratamiento previsto. El retaluzado se efectuó con los siguientes criterios:

- Retranqueo de 40m.
- Talud 1,8H:1V en el primer nivel, 1,5H:1V entre ambas bermas y 1H:1V en el nivel superior.
- Bermas de al menos 6 m. Superior en roca.

El retranqueo tuvo por objeto separar de la autovía el talud de desmonte y permitir una salida a la inestabilidad, a modo de fusible, exterior a la autovía (la superficie de inestabilidad inicial discurría bajo la calzada de la autovía).

La geometría de la ladera, con una vaguada sobre coronación (figura 5) redujo sensiblemente el movimiento de tierras.

El movimiento de tierras supuso la retirada de 300.000 m³.

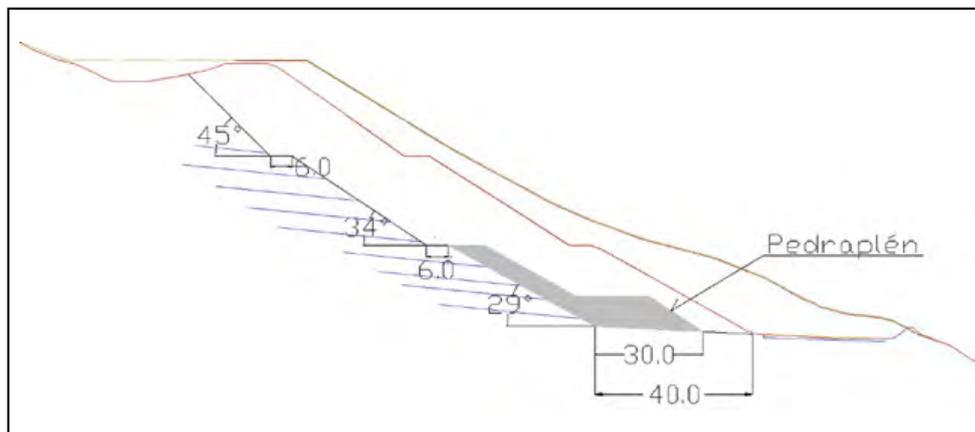


Figura 6. Esquema de tratamiento.

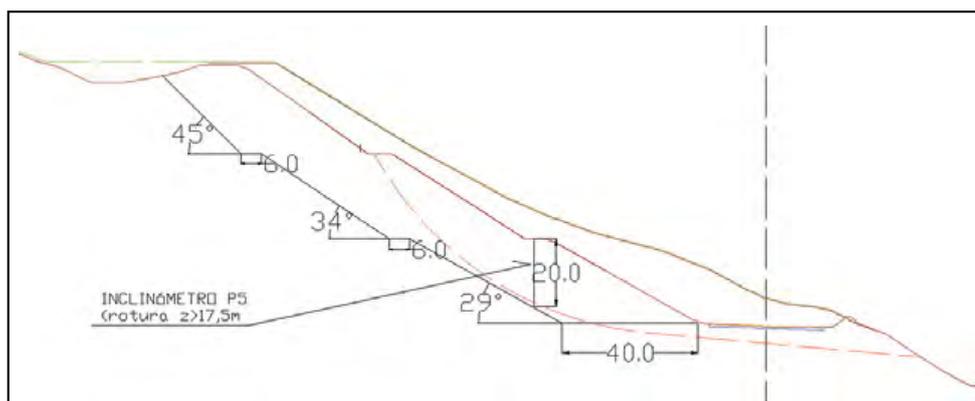


Figura 7. Movimiento de tierras y superf. de rotura.



Foto 19. Ejecución de las obras.

Cuando la excavación se encontraba a nivel de la berma superior se planteó la necesidad de abrir al tráfico la calzada próxima al desmante manteniendo los trabajos de estabilización.

Con el fin de mantener unas condiciones de seguridad adecuadas se dispuso una barrera dinámica en la berma inferior, para proteger la calzada de la posible caída de material y se implantó un sistema de control topográfico superficial automático mediante una estación robotizada (foto 20). Este sistema permitía disponer en tiempo real de información sobre la evolución de movimientos en el desmante y generar avisos cuando se superaban unos criterios de alarma predefinidos.



Foto 20. Control topográfico de movimientos..

Una vez finalizadas las obras se ha mantenido un seguimiento periódico de la instrumentación (básicamente la inclinometría), reflejándose la estabilidad actual del desmante.

2.3. Túneles

En este apartado se recoge una patología que destaca por la envergadura de la inestabilidad que afecta al túnel.

Es un túnel con una longitud aproximada de unos 670 m y disposición de doble tubo (figura 8), situado en Granada.

Cada tubo tiene una sección en herradura, con un área de excavación de unos 110 m² y un área libre de 68 m² que se han ido excavando por el NATM, en fases de avance, destroza y contrabóveda.

La construcción de los túneles se fue adaptando a las necesidades impuestas por los altos valores de las convergencias que se iban detectando en las zonas ya ejecutadas,

intentando cerrarse la sección lo más rápidamente posible para así conferirle una mayor capacidad resistente.

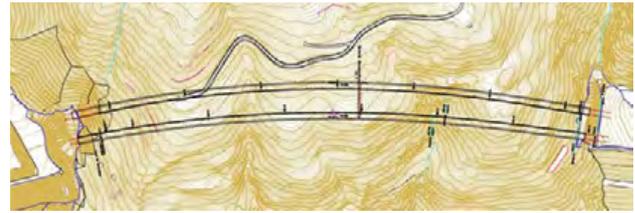


Figura 8. Planta general de los túneles.

Se registraron importantes deformaciones de la sección de los túneles, aumentando la curvatura del hombro lado mar y disminuyendo la del lado montaña. Estas distorsiones producen roturas en el hormigón del sostenimiento tanto por aplastamiento por compresión (incluyendo el pandeo de las cerchas) como por tracción con despegues.



Foto 21. Vista de la distorsión del túnel.

Para intentar paliar este problema se sustituye la contrabóveda de Proyecto por una contrabóveda reforzada (foto 22) y mejora de los apoyos de las cerchas de los hastiales mediante la ejecución de sendas zapatas armadas.



Foto 22. Ejecución de contrabóveda.

En el túnel lado montaña se realizaron una serie de drenes a 45° en la zona con mayores distorsiones. Estos drenes han evacuado un caudal importante de agua de forma mantenida.

La zona en la cual están ubicados estos túneles se caracteriza por una configuración lito-estructural especialmente compleja que dificulta el desarrollo general de las obras de construcción de la autovía.

La autovía A-7 transcurre en la zona objeto de estudio paralela a la costa y muy próxima a la misma. En esta zona, las pendientes de las laderas naturales son muy acusadas (20° - 35°) y el pie de las mismas, especialmente en la zona de los túneles, llega prácticamente con la misma pendiente hasta el nivel del mar.

En esta zona se observa la superposición en el espacio de un número relativamente elevado de mantos de cabalgamiento, alternándose en la vertical capas con diferentes grados de metamorfismo y distintas edades. Estos cabalgamientos se produjeron durante la orogenia alpina, a finales del Cretácico.

En la ladera donde están ubicados los túneles es común la alternancia de calcoesquistos, micaesquistos y filitas junto a la presencia de fallas de diversa entidad que los atraviesan.

Aunque pueden apreciarse plegamientos locales, la estructura general marca una orientación de las capas con dirección de buzamiento hacia los 180° (hacia el mar) y un buzamiento general variable entre 10° y 35° , con buzamientos locales de hasta 60° hacia el Sur.

Al tratarse de mantos de cabalgamiento muchas capas están desplazadas respecto a las que las rodean por lo que el ángulo de rozamiento de estas superficies es prácticamente residual.

Es muy común la existencia de movimientos de ladera tanto fósiles como activos. Al tratarse de un relieve muy joven, hablando en tiempos geológicos, la dinámica de laderas es muy activa hasta que alcance un perfil de equilibrio más estable y dadas las malas características geomecánicas de los materiales es muy común que estas pendientes se muevan de forma natural.

En la ladera donde están ubicados los túneles existen signos de varios movimientos de laderas de diferente entidad, algunos de ellos activos.

Para el estudio de la patología de estos túneles, se ha considerado desde el inicio de la actuación del CEDEX de gran importancia disponer de instrumentación que pudiera emplearse para comprobar si la distorsión del túnel se estaba produciendo por un empuje lateral muy severo o era debida a que el túnel se encontraba inmerso en un deslizamiento global de ladera.

Para el estudio de las diferentes patologías se dispusieron diferentes elementos de auscultación, esencialmente mediante control de movimientos.

En la figura 9 se representa la evolución de movimientos registrados en la ladera sobre el túnel. En el periodo de medidas se han registrado movimientos superiores a 1m.

Adicionalmente a las medidas de convergencia y control topográfico de movimientos se realizaron dos sondeos inclinométricos en la ladera aprovechando el camino existente en la montera de los túneles, y seis sondeos en el interior de los túneles (cuatro inclinométricos y dos piezométricos).

Los sondeos realizados en la ladera sobre el túnel tienen profundidades de unos 70-80m. En la figura 10 se representan los movimientos registrados en dirección hacia el mar en uno de estos inclinómetros. Se observa que el sondeo se ha quedado corto y las deformaciones progresivas (120mm en 2 años) alcanzan el extremo inferior del

sondeo (74m). Las medidas inclinométricas parecen indicar que la masa activa alcanza una profundidad superior a la del sondeo.

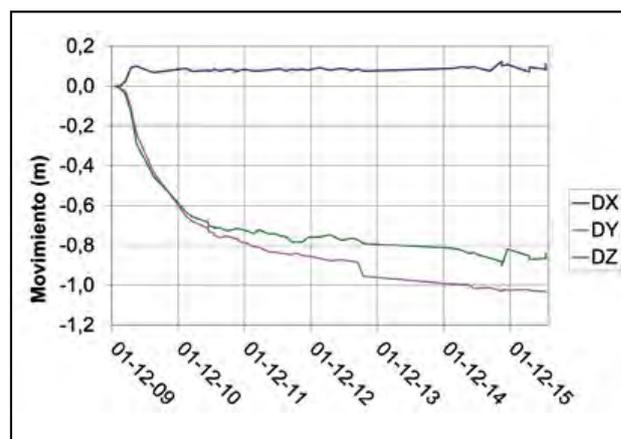


Figura 9. Evolución de movimientos en ladera sobre el túnel (Arqueta 3).

Los sondeos realizados en el interior del túnel alcanzan de 23 a 40m de profundidad bajo la solera. En estos sondeos se detectan bandas de cortante a varias profundidades. La información procedente de las medidas inclinométricas parece indicar que los sondeos no llegan a alcanzar el sustrato no afectado por las deformaciones (figura 11)). A partir de estos inclinómetros se registran velocidades de unos 2 cm/año (al no alcanzar terreno estable la velocidad real del movimiento será superior).

En la figura 12 se incluye un perfil de la ladera incluyendo la sección completa de los tubos. Se puede ver cómo la sección de excavación de los túneles es muy reducida en comparación con las dimensiones de la ladera por lo que su afección a la inestabilidad de ésta no puede ser significativa y la patología detectada parece estar asociada a un proceso de inestabilidad previo a la ejecución del túnel.

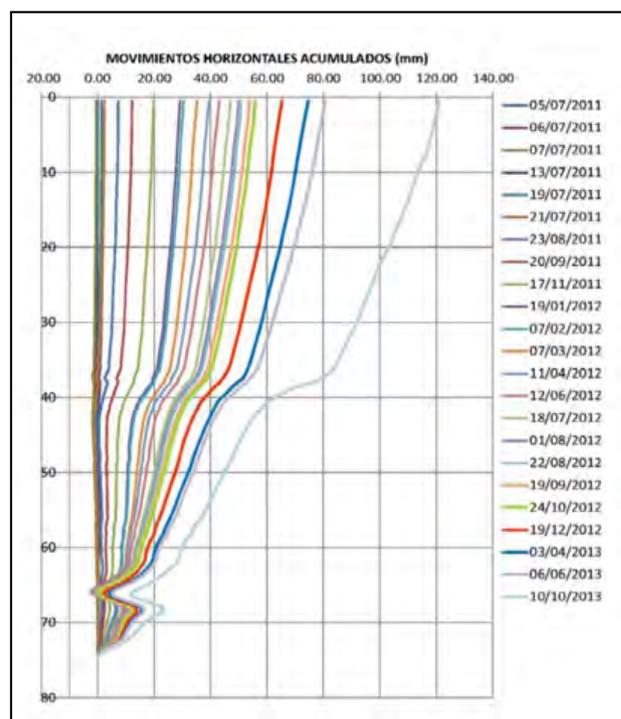


Figura 10. Inclinómetro ST-102 (75m).

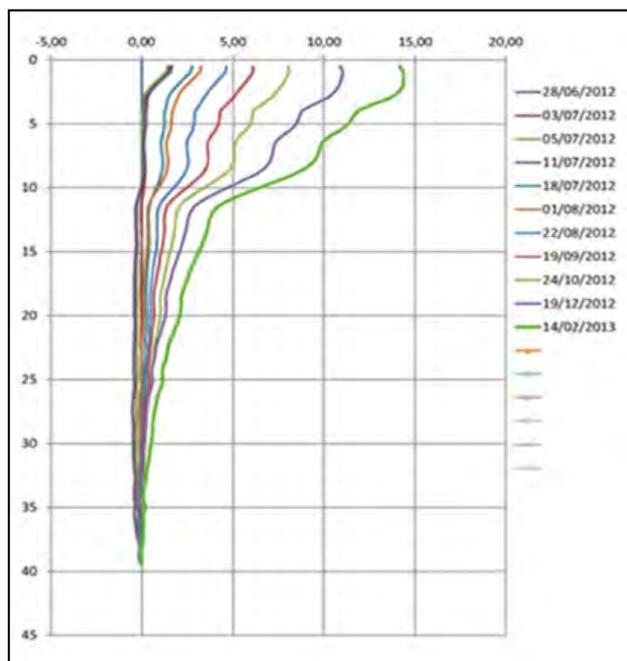


Figura 11. Inclinómetro ST-202 (40m) desde el interior del túnel.

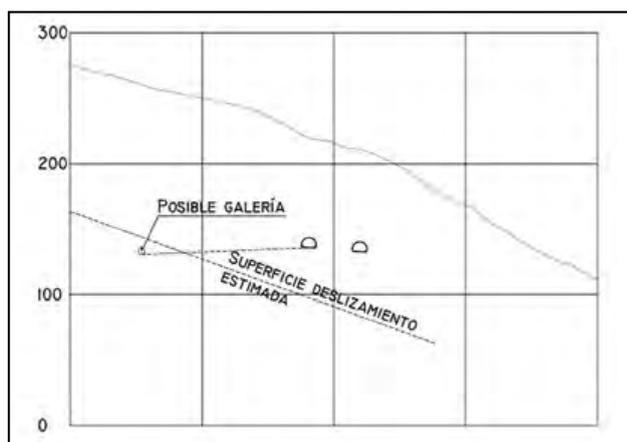


Figura 12. Perfil del terreno con situación de tubos y posible galería.

El túnel presenta movimientos que corresponderían a una situación en la que éste se encontrase inmerso en una ladera con una cinemática activa, con velocidades medias de 30 a 50mm/año (hasta 700mm) afectando a profundidades superiores a los 80-100m.

Se observan zonas en las que se marcan distorsiones habituales en movimientos de grandes masas, que no se comportan como un sólido rígido. Estas distorsiones originan daños en el revestimiento del túnel.

Dada la envergadura del movimiento es conveniente prever la posibilidad de que esta infraestructura tenga que convivir con los movimientos de la ladera. En este sentido se propusieron las siguientes medidas:

- Dimensionar la sección del túnel con suficiente rigidez como para limitar las distorsiones que pudieran afectar a su gálibo interno.
- Disponer juntas en las zonas en las que se detecten las mayores distorsiones longitudinales con el fin de evitar la rotura del revestimiento.
- Disponer un sistema de instrumentación que permita conocer los movimientos de la ladera en el entorno del túnel:

- Inclinómetros en la ladera y en el interior del túnel, dispuestos de forma que puedan medirse periódicamente. Según la información disponible estos inclinómetros deberían alcanzar al menos 50m bajo la solera del túnel.
- Control topográfico de movimientos absolutos de la base de los hastiales y medidas de convergencia.
- Control topográfico de la ladera en el entorno del túnel.
- Previsión de los medios necesarios para realizar campañas periódicas de medidas con posterioridad a la puesta en servicio de la autovía y mantener los dispositivos de instrumentación.

Las actuaciones orientadas a corregir la cinemática actual de la ladera estarían muy condicionadas por el gran volumen de material involucrado. Podrían plantearse las siguientes líneas de actuación de forma aislada o combinadas:

- Drenaje de la ladera. Los movimientos están muy condicionados por la presencia de agua en el terreno. Los periodos más importantes de lluvias son los que habitualmente generan un incremento significativo de estos movimientos. El macizo tiene una elevada permeabilidad por fracturación. Esto se ha comprobado por las importantes pérdidas de lechada durante las operaciones de sellado de los inclinómetros. La masa inestable alcanza profundidades importantes (80-100m) lo que hace inviable plantear un drenaje mediante pozos desde superficie. Podría plantearse la ejecución de una galería drenante dispuesta ladera arriba del túnel lado montaña, desde la que se ejecutarían coronas de drenes. Esta actuación se complementaría con la ejecución de nuevos drenes desde el túnel.
- Movimiento de tierras. Esta solución es la empleada habitualmente en deslizamientos importantes pero en el caso objeto de estudio, obligaría a realizar una muy importante excavación sobre el túnel en una ladera que en su estado actual se encuentra en equilibrio estricto lo que dificulta enormemente su ejecución.

En la actualidad se prevé optar por la primera alternativa citada realizando una galería longitudinal, paralela al túnel, a unos 100m ladera arriba de éste con una serie de galerías transversales comunicando con el túnel lado montaña. Para diseñar esta solución está en marcha la ejecución de una campaña adicional de sondeos en los que se realizarán ensayos de permeabilidad y quedarán equipados como inclinómetros y piezómetros.

3. ACTIVIDADES RELACIONADAS CON LA INFRAESTRUCTURA FERROVIARIA

En los últimos 10 años el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX ha desarrollado una serie de trabajos destinados al estudio de la infraestructura de las líneas de alta velocidad y al análisis de diferentes patologías entre los

que pueden destacarse los trabajos realizados en el marco de las Encomiendas de Gestión con ADIF (Administrador de Infraestructuras Ferroviarias), la revisión de la Ficha 719 de la UIC 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.

3.1. Cajón Ferroviario 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 7m 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 23. Cajón Ferroviario del CEDEX.



Foto 24. Cajón Ferroviario del CEDEX (detalle).

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

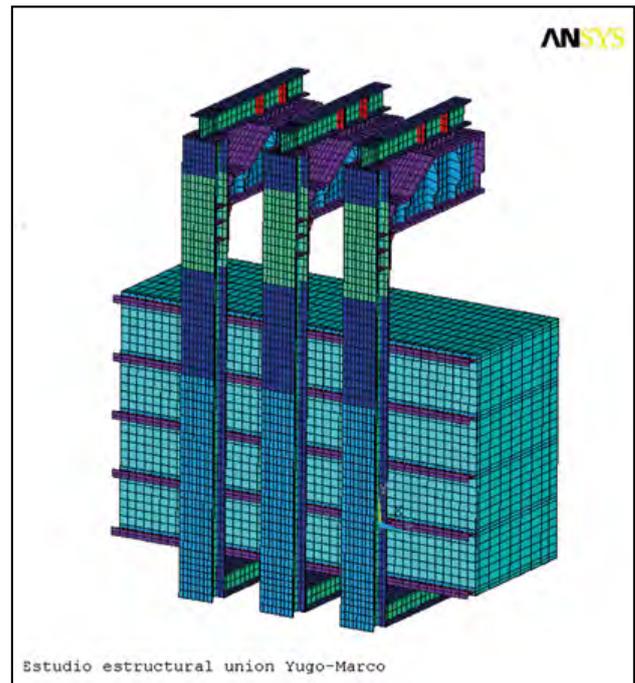


Figura 13. Modelización numérica del Cajón.

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 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).

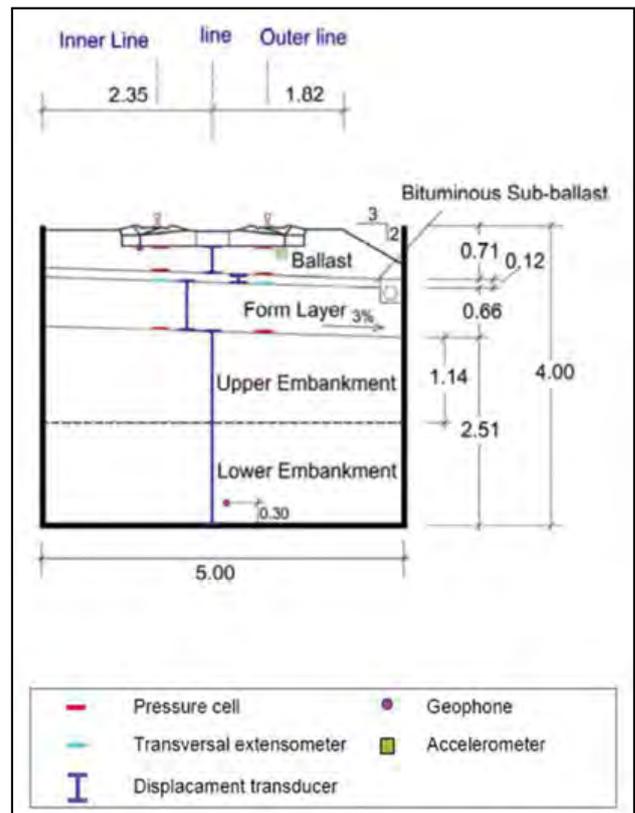


Figura 14. Ejemplo de sección instrumentada.

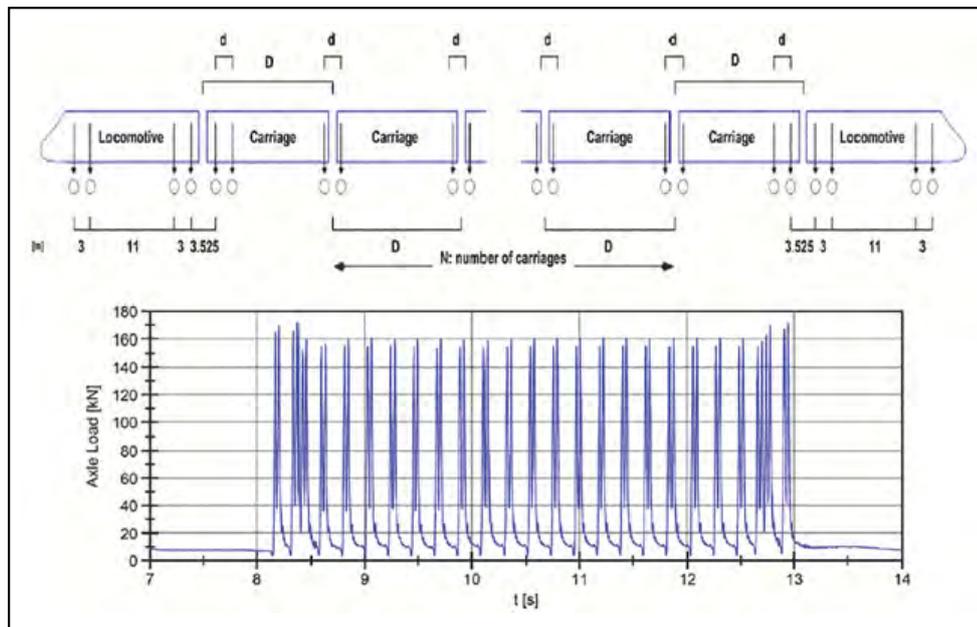


Figura 15. Ejemplo de distribución temporal de cargas al paso de un tren.

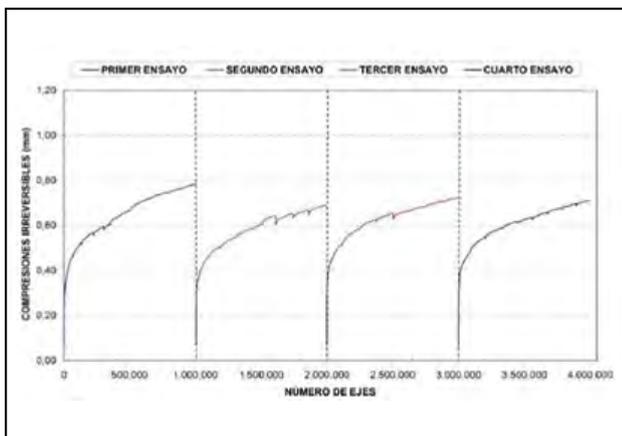


Figura 16. Asiento irreversible al paso de $4 \cdot 10^6$ ejes.

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. 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 el Cajón Ferroviario.
- Optimización del espesor de subbalasto bituminoso frente a circulaciones a alta velocidad. 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.
- Colaboración en el marco del proyecto FAS-TRACK: "Nuevo sistema de vía en placa para alta velocidad sostenible y respetuoso con el medio ambiente".
- Tráfico mixto en líneas de alta velocidad (2013).

- Estudio de la influencia de la contaminación del balasto con arena en la línea de alta velocidad Medina-La Meca.

3.2. 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 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 del Cajón Ferroviario 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 (foto 25).



Figura 17. Secciones de LAV instrumentadas por el CEDEX.

- Estudio y contraste del comportamiento de secciones con subbalasto granular y con subbalasto bituminoso.
- Estudio de secciones con espesores importantes de balasto (foto 26).
- 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 (figura 18).
- Análisis de diferentes técnicas para el control del grado de compactación del subbalasto granular.



Foto 26. Sección instrumentada con espesor importante de balasto.

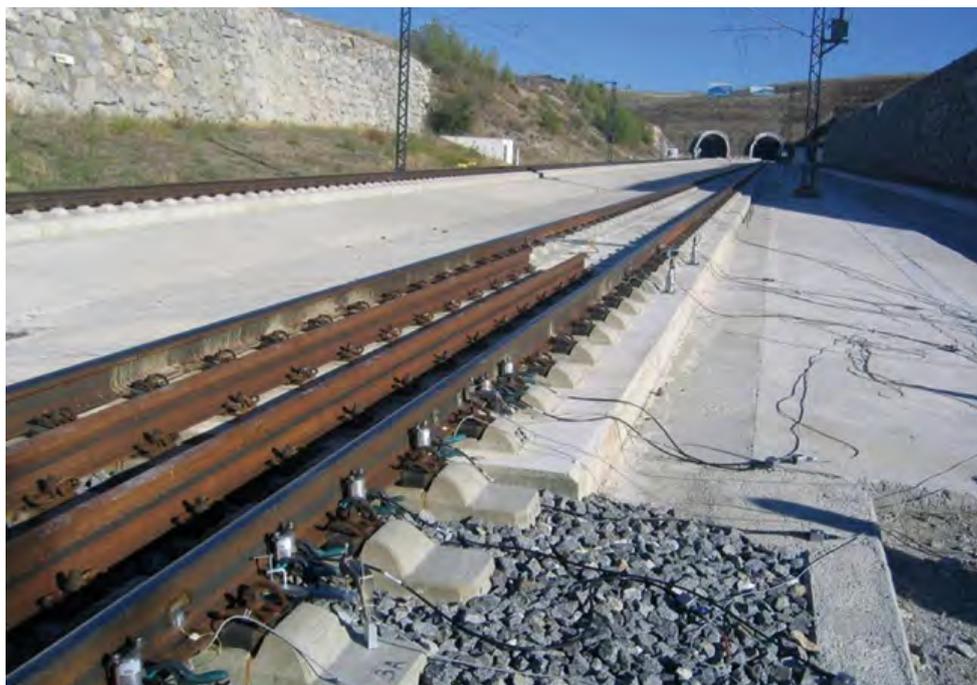


Foto 25. Instrumentación de transición vía en placa - vía sobre balasto.

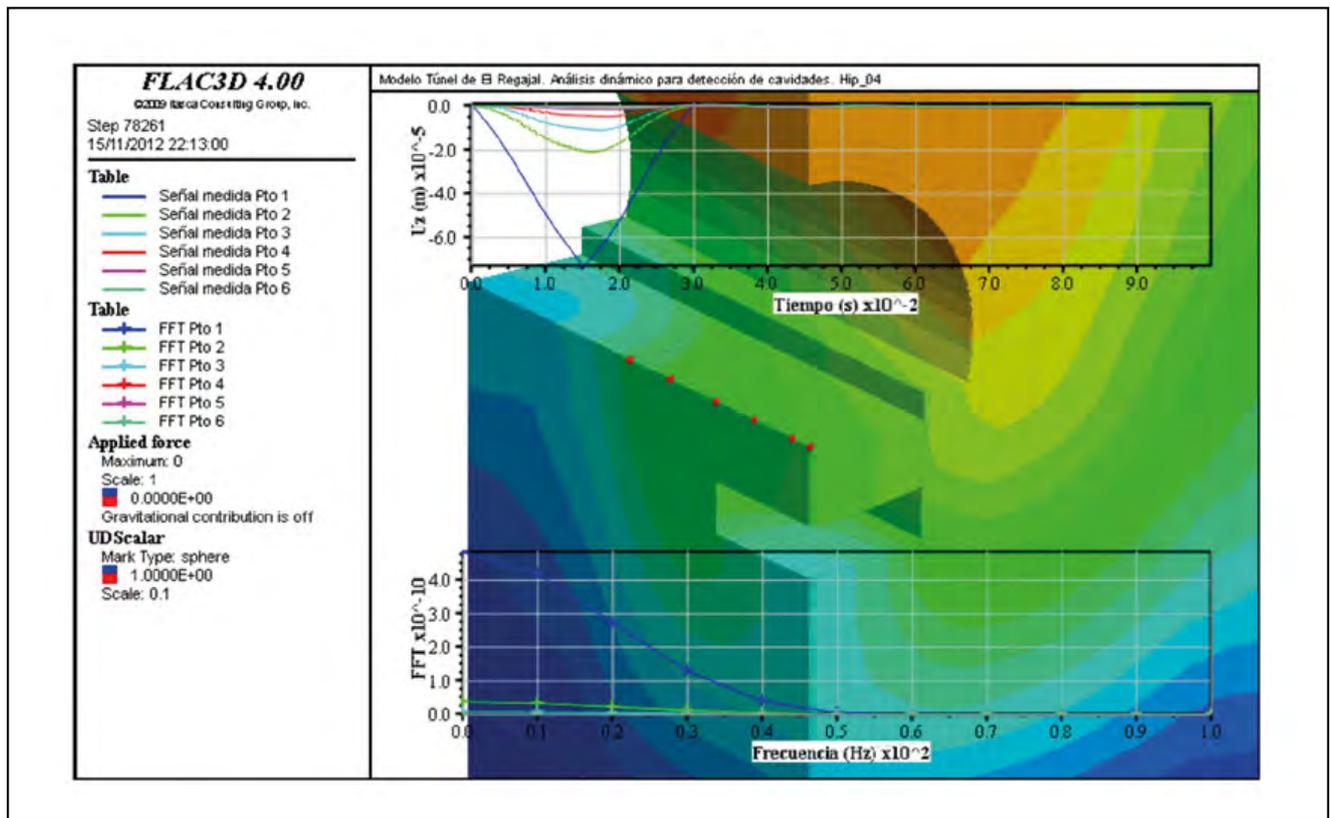


Figura 18. Análisis de la respuesta del túnel con una cavidad bajo la contrabóveda (FLAC3D).

En las siguientes fotos y figuras se presentan detalles de la instrumentación empleada en estos trabajos.



Foto 27. Disposición de células de carga bajo una traviesa.

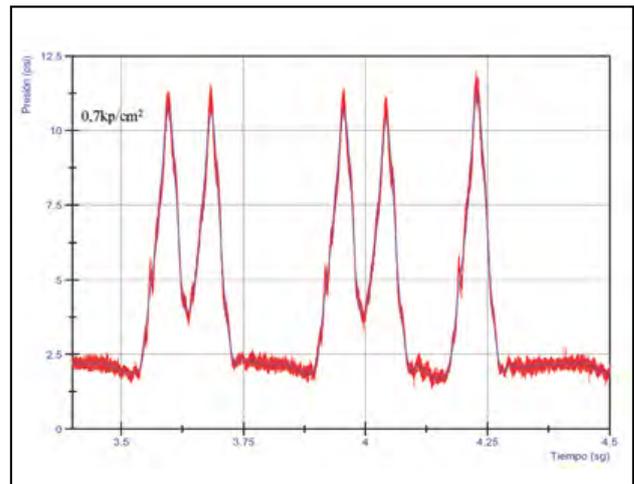


Figura 19. Detalle de medida de célula de presión (5 primeros ejes).

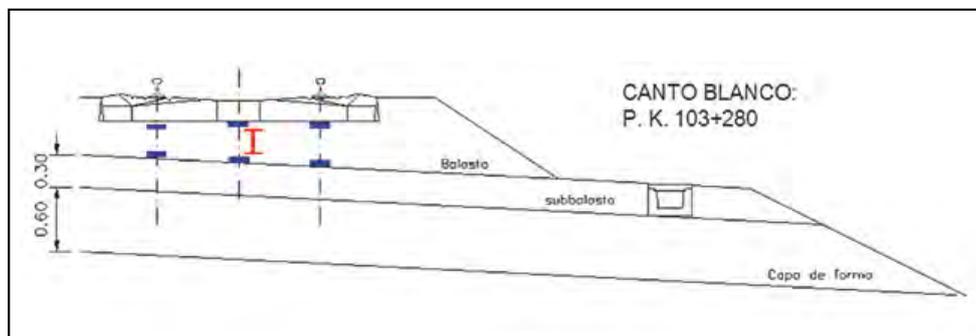


Figura 20. Instrumentación de la capa de balasto con células de carga y extensómetros (Cantoblanco).

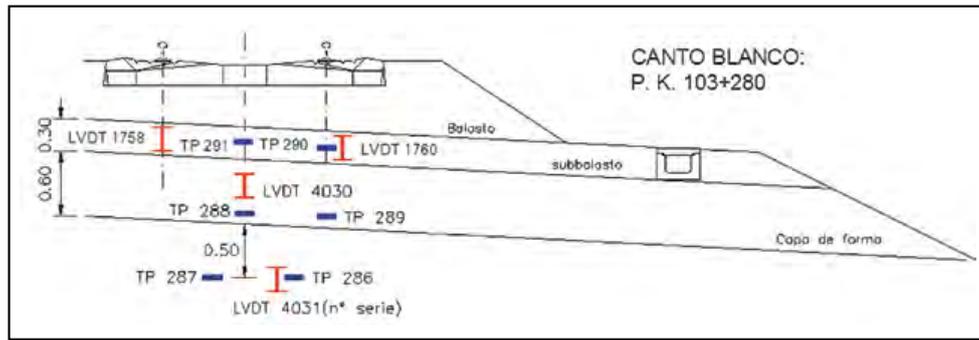


Figura 21. Instrumentación del subbalasto, la capa de forma y el terraplén con células de carga y extensómetros (Cantoblanco).

En la foto 28 se presenta un ejemplo de instrumentación de superficie y en las figuras y fotos siguientes se recoge con mayor detalle cada uno de los sensores.



Foto 28. Instrumentación de superficie.



Foto 30. Medida de deflexiones en traviesa (geófono izquierdo) y carril (geófono central y láser).



Foto 29. Bandas extensométricas en puente completo para la medida de cargas y reacciones sobre traviesas.



Foto 31. Potenciómetro para medida de movimiento relativo traviesa - carril.

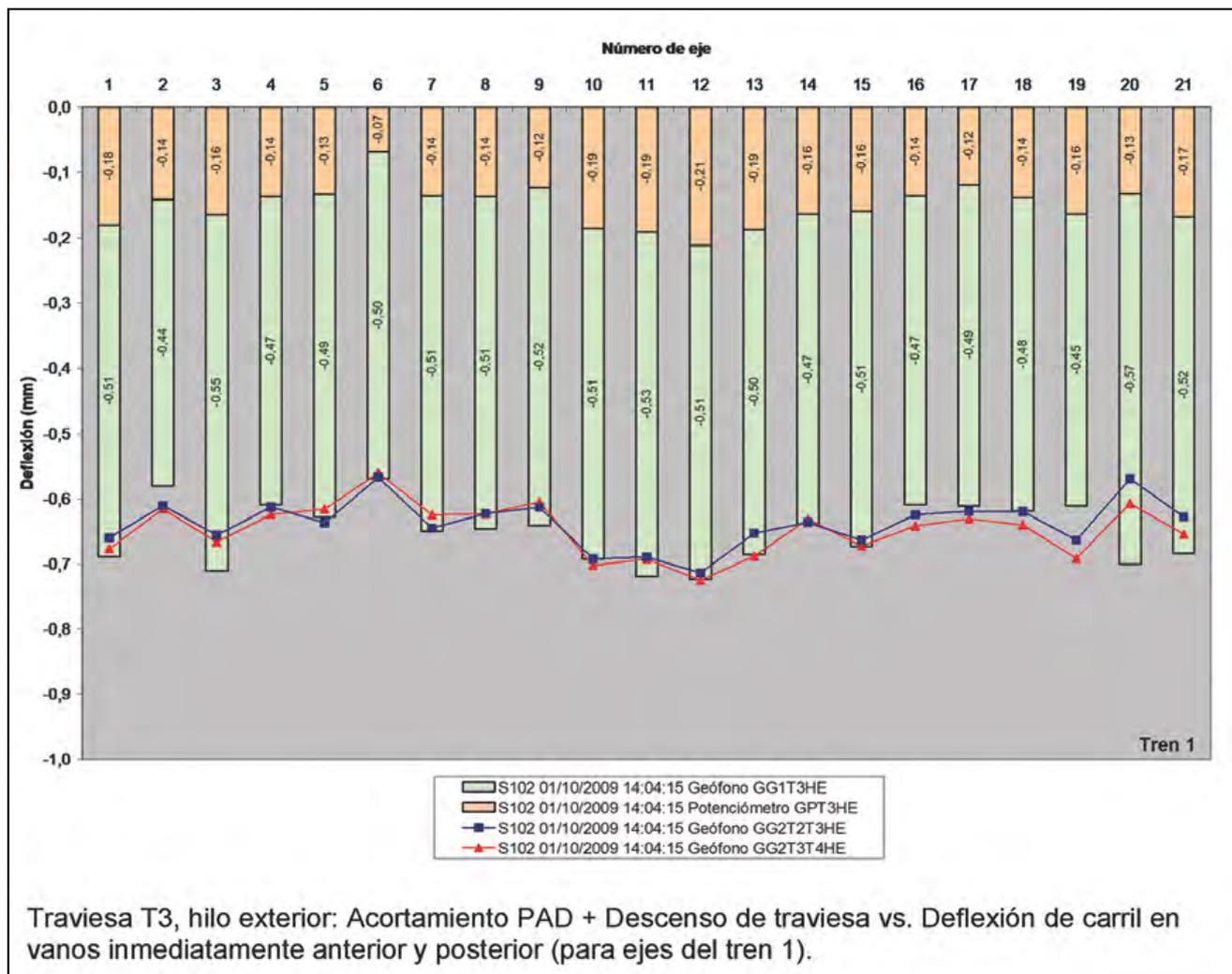


Figura 22. Instrumentación del subbalasto, la capa de forma y el terraplén con células de carga y extensómetros (Cantoblanco).

4. 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 las obras lineales.

Se incluyen inicialmente, de forma muy resumida, una serie de ejemplos de la colaboración con la Dirección General de Carreteras en el estudio de patologías surgidas en la red de carreteras de su competencia. Esta puede considerarse una actividad tradicional del Laboratorio de Geotecnia.

Posteriormente se recogen las líneas de actuación relacionadas con la infraestructura ferroviaria. Es una actividad relativamente nueva que ha surgido de la relación con ADIF y que ha requerido un importante esfuerzo profesional.

5. BIBLIOGRAFÍA

Barzilai, A. (2000). *Improving a Geophone to Produce an Affordable Broadband Seismometer*. PhD-Thesis, Stanford University (EE UU).

Brincker, R., Lago, T., Andersen, P., y Ventura, C. (2005). Improving the Classical Geophone Sensor Element by Digital Correction. *Conference Proceedings: IMAC-XXIII Conference & Exposition on Structural Dynamics, Orlando (EE UU)*.

Coulier, P., Cuéllar, V., Degrande, G., y Lombaert, G. (2015). Experimental and numerical evaluation of the effectiveness of a

stiff wave barrier in the soil. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 77, pp. 238-253.

Crespo Chacón, I., García de la Oliva, J.L., y Santiago Recuerda, E. (2016). On the Use of Geophones in the Low-Frequency Regime to Study Rail Vibrations. *Proceedings of the 3rd Internacional Conference on Transportation Geotechnics, Guimarães (Portugal)*.

Ebersöhn, W., y Selig, E.T. (1994). Track Modulus Measurements on a Heavy Haul Line. *Transportation Research Record*, nº 1470. Washington DC: Transportation Research Board.

Esveld, C. (2001). *Modern Railway Track* (2nd edition). Delft: MRT-Productions.

Fröhling, R.D. (1997). *Deterioration of Railway Track Due to Dynamic Vehicle Loading and Spatially Varying Track Stiffness*. PhD-Thesis, University of Pretoria (Sudáfrica).

García de la Oliva, J.L., y 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., y Santiago Recuerda, E. (2013b). *Análisis e interpretación de los datos de las campañas de medidas de Valdecastillas (Valladolid) pertenecientes a la ficha 2.1. "Seguimiento de las secciones de vía instrumentadas"*. Documento interno.

García de la Oliva, J.L., y 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., y 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.

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 (UPM).

Moreno Robles, J., y García de la Oliva, J.L. (2012). Determinación de las cargas aplicadas al carril mediante bandas extensométricas. *Ingeniería Civil*, n° 165, pp. 123-129.

Moreno Robles, J., Crespo Chacón, I., y 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., y 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., y Selig, E.T. (2001). Fundamental Nonlinear Track Load-Deflection Behavior for Condition Evaluation. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 1742(1): pp. 61-67.

Tijera, A., Ruiz, R., Cuéllar, V., y Rodríguez, M. (2012). Variaciones de rigidez de vía en zonas de transición. *Ingeniería Civil*, n° 165, pp. 103-112.

UIC (2006). *Earthworks and Track Bed for Railway Lines*. Code 719R (3rd edition). París: International Union of Railways.

CURSOS GRATUITOS PARA EL SECTOR DE INGENIERÍA Y CONSULTORÍA DEL MINISTERIO DE EMPLEO Y SEGURIDAD SOCIAL



El uso creciente de robots y sus efectos en el empleo, son una característica prominente de la transformación digital de los procesos productivos.

El Ministerio de Empleo y Seguridad Social pone en marcha acciones formativas dirigidas prioritariamente a trabajadores ocupados para mejorar su competitividad y cumplir con las aspiraciones de promoción profesional y desarrollo personal. Aquellos trabajadores que realicen estos cursos podrán mejorar sus competencias y habilidades para el desempeño de su profesión o para su paso a otros sectores emergentes en los que se crea empleo.

Enclave Formación es la entidad que imparte los cursos del sector ingeniería y consultoría de forma online y totalmente gratuitos.

Es un programa de formación subvencionado por el Servicio Público de Empleo Estatal y no tiene ningún coste para los participantes.

Algunos de los cursos con plazas disponibles:

Arcgis (Sistemas de información geográfica)

Te enseña a analizar y procesar la información espacial con la aplicación ARCGIS.

Autodesk Architectural Desktop

Con la herramienta Autodesk Architectural Desktop se realiza el diseño arquitectónico en construcción y edición de elementos constructivos en un entorno 3D integrado.

Cambio climático y huella de carbono

Dotar del conocimiento suficiente para calcular la huella de carbono y analizar posibles acciones de reducción de emisiones, oportunidades de ahorro en costes tomando medidas de eficiencia energética y beneficios.

Instalaciones de energía eólica

Conocer los fundamentos aerodinámicos y los distintos tipos de aerogeneradores tanto para su mantenimiento como para su puesta en funcionamiento.

Flowmaster para el diseño y cálculo de redes de tuberías, canales y drenajes

A través del programa Flowmaster se puede dimensionar y comprobar las tuberías, canales, vertederos, orificios, rejillas, bordillos, zanjas y otros accesorios empleados en la ingeniería hidráulica.

Diseño y montaje de instalaciones fotovoltaicas y térmicas

Aplicar el conocimiento en el desarrollo de la energía solar, así como diseñar y dimensionar instalaciones fotovoltaicas y térmicas.

Sistema de I+D+i y gestión de la innovación

Adquirir los conocimientos en relación a la situación actual del Sistema de Ciencia y Tecnología en España y de la inversión en I+D+i.

Diseño de pruebas de software

Diseñar las pruebas que se realizan a las aplicaciones informáticas.

La fibra óptica

Adquirir los conocimientos sobre los conceptos básicos de la fibra óptica.

Centralitas y terminales telefónicos

Configurar los equipos y sistemas de telecomunicaciones en relación al teléfono.

Autocad 3D

Ser capaz de crear y modificar piezas del programa de dibujo informático Autocad en 3D.

Para más información:

Teléfono gratuito 900 878 824

Mail: [cursos@enclaveformación.com](mailto: cursos@enclaveformación.com)

Para ver el listado completo de todos los cursos e inscribirte accede a la página web:
<https://www.enclaveformacion.com/programa-gratuito-de-formacion-estatal>