

# Rehabilitación de los túneles de Niévares (Asturias) por las patologías derivadas del depósito de sales carbonatadas en su sistema de drenaje



**César Fernández-Nespral Pérez**

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Demarcación de Carreteras del Estado en Asturias



**Carlos S. Oteo Mazo**

Doctor ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Catedrático de Ingeniería del Terreno



**Pedro R. Sola Casado**

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Ingeniería de Infraestructuras y Túneles

## Resumen

Se describen los trabajos de reparación llevados a cabo por la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento en los dos túneles de Niévares, de dos carriles cada uno, dentro de la Autovía del Cantábrico, cerca de Gijón (Asturias). En ambos túneles se presentaron diversas patologías, debidas a la presencia de materiales carbonáticos, cuya disolución y arrastre llevó a colmatar los drenajes y originar empujes adicionales sobre el revestimiento (diez años después de la entrada en servicio), tanto en hastiales como en solera. En este trabajo se describen las anomalías detectadas y las actuaciones ejecutadas tanto de refuerzo y drenaje del revestimiento, como de mejora del sistema de evacuación del agua captada, iniciando el estudio del efecto mitigador del ácido poliaspártico en los depósitos calcáreos. Toda la actuación se ha realizado cerrando al tráfico, alternativamente, cada túnel.

## Palabras clave

Reparación de túneles, tratamientos del terreno, instrumentación de túneles, reconocimiento con georadar 3D, sistemas de drenaje, depósitos de sales carbonatadas, sustancias mitigadoras de la precipitación calcárea

## Abstract

*The article describes the repair works undertaken by the Spanish Highway Department of the Ministry of Development at the two dual-lane Niévares tunnels on the Cantabria Motorway, close to Gijon (Asturias). Both tunnels revealed a series of problems due to the presence of carbonate materials, and where the dissolution and run-off of the same led to blockages in the drainage and the production of additional stress on the tunnel lining (ten years after the tunnels had come into operation), both in the side walls and on the tunnel floor. This article describes the anomalies detected and the work carried out to strengthen and drain the lining and to improve the system for the removal of collected water, as well as the initiation of a study into the mitigating effect of polyaspartic acid in the limestone deposits. These works have all been carried out by alternately closing each tunnel off to traffic.*

## Keywords

*Tunnel repair, Soil treatment, Tunnel Instruments, 3D Georadar survey, Drainage systems, Carbonate salt deposits, Mitigating substances of calcareous precipitation*

## 1. Introducción

El tramo Gijón-Villaviciosa de la Autovía del Cantábrico (A8), inaugurado en febrero de 2004 por el Ministerio de Fomento, discurre entre las localidades de Infanzón (Gijón) y Grases (Villaviciosa). Dentro del tramo, destaca el túnel de Niévares con una longitud de 2.373 m, constituido por dos tubos, con dos carriles de circulación cada uno y arceños interiores y exteriores. Estos tubos, disponen de una sección pseudo circular de 100 m<sup>2</sup>, con un vano horizontal de 12 m y una altura de 8,30 m; ambos se exca-

varon en formaciones calcáreas con abundantes síntomas de karstificación.

Desde poco después de su entrada en servicio, se viene produciendo el depósito de sales carbonatadas en su sistema de drenaje, en el intradós de su revestimiento, e incluso en puntos del pavimento de sus calzadas, que al acumularse han llegado a obstruir los colectores, provocando su entrada en carga, así como sobrepresiones de agua tanto sobre el revestimiento, como sobre el propio firme. También existían

implicaciones negativas, para la propia funcionalidad del túnel; esto es, afecciones a la seguridad del tráfico, como pueden ser las deformaciones verticales y filtraciones por las fisuras en el firme, provocadas por las subpresiones hidráulicas, y la disminución del Coeficiente de Rozamiento Transversal (CRT), debido a la pátina de sales carbonatadas sobre algunas áreas del pavimento.

Ante estos síntomas y anomalías, la Demarcación de Carreteras del Estado en Asturias decidió solicitar la declaración de Obras de Emergencia, a fin de cortar la evolución creciente de estos procesos, y mejorar la situación mecánica del revestimiento y solera, así como la funcional del sistema de drenaje y el pavimento de la calzada. En mayo de 2013, se adjudicó a Geotecnia y Cimientos S. A. (GEOCISA) la realización de los trabajos tanto de mejora del drenaje, como de refuerzo estructural de ambos túneles.

## 2. Objetivos y metodología de las actuaciones

El conjunto de los trabajos ha tenido un alcance y desarrollo por fases, dirigido a lograr los siguientes objetivos:

a) Conocer y evaluar el estado y situación, tanto del revestimiento y la calzada de los túneles, como de su sistema de drenaje, obteniendo como resultado una tramificación longitudinal de los mismos, en función de la situación e intensidad de las patologías y anomalías existentes.

b) Identificar y caracterizar los procesos causantes de ese mal comportamiento, analizando su origen y estableciendo los principales agentes o factores que intervienen en los mismos.

c) Seleccionar las acciones y medidas más viables y eficaces, en lo técnico y económico, a fin de detener, e impedir si es posible, el desarrollo de esos procesos negativos para los túneles, eliminando sus consecuencias indeseables y revertiendo hasta cierto grado, las anomalías y patologías existentes.

d) Comprobar la importancia relativa de los posibles agentes desestabilizadores, así como la eficacia de las posibles acciones de mejora y refuerzo, mediante el análisis del comportamiento del revestimiento y solera con un modelo numérico de elementos finitos.

e) A lo largo de ambos túneles restaurar el sistema de drenaje para evitar la subpresión hidráulica sobre hastiales y sobre todo, en la solera y firme de la calzada.

f) En las zonas más afectadas por los sobreempujes, reforzar la resistencia y rigidez horizontal del revestimiento y la solera, a fin de mejorar su comportamiento frente a posibles subpresiones hidráulicas en el futuro.

g) Elaborar, de cara al futuro, un procedimiento de conservación y mantenimiento del sistema de drenaje, en el que además de las labores de limpieza de los drenes de captación y los colectores de desagüe, se incorpore la evolución de los parámetros físico-químicos del agua drenada, junto con el efecto reductor de la precipitación de sales carbonatadas, producido por el empleo de una sustancia inhibidora, colocada en algunas de las nuevas arquetas de los colectores de ambos tubos.

h) Y finalmente, llevar a cabo un periodo de seguimiento, con duración representativa y cercana, al menos, a un ciclo anual hidrológico, a fin de comprobar los resultados de las actuaciones de mejora realizadas, así como de disponer de suficientes medidas de los caudales y parámetros físico-químicos del agua drenada, para tomarlos como referencia, frente a los que se obtengan posteriormente, durante las tareas normales de la conservación y mantenimiento futuros de los túneles.

Dentro de la fase de actuaciones iniciales, la información de partida disponible (agrupada por la empresa que tenía a su cargo el mantenimiento del túnel) se ha aumentado y completado con una exploración geofísica, por medio de perfiles continuos longitudinales y transversales con la técnica de GEORADAR, a fin de evaluar el estado, y situación de posible deterioro, de las partes más afectadas del revestimiento y la calzada.

Una vez analizados los resultados del GEORADAR, y con objeto de “calibrar” y comprobar los mismos, se han efectuado perforaciones con recuperación de testigo, en la zona más dañada de la calzada del Tubo 1 (Gijón-Villaviciosa), para conocer con detalle el estado del firme y la solera de hormigón, así como la profundidad de la fisura longitudinal existente.

Asimismo, el comportamiento del revestimiento durante toda la duración de los trabajos se ha auscultado desde el inicio, tanto con la medida de convergencias, aumentando las secciones de medida ya existentes, como con el seguimiento de la apertura de las fisuras existentes más representativas.

Los resultados de la exploración con GEORADAR, y de esta última auscultación, unidos a la inspección visual del intradós del revestimiento y calzada, teniendo en cuenta la situación, frecuencia y magnitud de los daños, así como la cuantía y

grado de las infiltraciones y humedades superficiales en hastiales y calzada, han permitido realizar una tramificación longitudinal de ambos tubos, estableciendo los tramos en que se necesitaba la mejora en la captación del agua subterránea en el trasdós de hastiales y solera, y el refuerzo de la rigidez transversal del revestimiento y solera.

Por otra parte, los caudales, presiones y las características físico-químicas del agua infiltrada se han conocido, o tratado de medir, instalando caudalímetros en la salida de los colectores de ambos tubos, y manómetros en la boca de los drenes con mayor infiltración, así como tomando muestras del agua y de los depósitos salinos presentes en diversos lugares de los colectores.

Tras confirmar los análisis de laboratorio, el contenido, casi exclusivo, de sales carbonatadas en la composición de los depósitos y concreciones, se ha realizado un estudio específico de la experiencia existente en el uso de sustancias inhibitorias de la precipitación de este tipo de sales. De acuerdo con la experiencia internacional existente especialmente en Alemania, se ha elegido sal de ácido poliaspártico para realizar dicha prueba.

Dado que el proyecto del revestimiento considera drenado su trasdós, las filtraciones y humedades en las zonas más afectadas de ambos túneles, han llevado a considerar las presiones del agua freática, y los sobreempujes por alteración de los niveles margo-arcillosos del terreno envolvente, como las dos acciones principales causantes de las anomalías y daños.

Con estas premisas las actuaciones de mejora necesarias y más apropiadas, han sido las tendientes a lograr una situación drenada del trasdós de los hastiales, en todos los tramos con infiltración significativa, y además, en las partes con daños en hastiales y calzada, las que producen un aumento de la resistencia y rigidez transversal del revestimiento y solera.

El análisis de comportamiento, considerando esas acciones desestabilizadoras y las posibles mejoras, se ha realizado por medio de un modelo numérico, de elementos finitos con el código Plaxis-2D.

Se ha comenzado con un análisis retrospectivo de las fases seguidas durante la construcción, y se ha finalizado concluyendo, que la principal acción que explica la cuantía de las convergencias después de ella y los daños en hastiales y calzada, ha sido la subpresión del agua freática en el terreno envolvente.

Asimismo, según los resultados del modelo, el rebajamiento de estas últimas, como consecuencia del funcionamiento correcto de la captación y desagüe del sistema de drenaje, debe dar lugar a una estabilización inmediata de las convergencias, y un aumento de la seguridad estructural del revestimiento y solera, además de eliminar casi en su totalidad, las infiltraciones y las humedades superficiales en hastiales y calzada.

Adicionalmente, el refuerzo con bulones subhorizontales de los hastiales alivia los esfuerzos de flexión y cortante en el revestimiento y solera, mientras que los bulones verticales de arriostramiento de la solera, son eficaces principalmente en caso de mal funcionamiento del sistema de drenaje, y con la nueva aparición de subpresiones del agua freática en el trasdós.

Con esas conclusiones, las principales actuaciones de mejora en el sistema de drenaje han comprendido el refuerzo de la captación, mediante drenes californianos en los tramos de ambos tubos con manifestaciones significativas de existencia de agua en el trasdós, junto con la ejecución de nuevas arquetas en los colectores de evacuación, de modo que la separación entre ellas sea suficientemente pequeña para permitir la limpieza de mantenimiento de los conductos.

Además, en las zonas donde las deformaciones y daños del revestimiento han sido de mayor entidad, se ha aumentado la rigidez y resistencia de los hastiales arriostrándolos transversalmente con bulones activos.

Finalmente de cara a lograr el buen funcionamiento del sistema de drenaje, de modo seguro y normalizado, se ha realizado un estudio analizando los factores físico-químicos, que intervienen en la formación de depósitos carbonatados, y el efecto inhibitorio sobre ellos del ácido poliaspártico dispuesto en algunas de las nuevas arquetas de los colectores, que ha permitido definir un nuevo procedimiento, para mantenimiento y conservación del sistema de drenaje, estableciendo, tanto las tareas de inspección y limpieza a realizar, como la frecuencia de las mismas.

### **3. Información de partida**

#### *3.1. Geotecnia y secciones tipo del túnel*

Los túneles ubicados entre los PKs 362+910 y 365+283, atraviesan las series carbonatadas del Jurásico inferior, que está caracterizado por una alternancia de calizas, dolomías y margas. Las características principales de dichos materiales se exponen a continuación:

- Calizas:
  - Aspecto ‘tableado’ y juntas rellenas de arcilla
  - Fuerte meteorización
  - Gran variación del RQD
  - Fenómenos de karstificación, frecuentes cavidades rellenas de arcillas de descalcificación
  - Contenido  $\text{CaCO}_3 = 50 \%$
  - RCS entre 142 y 800  $\text{kg/cm}^2$
  - Grado de meteorización entre II y V en la clasificación ISRM (VI es la máxima meteorización)
- Arcilla de decalcificación:
  - Arcillas de plasticidad media, con LL del 50 % y un IP del 28 %
  - Índice de Hinchamiento (E. Lambe) = 0,702  $\text{kg/cm}^2$  y CPV 5,9 % (material crítico)
- Margas arcillosas:
  - Por el contenido en carbonato, que es inferior al 15 %, predominan las arcillas margosas sobre las margas arcillosas, lo que va a ser determinante en su comportamiento

- Contenido  $\text{CaCO}_3 < 15 \%$  = arcilla margosa
- RCS entre 1,35 y 17,28  $\text{kg/cm}^2$
- GM entre III y V en la clasificación ISRM
- Índice de Hinchamiento (E. Lambe) entre 0,026 y 0,052  $\text{kg/cm}^2$  = No crítico

Construidos con la técnica del Nuevo Método Austriaco (NATM), se utilizaron un total de nueve tipos de secciones de sostenimiento, dado el seguimiento de detalle que se hizo durante la obra y los problemas acaecidos. Dichas secciones se exponen en la Tabla 2 adjunta, y su mayor número, respecto a las seis del proyecto, da idea de las dificultades encontradas durante la excavación.

Durante la excavación se encontraron signos evidentes de karstificación (cuevas, litoclasas con signos de lavado y alteración química, etc.). Además fue necesario utilizar, en algunas zonas, solera provisional en el avance, dados los movimientos horizontales de los hastiales, provocados, generalmente, por la existencia de tensiones horizontales naturales; en esas zonas se dispuso, al ejecutar el revestimiento, una contrabóveda de hormigón, en una longitud aproximada

SECCIÓN TIPO	APLICACIÓN	RMR	ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS					
			LONG. PASE	HORMIG. PROYECTADO	ARMADURA	BULONES (Longitud=4m)	CERCHAS	CONTRAB OBEDA
S1	Caliza masiva. Calidad aceptable a buena.	> 60	4 m	5 cm	-	2 x 2 m		
S2	Caliza masiva. Calidad aceptable.	45-80	3-4 m	10 cm	Fibras de acero.	1,5 x 1,5 m		
S3	Calizas y dolomías de calidad y fracturación media.	30-45	2-3 m	20 cm	Mallazo 2 capas.	1,5 x 1,5 m		
S4	Margas sanas. Zonas Kársticas o muy fracturadas.	20-30	1,5 m	24 cm	Mallazo 2 capas.	1,5 x 1 m	TH-29 1,5 m	
S5	Zonas fracturadas en calizas. Margas alteradas.		1 m	24 cm	Mallazo 2 capas.	1,5 x 1 m + 1 en pie de cercha (avance)	TH-29 1 m	S 5A: (SI) S 5B: (NO)
S6	Zonas de Emboquilles.		1,1 m	30 cm (bombeado)	-	1 bulón L=6 m, en pie de cercha (avance)	HEB-180 1 m	S 6A: (SI) S 6B: (NO)
S7	Zona de margas alteradas.		1,1 m	30 cm (bombeado)	-			SI
S8	Margas sanas. Zonas Kársticas o muy fracturadas.	20-30	1,5 m	29 cm	Mallazo 2 capas.	1 bulón L=6 m, en pie de cercha (avance)	TH-29 1,5 m	
S9	Paso de fallas en calizas. Margas ligeramente alteradas.		1,5 m	29 cm	Mallazo 2 capas.	1 bulón L=6 m, en pie de cercha (avance)	TH-29 1 m	S 9A: (SI) S 9B: (NO)

Tabla 2. Tipos de sostenimiento utilizados durante la excavación

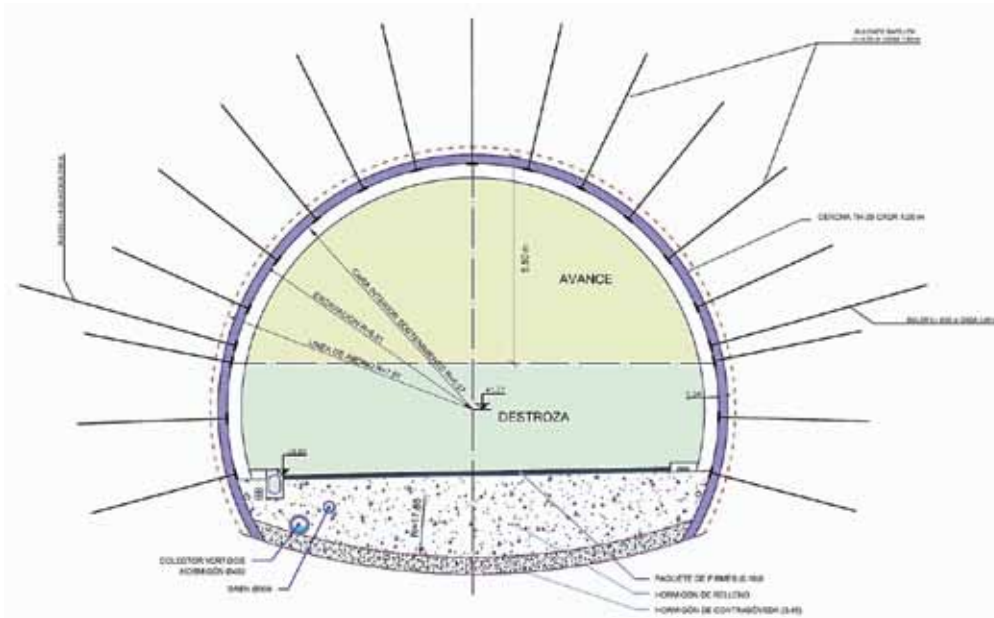


Fig. 1. Sección tipo con contrabóveda

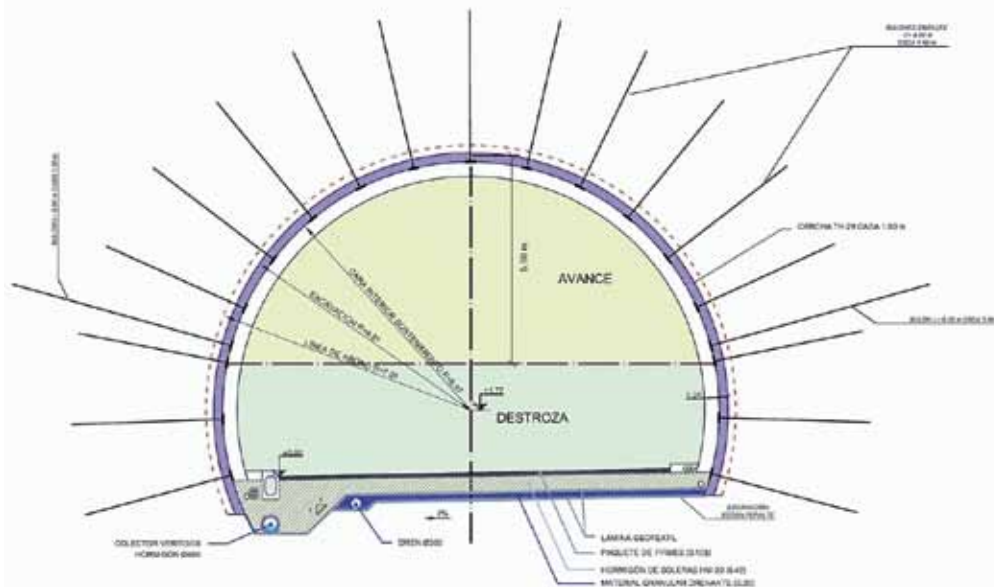


Fig. 2. Sección tipo con solera

del 15-20% del túnel (Fig. 1). En el resto se dispuso solera plana de hormigón en masa, sobre una capa drenante de 20 cm de espesor (Fig. 2).

### 3.2. Sistema de drenaje y sus modificaciones

El proyecto incluía un drenaje por gravedad, favorecido por la pendiente topográfica continua (sin punto bajo), que consta de dos colectores principales (figuras 1 y 2): a) Colector de vertidos, situado en el hastial izquierdo, con un caz de

recogida a nivel de firme; dispone de pequeñas arquetas de registro con cierre hidráulico, y b) colector de filtraciones para recoger las aguas procedentes de los drenes colectores y de la manta drenante; no dispone de arquetas de registro situadas en puntos intermedios.

Al poco tiempo de la entrada en servicio, se apreció existencia de obstrucciones importantes de carbonato cálcico en los tubos que conformaban el sistema de evacuación de



Fig. 3. Obstrucción en las canalizaciones del túnel

las aguas (Fig. 3). Debido a la ausencia de arquetas intermedias en el colector de filtraciones, se tuvo que conectar este último (ya anulado en diversos puntos por la citada acumulación mineral) al colector de vertidos, para lograr la evacuación de todas las aguas existentes, y así mantener la seguridad en el tráfico rodado (Fig. 4).

### 3.3. Patologías existentes

La deposición y acumulación de carbonato cálcico ha provocado la formación de barreras sólidas, a veces de magnitud considerable, las cuales impiden el correcto funcionamiento de los sistemas de drenaje, tanto de los drenes colectores y del colector de filtraciones, como del colector de vertidos, conectado a este último. Además se han detectado diversos movimientos y deformaciones en el revestimiento y daños (fisuras) en hastiales y calzada.

La carbonatación no solo ha taponado, en parte, el tubo-dren bajo solera sino que ha disminuido fuertemente la permeabilidad de la grava que se dispuso bajo ella para captar el agua y ser evacuada por el dren. Posiblemente debido a la pérdida o disminución de la capacidad drenante del túnel, se ha producido un aumento de la subpresión actuante sobre el inicio de los hastiales y la solera del revestimiento.

A finales del año 2012, por parte de la empresa de conservación, se procedió a la medida de convergencias en

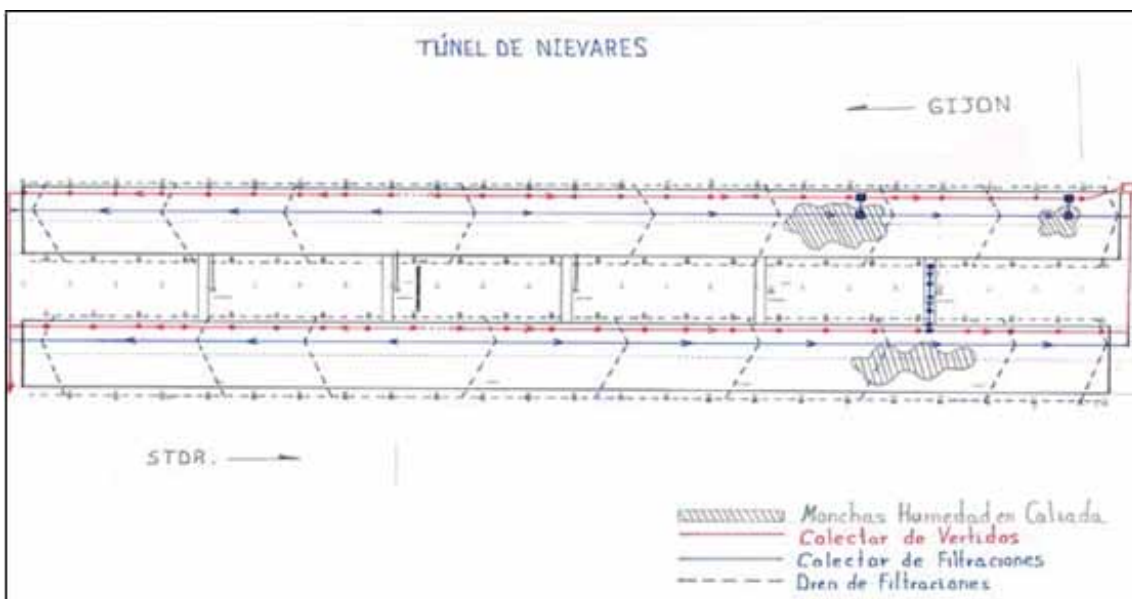


Fig. 4. Esquema del funcionamiento actual del drenaje en los túneles de Niévares

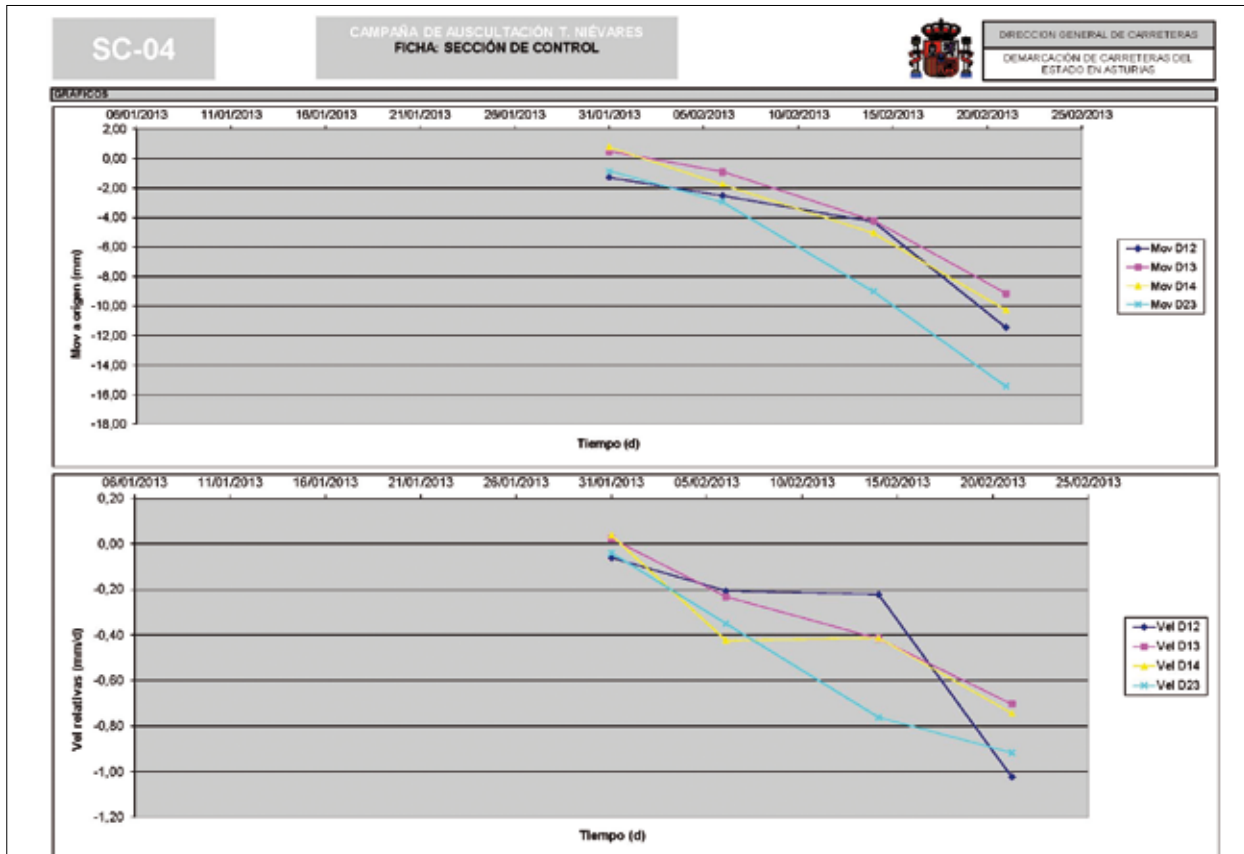


Fig. 5. Movimientos medidos en la sección de convergencia SC-04

secciones transversales del revestimiento, a través de cinta extensométrica. En concreto se dispusieron, inicialmente, cinco secciones equidistantes cada 30 m entre los PKs 363+412 y 363+532, en el tubo A (sentido Villaviciosa), en correspondencia con la zona de las fisuras longitudinales en el pavimento.

La medida cero se realizó en enero de 2013, y tras cuatro lecturas, a finales del mes de febrero del mismo año, se apreciaban tendencias claras de acortamiento en todas las cuerdas con unos valores máximos de cierre en la cuerda horizontal (cuerda 2-3) del orden de los 15 mm, y velocidades máximas del orden de 1 mm/día (Fig. 5).

Las de fisuras longitudinales en la superficie del firme, aproximadamente de 8 a 10 m de extensión y hasta 45 cm de profundidad, prácticamente en el centro de la sección, se detectaron en varios tramos del revestimiento con solera (no en las zonas con contrabóveda). Así mismo,

en las zonas circundantes a dichas fisuras se observó exudación de agua (probablemente por su acumulación bajo la solera) y su posterior filtración al firme, lo que con el tiempo provocaba la formación de una "pátina" muy fina de carbonato, la cual a su vez produce una reducción del CRT en el pavimento.

En los hastiales de esas mismas zonas, se apreció la formación de fisuras, formando aproximadamente un ángulo de 45°, y con su arranque en las juntas de los anillos de hormigonado del revestimiento.

A través de las fisuras de la calzada y de los hastiales se producía la acumulación de agua en la calzada, que generaba la posibilidad de hidropneumático. (Fig. 6). Ante el aumento de la subpresión hidráulica actuante sobre el inicio de los hastiales y la solera del revestimiento, tuvieron que realizarse taladros de alivio en el firme, los cuales, al ejecutarse, provocaron una surgencia de unos 80 a 100 cm de altura.



Fig. 6. Filtraciones que generaban presencia de agua sobre el pavimento

#### 4. Actuaciones iniciales

Tras el análisis de la información disponible, se investigó el estado del revestimiento, mediante la prospección geofísica con GEORADAR 3D Multifrecuencia, empleando una antena 3D de nueve canales, con toma de datos cada 1 cm a lo largo de perfiles longitudinales, en hastiales y calzada (Figs. 7 y 8).

Como resultado del análisis de los datos registrados se ha podido concluir:

a) En hastial: El revestimiento de hormigón presenta un trasdós con un claro reflector, lo que supone espesores para el mismo entre 18 y 61 cm, con un valor medio de unos 43 cm (Fig. 9). La atenuación de las ondas de radio detrás del

revestimiento indica el grado de humedad presente en el terreno, y con ella, se han definido cinco niveles o categorías a lo largo de los perfiles analizados, existiendo tres zonas del trasdós aparentemente más húmedas.

b) En calzada: Se ha determinado un espesor de firme de unos 10 cm, compuesto por dos capas, encima de otra capa con armado muy denso (15 cm entre redondos) a unos 15 cm de profundidad total, que se asocia al cosido entre elementos de la solera de hormigón. Se ha obtenido una caracterización del agua existente en el firme, mediante la atenuación de las ondas de radio, y el punto con mayor humedad se ha situado en el PK 363+517 del tubo A (sentido Villaviciosa). Se han podido identificar también una serie de anomalías, asociadas probablemente a procesos



Fig. 7. Geo-radar 3D Multifrecuencia

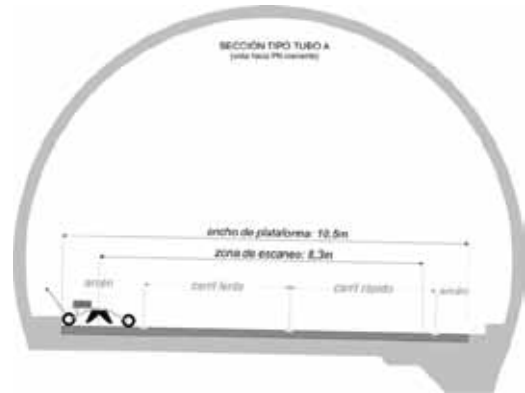


Fig. 8. Diagrama de la posición de los barridos realizados con la antena de Georadar



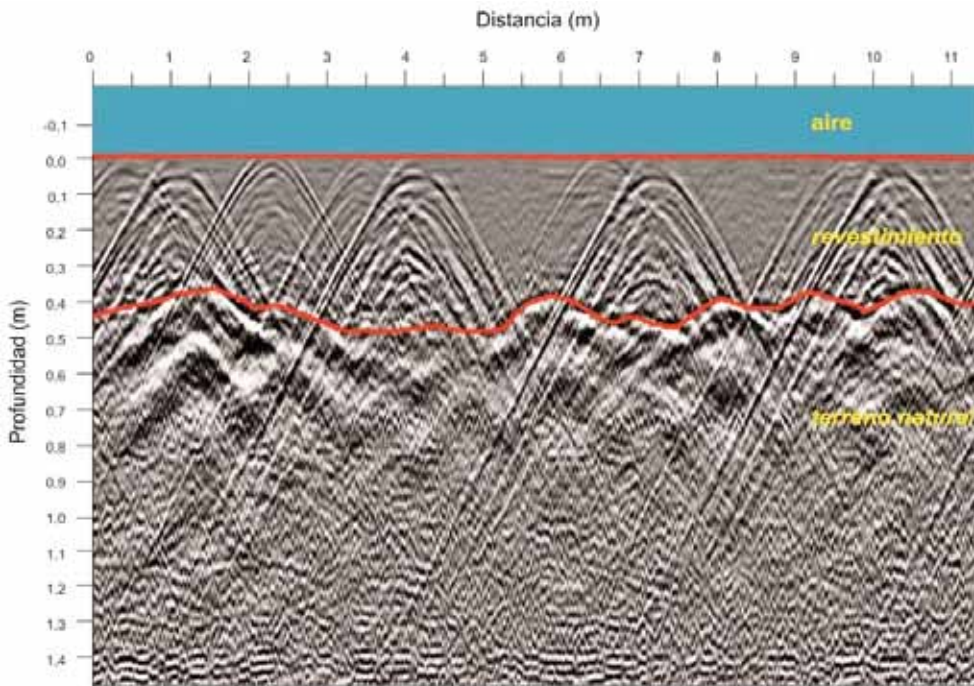


Fig. 9. Fragmento del radargrama correspondiente al canal 1 del perfil superior en hastial



Fig. 10. Imágenes de la zona de extracción de los diferentes testigos

de fisuración y flexión de la plataforma, que tienen mayor importancia en ese tubo A, donde se ha determinado una fisura longitudinal en solera, hasta 15 cm de profundidad, que se corresponde con la grieta en superficie de la capa de rodadura, entre los PKs 363+467 y 363+480. En el tubo B (sentido Gijón) tan solo se ha identificado una posible fisura en la solera del PK 363+464,5, que produce una reflectividad anómala muy concentrada, debido a la circulación del agua.

En las fisuras sobre la calzada, se decidió la realización, de taladros con toma de testigo para verificar el estado y alcance de las mismas. Se perforaron 8 taladros con testigo en el firme del tubo A (sentido Villaviciosa), con 45 cm de longitud, los cuales ratificaron la continuidad de dicha fisura hasta la solera de hormigón, con una alta probabilidad de que esta también se encuentre fisurada totalmente. Las fotografías de la Fig. 10 ilustran la continuidad de la fisura en el pavimento dentro de la solera de hormigón.

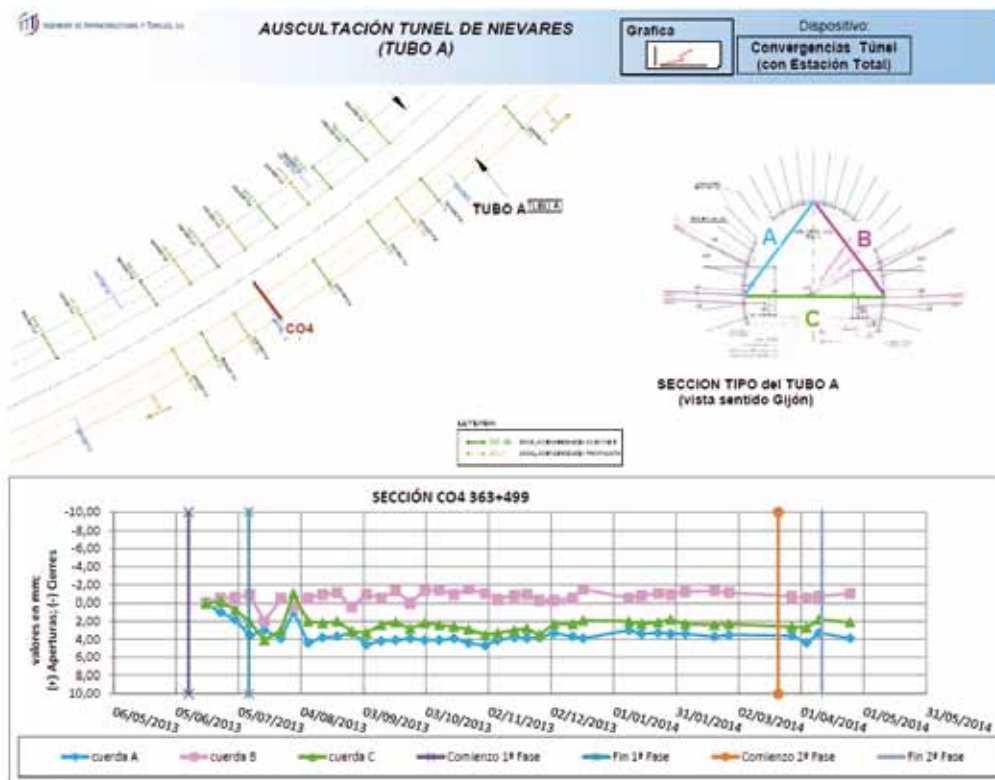


Fig. 11. Evolución de las convergencias en la sección CO-4 del tubo A

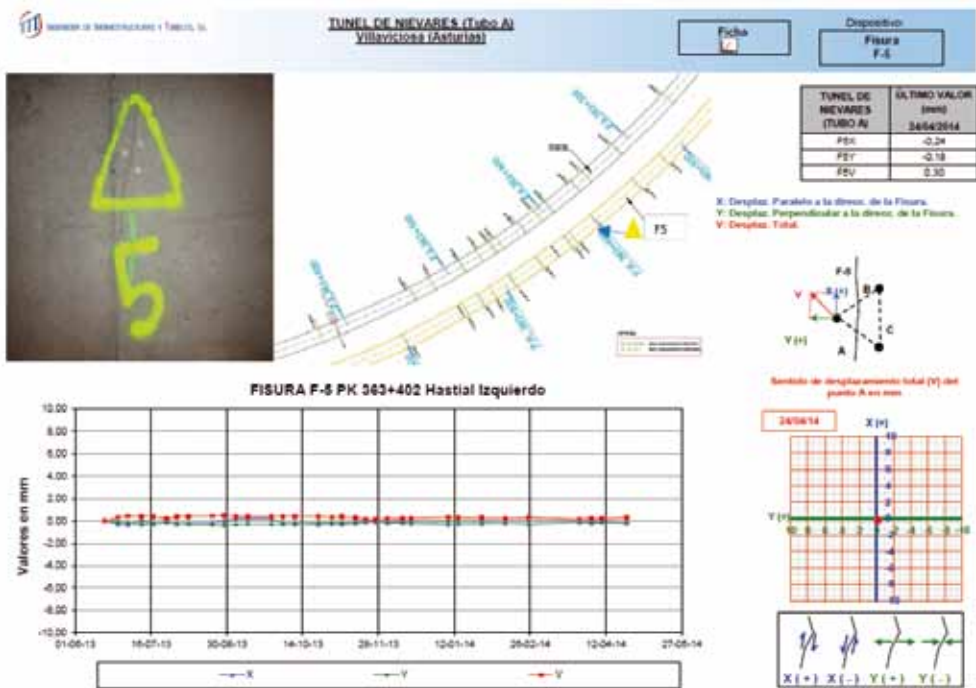


Fig. 12. Seguimiento de la fisura F-5 de hastiales

Como complemento de las secciones de medida ya existentes, y para valorar con mayor detalle la eficacia de las actuaciones de mejora, se instalaron nuevas secciones transversales, en ambos tubos, para medida de las convergencias con una distancia entre ellas de 30 a 50 m (Fig. 11). Además, para seguir la evolución de la apertura de las fisuras, se decidió la instalación de auscultación de precisión (fisurómetros) en las existentes en los hastiales (Fig. 12).

A partir de toda la información anterior, se ha clasificado la longitud total de ambos túneles, diferenciando los tramos donde era significativa la existencia de filtraciones y humedades, por un lado, y donde lo son por el otro, los daños y los movimientos de convergencia, tanto en el revestimiento como en la calzada.

### 5. Medida de caudales y análisis del agua infiltrada

Se han realizado medidas in situ de la calidad de las aguas de drenaje, así como toma de muestras para su análisis en laboratorio. Las medidas in situ se realizaron durante el periodo de junio de 2013 a abril de 2014. Las determinaciones analíticas en laboratorio se realizaron en las muestras obtenidas en campañas, que tuvieron lugar en julio y julio de 2013, y en marzo y abril de 2014.

En las muestras de las cuatro campañas se han determinado los siguientes parámetros químicos: a) GENERALES: pH,

conductividad, Dióxido de Carbono libre. b) CATIONES y ANIONES: Carbonatos, Bicarbonatos, Cloruros, Sulfatos, Sodio, Potasio, Calcio y Magnesio. Además en las campañas de marzo y abril de 2014 se añadieron los siguientes parámetros: Dióxido de Carbono agresivo y Nitrógeno total (Kjeldahl).

A partir de los resultados analíticos obtenidos, se han representado las gráficas de comparación de los valores de pH obtenidos frente a los de conductividad y de contenidos de calcio, magnesio y potasio. En la Fig. 13 se muestra, a manera de ejemplo, la relación calcio-pH. Además en ellas se han incorporado los datos de las aguas del macizo rocoso, obtenidos a partir de consulta realizada a la base de datos del IGME, y los obtenidos de la literatura para estudios similares en los Túneles de Koralm (Austria).

El interés de considerar estos parámetros deriva de que autores, como DIETZEL et al. en 2008, discriminan para procesos similares de calcificación, la composición de las aguas de drenaje analizadas en tres grupos: a) Similares a las aguas subterráneas del macizo local (con baja interacción con el sostenimiento); b) aguas de interacción con el hormigón proyectado (con alta alcalinidad); y c) y aguas de carácter intermedio. Según esa clasificación, las aguas del primer grupo presentan menores concentraciones de sodio y potasio, mientras que las aguas del segundo registran elevados valores de pH, e incrementos de las concentraciones

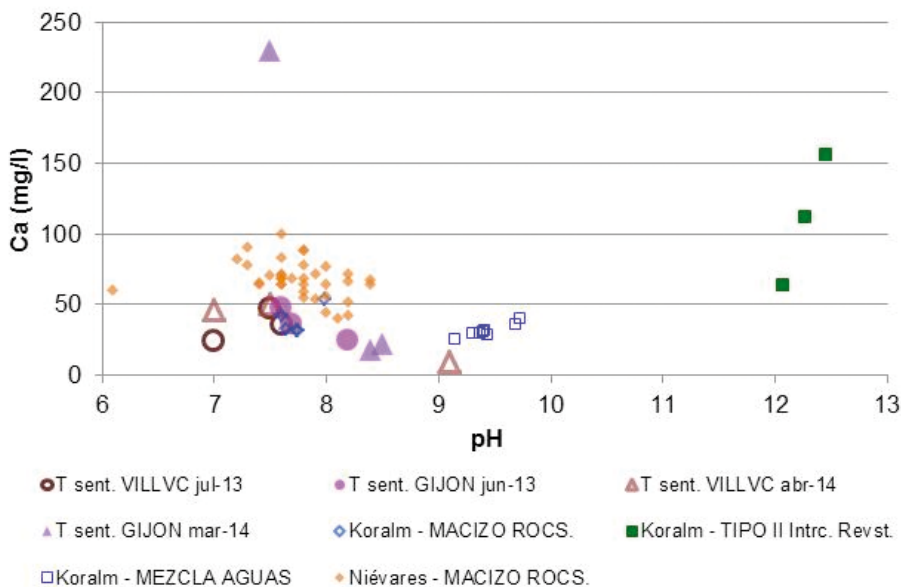


Fig. 13. Comparación calcio/pH de las Analíticas de aguas DURANTE las obras

desarrollo sostenible



# Más que agua

Talento, conocimiento y compromiso.  
Aportamos respuestas adecuadas  
para una gestión más eficiente.  
Compartimos conocimiento  
y generamos innovación.  
Trabajamos por un futuro basado  
en el compromiso y la cooperación.

[www.aqualogy.net](http://www.aqualogy.net)



 **AQUALOGY**  
Where water lives

SOLUCIONES INTEGRADAS  
DEL AGUA PARA UN  
DESARROLLO SOSTENIBLE

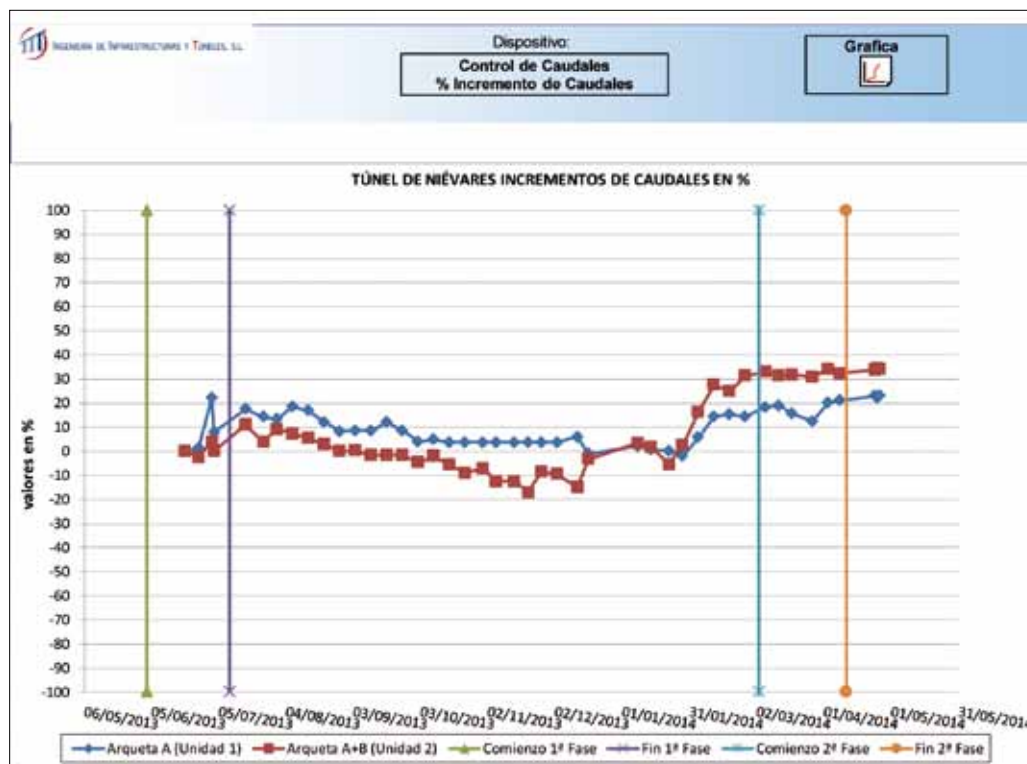


Fig. 14. Evolución del caudal evacuado por el colector del Tubo B (Unidad 1), y del total de ambos túneles (Unidad 2)

de calcio, sodio y potasio, acompañados de menores valores de magnesio y sulfatos.

En este caso, se observa que las aguas analizadas durante 2013, presentan unas características geoquímicas comparables a las del macizo local antes de la construcción de los túneles (la serie de datos del IGME corresponde a los años 1980 a 2001), y por tanto, pertenecen al primer grupo de los anteriores. En las campañas de 2014, los datos obtenidos presentan una situación parcialmente semejante a la inicial, pero se empieza a observar una cierta evolución hacia aguas de carácter intermedio, la cual es para el tubo B (sentido Gijón), menos acusada, pero con una mayor extensión, mientras que en el tubo A (sentido Villaviciosa) tiene mayor intensidad, pero con una menor presencia.

En cuanto a la medida de los caudales evacuados por los colectores del sistema de drenaje, se instalaron en las dos arquetas de salida de ambos túneles, sendos caudalímetros. Del análisis de los resultados, se observa un incremento de los caudales del orden del 20% en el tubo A (sentido Villaviciosa), y del 30 % en el tubo B (sentido Gijón), como consecuencia de las actuaciones de mejora del sistema de

drenaje, siendo la cuantía absoluta de los mismos de 1,5 y 1,9 l/s para los tubos A y B respectivamente, (Fig. 14).

## 6. Estudio de sustancias inhibidoras de la precipitación salina

La formación de incrustaciones calcáreas en el interior de los sistemas de drenaje subterráneo de túneles, y su influencia en las tareas de mantenimiento, es una problemática de creciente interés entre diferentes operadores de transporte a nivel internacional, a medida que han aumentado el número y el tiempo de servicio de túneles, que atraviesan macizos carbonatados con acuíferos naturales de entidad. Estos procesos de formación de obstrucciones calcáreas, suponen la aparición de incrementos significativos, incluso superiores a un 20 %, de los presupuestos de mantenimiento, debido a la necesidad de mayores frecuencias de las tareas de limpieza y/o reparación de los sistemas de drenaje subterráneo; y sobre todo, por la aparición de efectos negativos sobre el comportamiento del revestimiento y del firme de la calzada, lo que puede ser menos admisible. En los túneles actuales, se viene observando que la aparición de estos depósitos de incrustación es independiente del sistema constructivo empleado.

La estrategia de mantenimiento habitual, por parte de los operadores, para mitigar este problema ha sido el empleo de las tecnologías de limpieza y desobstrucción, similares a las usadas en las redes de alcantarillado. Esta estrategia acaba por llevar asociadas tareas de reparación, en la medida que los conductos y colectores pueden llegar a ser dañados por las frecuentes operaciones de limpieza, o de acondicionamiento del sistema de drenaje, para adecuarlo al uso de los métodos de limpieza disponibles.

En el ámbito de las infraestructuras civiles, entre los estudios pioneros, se encuentran los promovidos por el operador de ferrocarriles Deutsche Bahn AG, en conjunción con el Instituto de Ingeniería y Gestión de la Construcción (Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich). La finalidad de este tipo de estudios se ha dirigido a establecer, tanto los factores que determinan este proceso, como la definición de los criterios para optimizar la estrategia de mantenimiento preventivo y correctivo. Al día de hoy, se han identificado los diferentes factores intervinientes en el proceso; y han establecido recomendaciones en relación al diseño de los sistemas de drenaje subterráneo para el caso de túneles de nueva construcción, y a la optimización de las tareas de mantenimiento en túneles existentes.

Las variables identificadas como condicionantes del proceso de calcificación han sido las siguientes: los materiales empleados en la construcción; la variación del pH del agua por lavado; la presencia de zonas con mezclas de aguas; la temperatura; la aireación del agua drenada; las condiciones de ventilación existentes y las condiciones de evaporación.

Respecto a optimizar los sistemas de mantenimiento, las conclusiones aconsejan la combinación de los procesos de limpieza física, con la aplicación de agentes para la prevención de la calcificación, procedentes de los procesos industriales. El objeto es ajustar la frecuencia de las operaciones físicas de mantenimiento para reducir su impacto económico, y sobre la integridad de los elementos de drenaje subterráneo. Las pruebas piloto realizadas en túneles, han considerado la selección de agentes desincrustantes de origen industrial, que combinen un adecuado funcionamiento en la inhibición y disolución de las incrustaciones carbonatadas, con una alta afinidad de absorción y elevada biodegradabilidad para no inducir efectos perjudiciales para el medio ambiente. Estas pruebas piloto han considerado el uso de compuestos en la forma de sales sódicas de ácido poliaspártico, como lo más eficaz a este respecto.

## **7. Origen de las anomalías del revestimiento y posibles actuaciones de mejora**

A la vista de los daños y deformaciones en el revestimiento, así como de las infiltraciones y humedades en paramentos y calzada de ambos túneles, asociadas al mal funcionamiento del sistema de drenaje por las obstrucciones ya descritos, se concluyó que el origen de los problemas estaba en: a) las presiones del agua freática, al actuar sobre los hastiales y, especialmente sobre la solera de ambos tubos, dando lugar a sollicitaciones y esfuerzos no considerados en el proyecto constructivo; y b) en un cierto grado, en la alteración y reblandecimiento de los niveles más arcillosos y margosos del terreno, causados también por el agua acumulada en el trasdós del revestimiento y en la base de la solera, proceso que da lugar a una disminución de la rigidez del terreno encajante.

Por ello ha sido necesario restituir y mejorar, tanto el sistema de captación del agua freática en el terreno adyacente a los túneles en esos tramos afectados, como su evacuación a través de los colectores, todo ello de forma continua y permanente, sin obstrucciones por los depósitos de sales carbonatadas. Lo primero se consigue con la perforación de unos taladros subhorizontales de drenaje, tipo californiano, en el arranque de solera y en hastiales, los cuales han de limpiarse y mantenerse periódicamente para eliminar los posibles depósitos y mantener su capacidad de captación; mientras que lo segundo requiere la construcción de nuevas arquetas de acceso a los colectores de desagüe, de modo que pueda realizarse la eliminación de las obstrucciones existentes, y sobre todo, el mantenimiento periódico que impida su formación en el futuro.

Por otra parte, y adicionalmente, en los tramos de túnel donde los daños y deformaciones del revestimiento y solera han sido más importantes, ha debido restituirse y mejorar la resistencia y rigidez transversal de estos últimos, a fin de compensar el posible deterioro del terreno adyacente. Esta última finalidad se logra con bulones subhorizontales de arriostamiento en los arranques de la solera, y en los hastiales, pretensados con un carga cercana a su capacidad nominal, a fin de obtener su entrada en servicio, con movimientos muy pequeños de convergencia horizontal en el revestimiento.

## **8. Simulación numérica**

Para comprobar el alcance de estas acciones negativas, y de las actuaciones de mejora, se ha llevado a cabo una modelización numérica, bidimensional, con elementos finitos.

El desarrollo de estos cálculos ha partido de un análisis retrospectivo (“back analysis”), que explica las convergencias medidas, tanto al final de la construcción (unos 5 mm en horizontal entre hastiales), como el aumento medido, posteriormente y hasta el inicio de las obras de emergencia, en el tramo más afectado del tubo A (más de 15 mm); después ha considerado la acción de las presiones de agua y del deterioro del terreno, de modo independiente para valorar su importancia relativa; y finalmente, se ha comprobado la eficiencia de las posibles actuaciones de drenaje, así como del refuerzo con bulones del revestimiento.

Se ha estudiado la sección tipo S.8, la cual corresponde al tramo más afectado por las patologías descritas en el tubo A (sentido Villaviciosa), cuyo sostenimiento se indica en la Fig. 15. Esta sección se excavó en un terreno de transición entre calizas y dolomías (formación J.1) y margas brechoides (formación J.1.1), con una cobertera de unos 179 m, y con el nivel freático por debajo de la solera (a más de 14 m), durante la construcción. Para el modelo numérico de cálculo, se ha empleado el código informático de elementos finitos PLAXIS 8.6, de la Universidad de Delf. Los cálculos se han realizado considerando las diferentes fases de construcción, pues el estado tenso-deformacional final depende de la historia de cargas de los elementos finitos. El procedimiento de exca-

vación hasta llegar a la situación bidimensional de equilibrio, se ha simulado dividiendo la tensión inicial en dos partes, con la primera aplicada antes de ejecutar el sostenimiento, y la segunda actuando sobre este último.

En las fases constructivas, se han efectuado iteraciones variando los parámetros geotécnicos del terreno envolvente, hasta conseguir una convergencia horizontal de 2 mm tras el avance, y de 5 mm después de completar la sección del túnel con su revestimiento. Con el análisis retrospectivo para el final de la construcción, los parámetros geotécnicos obtenidos para el terreno han sido 5000 Mpa de módulo de deformación, 500 kN/m<sup>2</sup> de cohesión y 39° de rozamiento interno (típicos de una roca media), resultando un coeficiente de seguridad de 2,5, un momento máximo en revestimiento de 24 kN·m/m, y una compresión máxima en solera de 160 kN/m.

En la situación de servicio se ha estudiado la acción resultante al ascender el nivel freático por encima de la solera, dando lugar a presiones y filtraciones de agua en el revestimiento y solera del túnel, y de modo independiente, el efecto de reblandecimiento y deterioro del terreno, que aumenta los empujes al reducirse los parámetros geomecánicos del mismo.

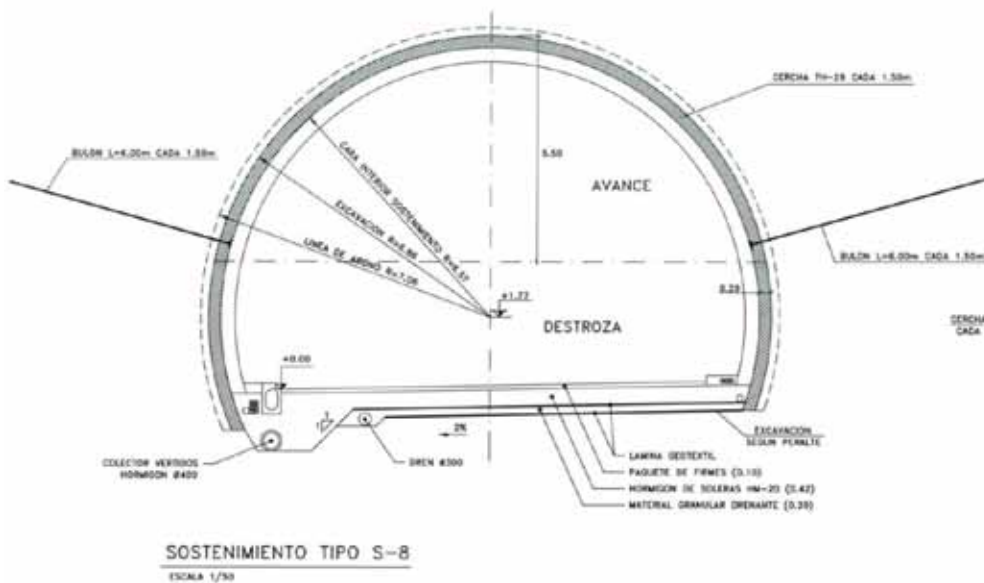


Fig. 15. Geometría y sostenimiento en la sección tipo S-8



En el análisis de influencia del nivel piezométrico, se han considerado ascensos del nivel freático de hasta 50 m sobre la solera, siendo el ascenso de unos 20 m al que corresponde un incremento de la convergencia horizontal en hastiales de 16 a 20 mm, en consonancia con los resultados de las medidas, antes del inicio de las actuaciones de emergencia. Con esta acción, probable al haberse producido surgencias de agua a presión por la solera y por la bóveda del revestimiento, el momento máximo en este último y la compresión sobre la solera, aumentan a 103 kN·m/m y 8.192 kN/m, mientras que el factor de seguridad baja a 1,19.

Por otra parte, la influencia del posible deterioro del terreno, para explicar aumentos de 12 a 16 mm en la convergencia horizontal de los hastiales, lleva a unos parámetros geomecánicos del terreno iguales a 400 Mpa de módulo de deformación, 1 kN/m<sup>2</sup> de cohesión y 31° de rozamiento interno, propios de una roca muy blanda o un suelo muy preconsolidado, lo que implicaría un grado de deterioro muy improbable. En este caso, el momento máximo en el revestimiento y la compresión máxima en la solera aumentan hasta 121 kN·m/m y 5.280 kN/m, resultando un factor de seguridad global de 1,21.

En consonancia con lo anterior, las actuaciones de mejora han consistido en secciones de drenes subhorizontales de

hasta 8,5 m de longitud con tres unidades en cada hastial, y bulones pretensados de hasta 10 m de longitud, con dos unidades en cada extremo de la solera y arranques del hastial (Fig. 16).

Para una altura de 20 m, caso pésimo más probable, los drenes y bulones producen una reducción de las presiones intersticiales, (Fig. 16) junto con una descarga del revestimiento, que incrementa el factor de seguridad hasta 1,36 (frente al 1,19 anterior), mientras que el momento flector máximo aumenta hasta 155 kN·m/m (frente a 103 kN·m/m), y la compresión máxima en solera baja hasta 5.510 kN/m (frente a 8.192 kN/m); es decir, esta última se reduce al 67 %. Por su parte, las convergencias horizontales en hastiales se reducen en 10 a 15 mm.

La otra situación tenida en cuenta ha sido el posible deterioro del terreno hasta los parámetros geomecánicos obtenidos anteriormente para explicar las convergencias horizontales posteriores a la construcción. En este caso, como es lógico, la mejora es menor, pues el factor de seguridad global es de 1,21 y los esfuerzos en el revestimiento son similares a los anteriores; mientras que la convergencia horizontal disminuye tan sólo en 1 a 2 mm.

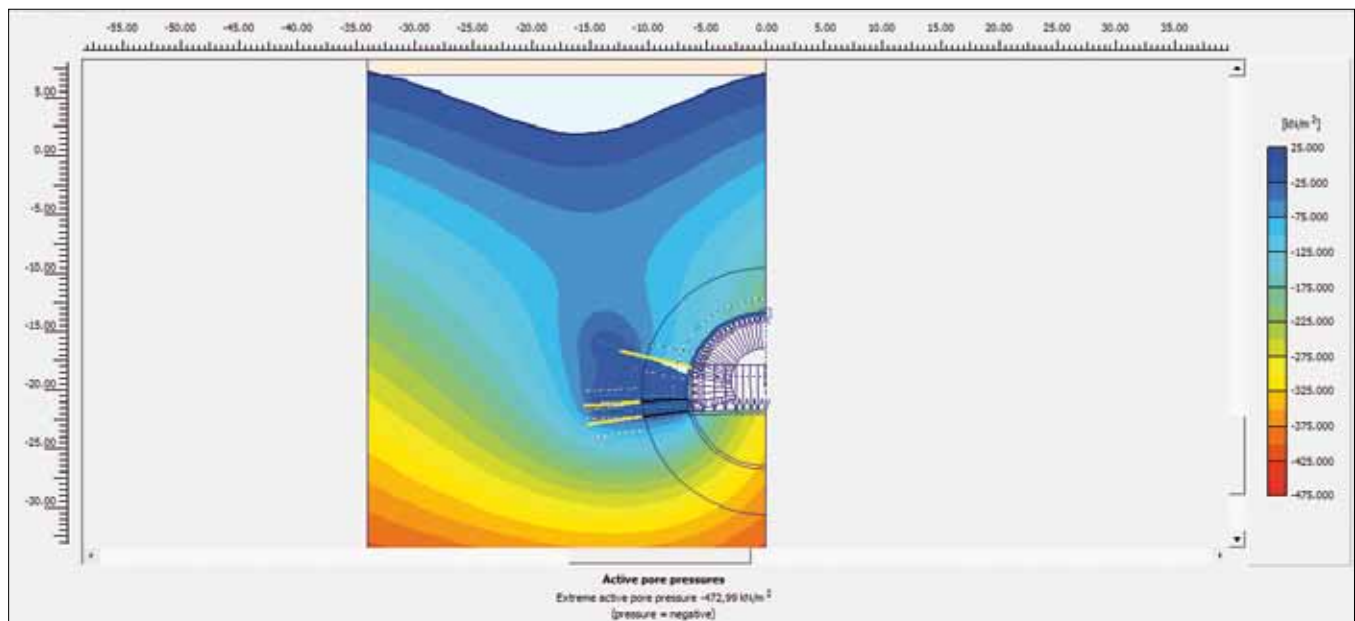


Fig. 16. Ejemplo de variación de la presión intersticial con el efecto de los drenes

Finalmente, se ha analizado también la adición de otros bulones verticales, arriostrando la solera frente al posible levantamiento. En la situación de ascenso del nivel freático, la reducción adicional en la convergencia es de 1 mm, la compresión en la solera baja a 3.850 kN/m, pero en cambio, el momento flector en el revestimiento sube hasta 161 kN·m/m. El factor de seguridad asciende hasta 1,49. En la situación de deterioro del terreno, la reducción en la convergencia es de unos 5 a 7 mm, el coeficiente de seguridad es de 1,33, y los esfuerzos en el revestimiento resultan de 190 kN·m/m para el momento flector, y 4.970 kN/m para la compresión en solera.

### 9. Actuaciones de mejora realizadas

#### 9.1. Mejora en Tubo A (Gijón-Villaviciosa)

En este tubo se han ejecutado secciones de drenes y bulones separadas del orden de 3 m. Cada sección consta de (Fig. 17): a) Tres (3) drenes de longitud hasta 8,5 m, situados en el lado entre túneles entre los PKs 363+173 y 363+591 (418 m); y b) Cuatro (4) bulones activos de longitud hasta 10 m, entre los PKs 363+400 y 363+556 (156 m), coincidiendo con la zona de fisuras en el pavimento. Como refuerzo en el PK 363+491 se ejecutó una sección de seis bulones, al existir una con mayor patología.

El drenaje del túnel se completó con la ejecución de drenes de longitud hasta 8,5 m, en el lado valle en las zonas donde se detectaron humedades entre el PK 363+307 y el 363+781 (474 m), situadas entre 0,5 y 1,5 m de altura.

#### 9.2. Mejora en Tubo B (Villaviciosa-Gijón)

En éste tubo, en los PKs coincidentes con aquellos en donde se ha detectado la presencia de fisuras longitudinales en el tubo A, se realizaron semisecciones de drenes (Fig. 18). En el lado entre túneles se han ejecutado semisecciones de tres drenes, cada una entre los PKs 363+435 y 363+612, al tresbolillo con los drenes ya ejecutados en el tubo A. Igualmente en el lado montaña, se han hecho secciones de tres drenes entre los PKs 363+295 y 363+620, separadas 3 m entre sí.

#### 9.3. Nuevas arquetas en los colectores

Respecto a las medidas destinadas a la mejora del sistema de drenaje del túnel, ha sido necesaria la ampliación del número de puntos de conexión del drenaje del túnel con el colector de filtraciones, que discurre bajo la calzada. Esta mejora de la conexión de los diferentes conductos de drenaje subterráneo, se ha logrado mediante la ejecución de arquetas a intervalos regulares (cada 85 m), y situadas

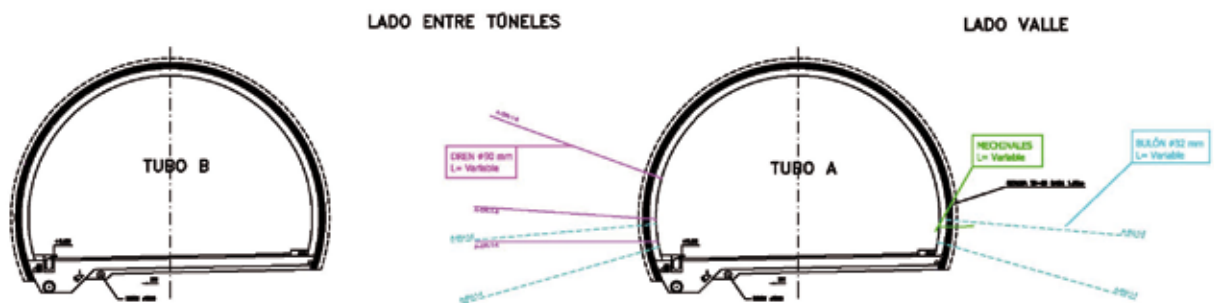


Fig. 17. Sección tipo en tubo A

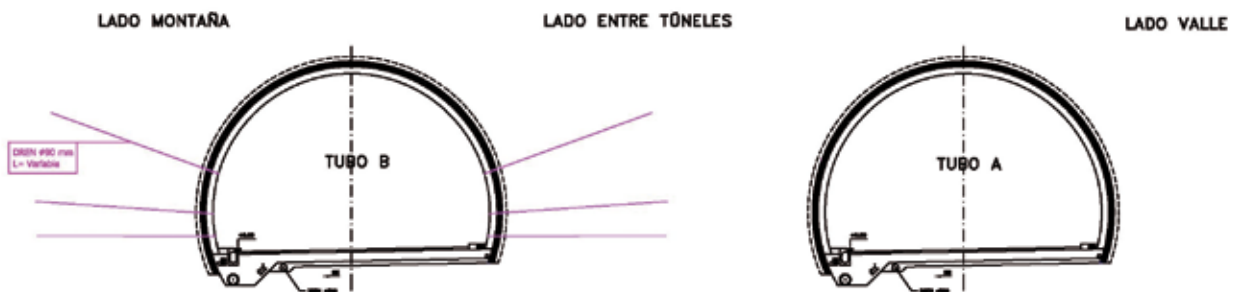


Fig. 18. Sección tipo en tubo B

coincidiendo con la tubería colectora citada. La distancia entre arquetas viene dada por la capacidad de alcance de los sistemas actuales de limpieza de las tuberías.

Estas arquetas se han dispuesto con tapas no ranuradas y dotadas de junta en el marco de apoyo de las mismas, de forma que se prevenga la entrada desde la calzada de líquidos y la circulación de aire a través de las bocas de hombre. En el túnel B, el colector de filtraciones está situado bajo el arcén del carril lento (Fig. 19). Esto permitió la colocación de una arqueta de sección cuadrada de 800 x 800 mm, justo encima del colector de filtraciones, de tal manera que toda la arqueta quedara dentro del arcén, sin invadir ningún carril; esta arqueta fue ejecutada en hormigón armado y tapa circular de fundición. En cuanto al tubo A, el colector de filtraciones está situado entre el arcén interior y el propio carril rápido; esta situación obligó a diseñar otro tipo de arqueta para evitar que la tapa de registro de la misma quedara en el carril rápido, con los consiguientes problemas para el tráfico rodado. Finalmente se decidió un diseño de planta rectangular y en hormigón armado, donde la tapa de registro se situaba en un extremo de la arqueta, de tal forma que se evita situarla en el carril rápido.

#### 9.4. Drenes californianos en hastiales

Previamente a la perforación de los drenes, se realizaron perforos para la detección de cerchas o armaduras existentes, embebidas en el revestimiento. Estas perforaciones fueron de pequeño diámetro (10 mm) y se realizaron con taladro manual.

La perforación para la colocación de los drenes, se realizó en un diámetro de 110 mm, necesario para poder introducir un tubo ranurado de PVC de diámetro 90 mm, protegido en toda su longitud con un geotextil que evita la filtración de material arcilloso y/o margoso. Una vez finalizada la perforación se procedió a colocar la tubería dren por tramos hasta conseguir la longitud requerida. Los 0,5 m más superficiales del dren son de tubo ciego, para evitar el afloramiento de sales calcáreas en el contacto dren-hastial. Desde el comienzo de la perforación de los drenes, se pudo apreciar la gran cantidad de agua que circulaba por detrás del revestimiento del túnel, y en algunos casos con cierta presión (Fig. 20).

Una vez ejecutados los drenes californianos, se procedió a conectarlos con el colector, mediante una red de recogida, que se realizó por medio de bajantes colectoras de los drenes de cada semisección, con tubería de PVC de 90



Fig. 19. Localización arqueta tubo B



Fig. 20. Aporte de agua a través de los drenes de los hastiales

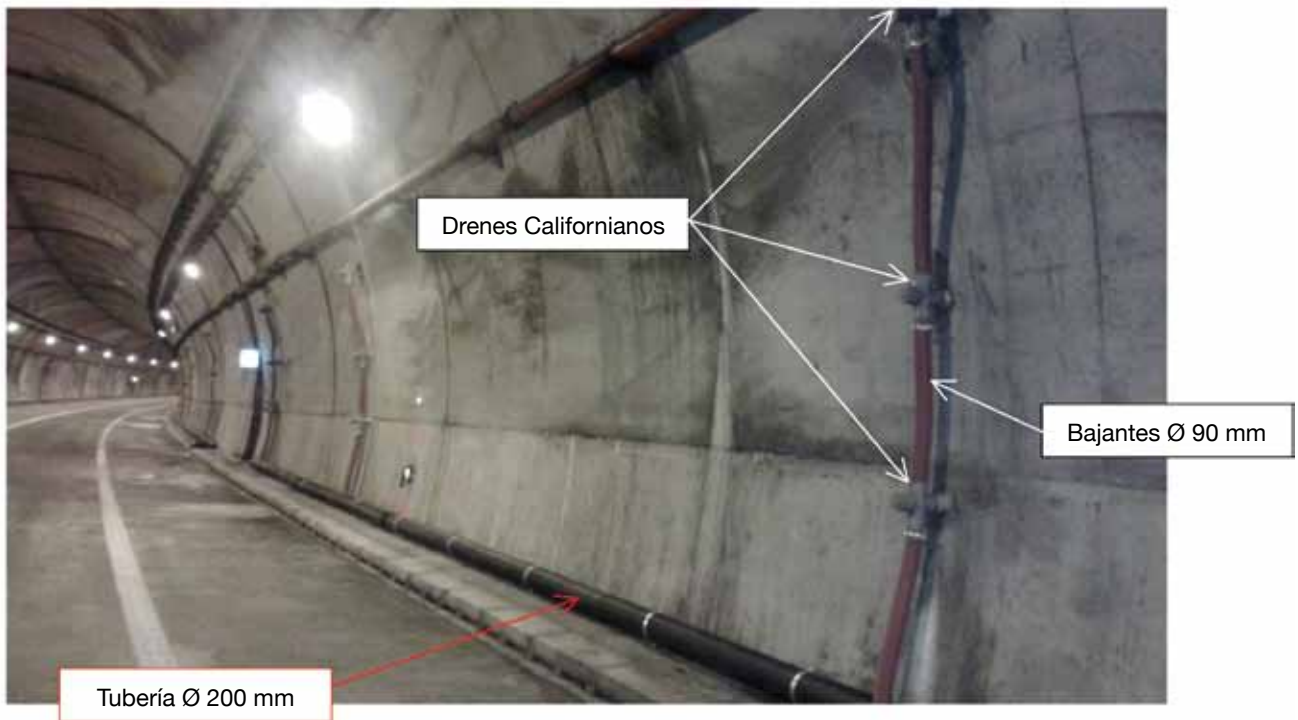


Fig. 21. Detalle de una sección de drenes



Fig. 22. Barra DYWI Drill R38-420.

mm, hasta otra tubería de PVC de 200 mm, que finalmente desagua en el colector (Fig. 21).

#### 9.5. Bulones en hastiales

La perforación se realizó con perforadoras trabajando a roto-percusión, con martillo en cabeza. En función del terreno perforado se decidió el tipo de bulón a emplear, bien autoperforantes o bien barra convencional. El diámetro del taladro ha de permitir el desarrollo de la resistencia efectiva del bulón, siendo recomendable 75 mm o superior.

Los bulones empleados fueron de barra GEWI Ø 32mm los convencionales y de barra DYWI Drill R38-420 los autoperforantes (Fig. 22). En ambos casos, se dispuso de una vaina lisa engrasada en los primeros metros de la barra, para conformar la zona de longitud libre del bulón. La placa de reparto fue cuadrada, de 20 cm de lado y 2 cm de espesor.

La operación de inyección de los bulones es de gran importancia en todos los bulones que se consideren como medio de retención permanente, y tiene por objeto mantener la efectividad del bulón; además impide la corrosión de la barra, evita la pérdida de tensión por deslizamiento del bulón, o por rotura del apoyo bajo la placa de reparto y protege la barra frente a posibles movimientos de bloques de roca. La lechada debe utilizarse inmediatamente después de ser efectuada la mezcla del cemento y agua; la relación agua-cemento en peso utilizada fue de 0,5, siendo el tipo de cemento 52,5 SR.

Cinco días después de la inyección se instalaron la placa, arandelas y la tuerca, y se procedió al tensado del bulón,

siguiendo el procedimiento, que incluía un ensayo de carga mediante fases incrementales. Este ensayo se realizó conforme a la Norma NLT-258/2000 “Ensayo de puesta en carga de un anclaje mediante fases incrementales para la determinación del desplazamiento por fluencia de la cabeza del anclaje”.

Una vez comprobado cada bulón, mediante este ensayo, se procedió a proteger su cabeza mediante un “capuchón” de PVC.

#### 10. Resultados de las mejoras

En el mismo momento que se comenzó la perforación del revestimiento, para la ejecución de los bulones y los drenes californianos, se produjo un aporte importante de agua a través de los taladros, que aparentemente procedía del contacto con el terreno envolvente (Fig. 20). Poco a poco y según se iba densificando el número de taladros en el revestimiento se observó, que el aporte de agua y la presión a la que afloraba, iban descendiendo. Al poco tiempo (3 a 4 días) de haber comenzado los trabajos de perforación en cada uno de los tubos, se pudo apreciar una disminución aún mayor del aporte de agua a través de los taladros, hasta que finalmente se estabilizaba en un caudal casi constante.

La evacuación de esta agua, acumulada en el trasdós del revestimiento, implicó una disminución, y posterior desaparición, de la infiltración de agua a través tanto del pavimento, primeramente, como más tarde por las fisuras por los hastiales.

Finalmente el tratamiento de drenaje ha conseguido redirigir la gran mayoría de los aportes de agua que filtraban hacia el túnel, conduciéndolos a través de la red de recogida de las aguas de los drenes, a los colectores de desagüe de cada túnel. Esto se ha manifestado en la práctica desaparición de las filtraciones y humedades de agua dentro de los dos tubos.

Se ha podido comprobar que desde el inicio de las actuaciones no solo ha cesado el cierre de la sección del revestimiento, sino que en algunos casos, se ha recuperado parte del cierre que se había producido en la sección, llegando a recuperar hasta 12 mm (Fig. 23) en la cuerda horizontal. En cuanto a las fisuras, se ha confirmado que desde el comienzo de las actuaciones no han sufrido cambios significativos.

En los caudales desaguados, como se ha citado, se observó un incremento del orden del 20 % en el túnel B y

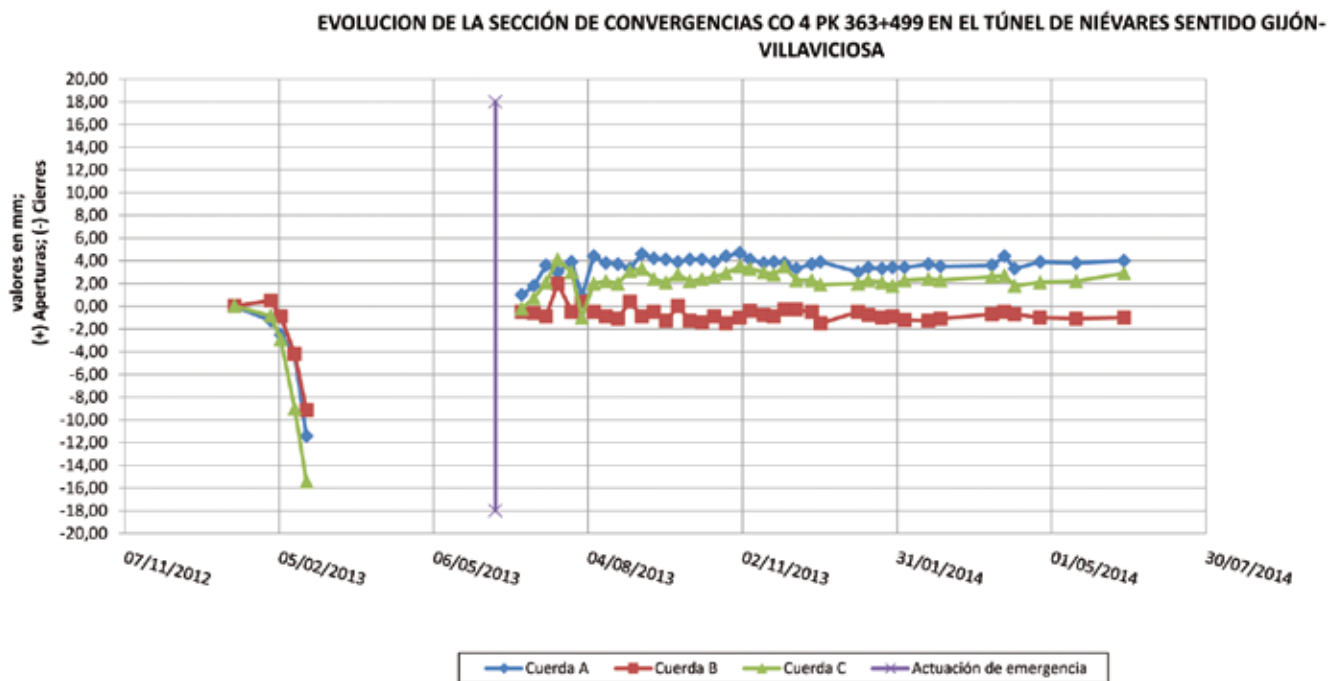


Fig. 23. Gráfico representativo de la evolución de las medidas de convergencias en el tramo más afectado del Tubo A (Sentido Villaviciosa)

del 30 % en el conjunto de ambos túneles, al final de las actuaciones de mejora del sistema de drenaje (Fig. 14); siendo el caudal evacuado del orden de 1,5 l/s en el Tubo A y 1,9 l/s en el Tubo B.

### 11. Mejoras del mantenimiento del sistema de drenaje

A la vista de los estudios realizados, caben las medidas conducentes a limitar, en lo posible, la aireación del agua drenada. A este respecto, además de adoptar tapas de cierre con hermeticidad en las arquetas de los colectores, se ha considerado de interés, evitar la entrada de aire, procedente de los colectores, a través de la boca de salida de los drenes subhorizontales de captación. Para ello está en desarrollo un ensayo experimental, en parte de los nuevos drenes de captación, consistente en el uso de un elemento de conexión, con un funcionamiento tipo sifón, de modo que al permanecer con carga del agua drenada en toda su sección, impida la entrada de aire en el interior de la tubería ranurada (Fig. 24). Los resultados de este ensayo experimental, al menos durante un año hidrológico completo, comparando la evolución de los depósitos salinos en estos drenes y en los restantes sin el dispositivo, permitirán llegar a conclusiones sobre la conveniencia de extender, en el futuro, esta conexión especial a todos los nuevos

drenes existentes, e incluso, a la salida de los colectores de recogida y evacuación en ambos túneles.

Adicionalmente, se ha iniciado el desarrollo experimental, de la mitigación del proceso de precipitación calcárea, mediante el empleo de un agente químico inhibidor de este último. En este caso, de acuerdo con las conclusiones obtenidas, del estudio especial realizado, se ha seleccionado al ácido poliaspártico como sustancia reductora del proceso de depósitos carbonatados.

Según las condiciones en los túneles, el método más adecuado para su empleo es en forma sólida, como pastillas que se distribuyen, a lo largo de cada Tubo, en los accesos al sistema de drenaje, como las arquetas de inspección y limpieza (Fig. 25). La sustancia reactiva componente de las tabletas es la polisuccinimida (Psi), un precursor en la formación del PAsp, que en contacto con el agua, se hidroliza generando el ácido poliaspártico. Este modo de disposición no requiere espacio en los túneles, para los equipos de almacenamiento y dosificación; y por otra parte, el consumo de la sustancia reactiva se autoregula a las condiciones de caudal y dureza, presentes en los diferentes puntos de su puesta en el sistema de drenaje,



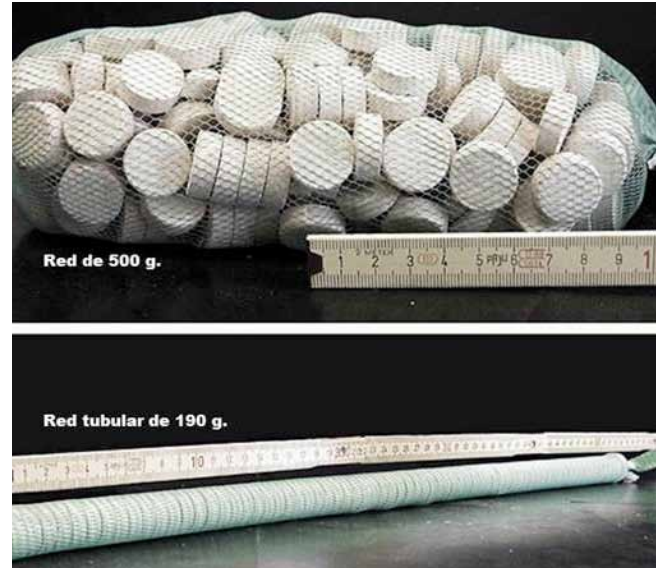
**Fig. 24. Dispositivo tipo sifón empleado, en el ensayo experimental en desarrollo para impedir la entrada de aire en los nuevos drenes subhorizontales de captación**

habida cuenta de que el proceso de liberación por hidrólisis, se relaciona con las condiciones de pH y caudal en las aguas drenadas. El desarrollo de este ensayo experimental, actualmente en marcha y con una duración no inferior al año hidrológico, ha requerido la construcción de depósitos especiales, para su puesta, en las arquetas seleccionadas de los colectores de ambos túneles, e implicará el seguimiento en toda la duración del ensayo, tanto de los resultados sobre la cuantía y propiedades físicas de los depósitos calcáreos, como de la evolución de los parámetros químicos más relevantes del agua drenada (pH, oxígeno disuelto, etc.), y del consumo del propio reactivo inhibidor.

## 12. Conclusiones

La naturaleza y morfología de las patologías existentes en ambos tubos, indican que su origen está en las presiones del agua actuando sobre el revestimiento y solera, menor grado en el deterioro de las propiedades geomecánicas del terreno envolvente, la cual puede haber dado lugar a sobreempujes no considerados en el proyecto constructivo.

El análisis de la influencia de esas dos acciones anteriores, mediante los cálculos con modelo numérico de elementos



**Fig. 25. Pastillas de ácido poliaspártico. Presentación en tabletas de polisuccinimida (PSI) con 10 % de ligante y 90 % de sustancia activa (producto Baypure® DSP 130)**

finitos, puede explicar el aumento de convergencias horizontales entre hastiales, medido después de la construcción y hasta el inicio de las actuaciones de emergencia.

En este sentido, unos 10 a 20 m de elevación del nivel piezométrico sobre la solera de los túneles, se considera el factor principal que ha causado las patologías observadas, ya que el deterioro del terreno, necesario para explicar las deformaciones medidas, implica una “transformación” del mismo desde una roca media a un suelo muy sobreconsolidado, circunstancia que se considera muy improbable.

En consecuencia, las actuaciones de mejora más importantes han sido las conducentes a restituir y conservar, tanto el sistema de captación del agua freática, realizando drenes subhorizontales, como su evacuación a través de los colectores, construyendo arquetas de inspección y limpieza de los depósitos de sales carbonatadas.

Además, en los tramos con daños y deformaciones más importantes en el revestimiento y solera, se han ejecutado bulones pretensados subhorizontales en los extremos de la solera y arranque de los hastiales, a fin de aumentar la resistencia y rigidez transversales. Con ello, el factor de se-

guridad global obtenido es suficiente, y no son necesarios otros bulones verticales adicionales en la solera.

Se ha establecido un programa de mantenimiento y limpieza en base a las experiencias obtenidas durante la reparación. Así mismo se ha iniciado una campaña experimental para estudiar los efectos de diversas medidas (aireación y/o aportación de ácido poliaspártico) a largo plazo, a fin de poder reducir los depósitos calcáreos en el drenaje.

### 13. Agradecimientos

Los autores quieren expresar su agradecimiento a la empresa Geocisa, ejecutora de los trabajos de refuerzo (especialmente a D. José M<sup>a</sup> Flores, jefe de las obras de reparación), a la empresa que tiene a su cargo el mantenimiento de los túneles (U.T.E. Api Movilidad), a Geofísica Consultores (que hizo las prospecciones con Geo-radar), y a D. Rafael Salado, ingeniero de Caminos de EIS-GUÍA Consultores, por la realización de los cálculos con el modelo numérico de comportamiento. **ROP**

### Referencias

- Dietzel, M., Kñammer, D., Rinder, T., Leis, A. et al. (2008). *Koraln Tunnel as a case for sinter formation in drainage systems - Precipitation mechanisms and retaliatory action*. Geomechanik und Tunnelbau, 1, 271-278.
- Expósito, M., (2011). Control e inspección de redes de saneamiento urbanas. Conferencia en La Gestión del Ciclo Integral del Agua, Baeza 7 y 8 de abril de 2011, 49 pp.
- Gasmich, T., Girmscheid, G. (2005), *Härtstabilisation reduziert instand-haltungskosten von Tunneln (I)*. Tunnel 5/2005, 38-45.
- Gasmich, T., Girmscheid, G. (2005), *Härtstabilisation reduziert instand-haltungskosten von Tunneln (Tiel II)*. Tunnel 6/2005, 20-34.
- Leismann, F., Leucker, R., (2009). *Application of life-cycle-cost models for the optimization of maintenance costs in tunnels*. Proceedings ITA/AITES World Tunnel Congress 2009, Budapest, 10 pp.



CONSTRUCCIÓN ENERGÍA MINERÍA

OSSA es la empresa líder en el sector de las obras subterráneas con más de 60 años de experiencia en el desarrollo de todo tipo de grandes proyectos de Construcción, Energía y Minería.



C/ Aragoneses, 2-A, Pta. 3ª, Pol. Ind. Alcobendas. 28108 Alcobendas (Madrid)  
T. +34 902 678 808 | T. +34 917 823 400 | [www.ossaint.com](http://www.ossaint.com)

OSSA,  
MÁS DE **60** AÑOS  
HACIENDO CAMINOS  
BAJO TIERRA