

Ampliación de la línea 9 del Metro de Madrid a Mirasierra

Paso bajo unos colectores en servicio durante la ejecución del túnel



Beatriz Osuna Garrido

Arquitecta.
Directora de obra. D. G. de Infraestructuras de la Consejería de Infraestructuras, Transportes y Vivienda de la CAM



Fernando Díez Rubio

Doctor ingeniero de Caminos.
Asesor geotécnico de la USAC de la D. G. de Infraestructuras. Departamento de Geotecnia, Typsa



Pablo Ferrer Luciáñez

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Jefe de la Asistencia Técnica a la Dirección de Obra. Curva Ingenieros

Resumen

En este artículo se detallan las soluciones adoptadas (aplicación de diferentes tratamientos del terreno, instalación de instrumentación necesaria para la auscultación y correcciones en el propio sistema constructivo) para la ejecución de un nuevo tramo de túnel, correspondiente a la prolongación de la línea 9 del Metro, mediante el sistema tradicional de Madrid, que debe atravesar un suelo poco cohesionado en el que discurren, además, dos grandes colectores de aguas residuales.

Palabras clave

Túnel, tratamiento previo del terreno, instrumentación, control

Abstract

This article details adopted solutions (application of different ground treatment, installation of necessary instrumentation for the auscultation and corrections in the constructive system) for the execution of a new section of tunnel, by the Madrid traditional system, that must cross a low cohesive ground, coinciding with two great residual water collectors.

Keywords

Tunnel, previous ground treatment, instrumentation and control

1. Introducción

La prolongación de la línea 9 del Metro de Madrid por el norte, se ha realizado desde la estación de Herrera Oria y tiene por objeto dotar de este medio de transporte al barrio de Mirasierra, así como establecer una conexión intermodal entre el Metro y Cercanías, mediante la generación de un intercambiador constituido por la estación 2 (Paco de Lucía) y la nueva estación de Cercanías que ADIF ha previsto, para las líneas C-3, C-7 Y C-8, en las proximidades de la calle Costa Brava (figura 1).

La ejecución se ha llevado a cabo en dos fases, en la primera de ellas desde la estación de Herrera Oria hasta la estación de Mirasierra, ubicadas bajo las cocheras de El Sacedal y la segunda desde esta estación hasta el final de la línea en la Estación Paco de Lucía.

La actuación consiste en la prolongación del actual trazado de la Línea 9 de Metro de Madrid por el norte, a partir de

su estación final Herrera Oria, hasta el barrio de Mirasierra, mediante la construcción de un túnel de 1.900 m de longitud, dos nuevas estaciones y un fondo de saco para su explotación.

En marzo de 2011 se puso en servicio la primera fase del nuevo tramo, incorporando la actual Estación de Mirasierra a la red de explotación de Metro. En dicha fase se incluyó un tramo de 546 m de túnel nuevo, ejecutado mediante el método tradicional de Madrid.

En marzo de 2015 se ha puesto en servicio la segunda fase: estación de Paco de Lucía, ubicada en las proximidades de la calle Casta Brava y el tramo de túnel entre ambas estaciones, ejecutado por el mismo sistema constructivo, con una longitud de 1.330 m, a los que se suma el fondo de saco para maniobras a partir de la mencionada estación, con una longitud de otros 200 m (figura 2).



Fig. 1. Planta de la ampliación de la línea 9 hasta la estación de Paco de Lucía (estación 2)

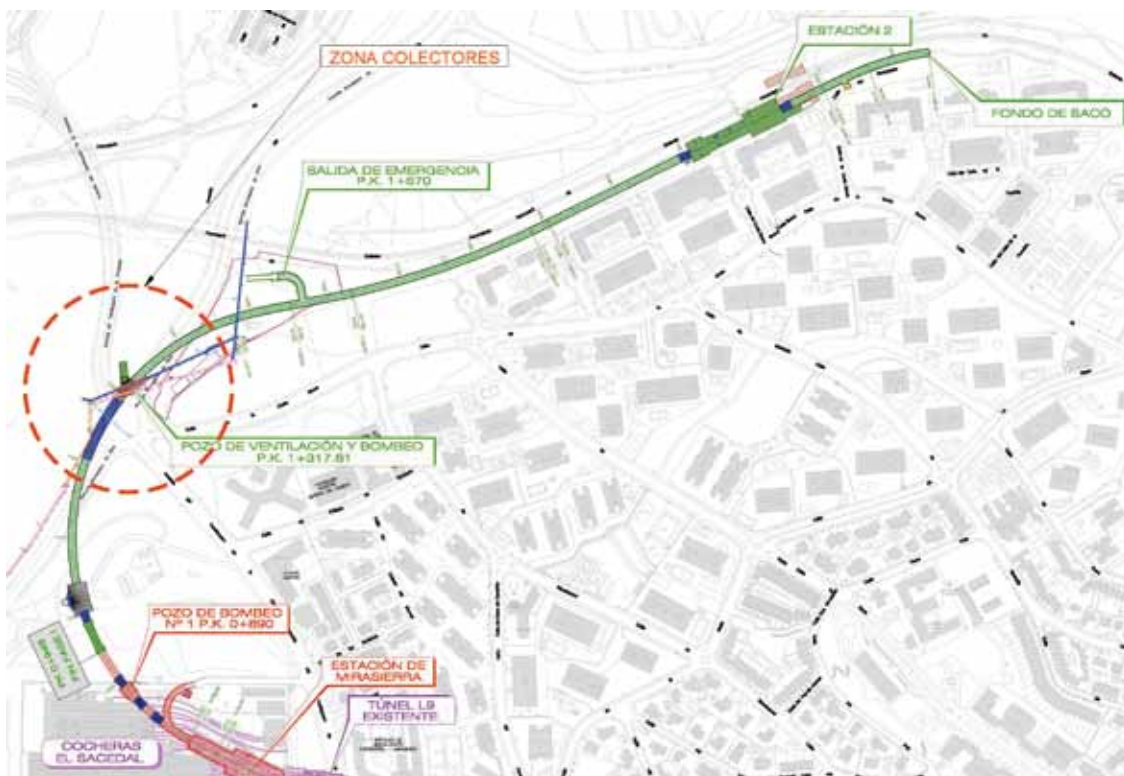


Fig. 2. Planta de la fase 2 entre las estaciones de Mirasierra y Paco de Lucía



Fig. 3. Perfil longitudinal geotécnico

2. Problema suscitado

En el tramo entre estaciones el túnel discurre en su mayor parte, bajo zonas verdes de creación relativamente reciente. Tanto los parques que atraviesa la traza como las calzadas, calle Monasterio de Silos y glorieta Pradera del Sacedal, se encuentran asentadas sobre antiguos vertederos formados por rellenos en los que predominan las arenas de miga típicas de la zona, sin compactar, junto a residuos de origen antrópico. Bajo este estrato superficial ya aparecen las alternancias de arena de miga y tosquiza bien consolidadas y con la cohesión suficiente para el procedimiento de ejecución previsto.

Pese a que el trazado diseñado, en su perfil longitudinal, profundiza con la pendiente máxima permitida para la explotación

de los trenes de Metro de Madrid, hay varias zonas en que la sección del Túnel atraviesa esta capa de rellenos, con una potencia próxima a los 20 m (figura 3).

Entre los puntos kilométricos 1+200 y 1+400 del trazado en planta, que corresponde en superficie con los mencionados viales de la rotonda de la Pradera del Sacedal y la calle de Monasterio de Silos, el Canal de Isabel II cuenta con dos colectores de gran sección que discurren muy próximos a la bóveda del túnel. Uno de los colectores (el del norte, figura 4) es cilíndrico con 2,5 m de diámetro y el otro es ovoide, con una altura libre de 1,70 m. Ambos cuentan, en el tramo de afección, con revestimiento de hormigón.

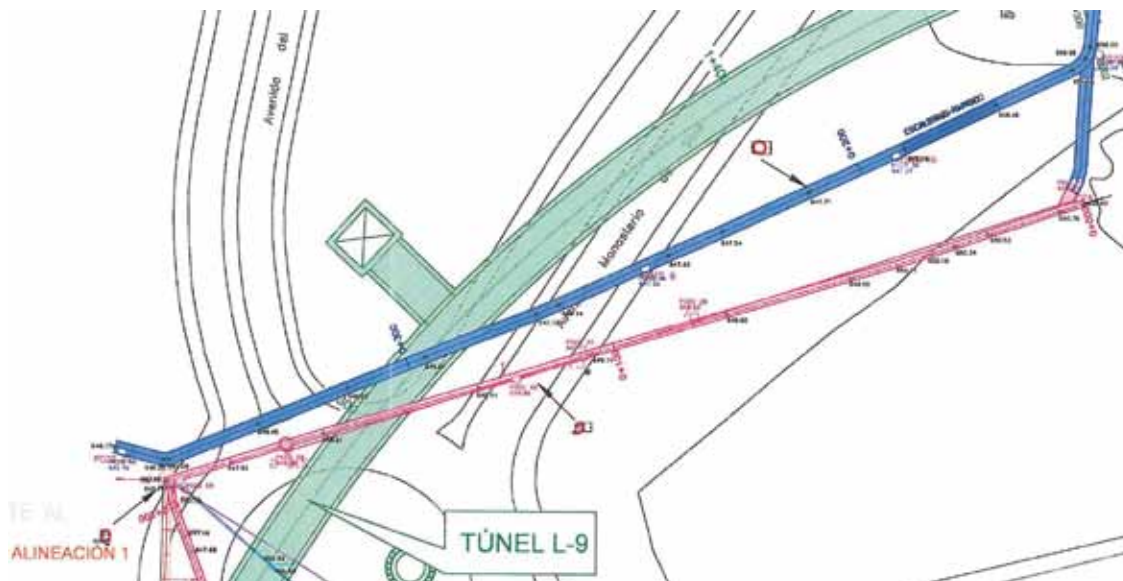


Fig. 4. Planta con trazado del túnel y los colectores

Los colectores se mantienen, en perfil, muy próximo al túnel de Metro, durante el tramo mencionado, a una distancia entre uno y dos metros por encima del túnel. El ovoide llega incluso a cortarlo en la zona de la bóveda de forma que, durante la excavación de la misma, aparecerá por la zona de conexión de ésta con un hastial e irá cruzando el avance en sucesivos anillos hasta salir por el hastial opuesto.

La existencia de estos colectores, sumada a los inconvenientes que ya hemos comentado en relación a las condiciones geotécnicas del subsuelo atravesado, provocaban un alto grado de incertidumbre en cuanto a la posibilidad de excavar y sostener el túnel sin aplicar determinadas medidas antes, durante y posteriormente a la construcción del mismo.

Se pueden establecer dos situaciones diferentes en función de la posición de los colectores respecto al túnel:

1. El colector, en este caso el ovoide, es coincidente con la propia sección del túnel (figura 5). Obviamente, la única solución

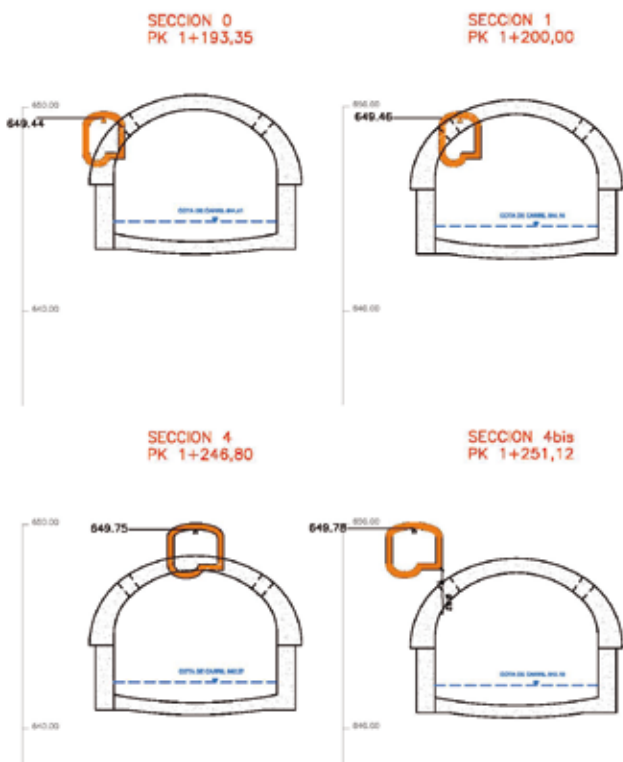


Fig. 5. Sección transversal con interferencia colector-túnel

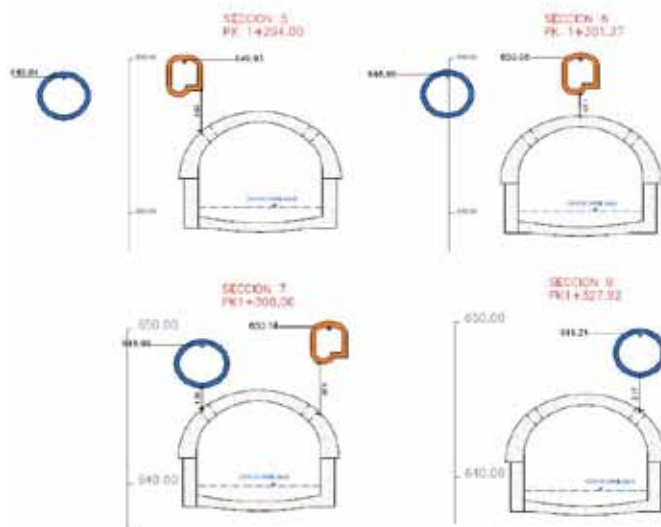


Fig. 6. Sección transversal túnel-colectores sin interferencia

posible en este caso consiste en efectuar el desvío del colector creando un tramo nuevo que sirva de “by pass” al mismo.

Conjuntamente a esta solución se deben analizar las consecuencias de efectuar la excavación del avance del túnel encontrando el colector, ya sin uso, en la bóveda.

De esta forma se podrán establecer los elementos que han de disponerse para conseguir eliminar los riesgos que esta excavación conlleva.

2. Los colectores se encuentran sobre el futuro túnel, a una distancia que oscila entre uno y dos metros de éste (figura 6). Hay que destacar en este caso que durante los años que llevan en servicio los colectores se pueden haber producido pérdidas de agua por sus juntas, provocando la aparición zonas reblandecidas de terreno bajo la solera de éstos. Teniendo en cuenta que ambos conductos están construidos en el estrato más superficial, de rellenos antrópicos, es necesario estudiar alguna forma de consolidar esta zona sobre la que se asientan los colectores y en la que se debe ejecutar la bóveda del túnel.

3. Soluciones adoptadas

Hace referencia a la segunda situación de las comentadas anteriormente. Antes de enumerar las medidas aplicadas para resolver el problema surgido hay que destacar que, como se aprecia en la figura 4, en la proximidad de ambos cruces, el proyecto prevé la construcción de un pozo de ventilación y bombeo que, ejecutado con anterioridad al paso del túnel,

puede ser aprovechado para proporcionar desde él algún tipo de tratamiento.

3.1. Auscultación

La primera medida emprendida para poder tener información de cuáles iban a ser los movimientos sufridos por las infraestructuras próximas fue la de analizar cuál ha de ser la instrumentación precisa para obtener la auscultación necesaria.

Para las calzadas ya se preveía en el plan de auscultación una serie de hitos de nivelación cada 50 m así como una sección de hitos profundos, colocados antes del cruce bajo los viales, que dan información sobre los asentamientos generados a diferentes profundidades.

En los colectores se dispone de una línea de electroniveles (figura 7) con lectura continua y remota, evitando de este modo la necesidad de acceder con aquéllos en servicio, lo que supondría un importante inconveniente, tanto por los permisos necesarios que ha de conceder el Canal de Isabel II, como por las malas condiciones de higiene y penosidad que ello implica. En el colector circular (colector A) se dispusieron 21 unidades de 3 m cada una, con una longitud total de 63 m y en el ovoide (colector B) fueron 16 unidades, con una longitud total de 48 m.

En cualquier caso, se colocaron en la zona de cruce, en el interior de ambos colectores, dispositivos (regletas y clavos de nivelación) como comprobación de la lectura proporcionada por los electroniveles. La frecuencia de lectura, por medios manuales, de los instrumentos dispuestos en el interior fue amplia, con el objeto de no tener que realizar entradas de forma continuada, por los riesgos e inconvenientes señalados.

3.2. Protección interior de colectores

Uno de los efectos que se pretende evitar es que la posibilidad de generar asentamientos diferenciales a lo largo de los tubos provoque la creación de resaltos en su solera, impidiendo su correcto funcionamiento. En ambos casos, se ha de disponer en los colectores algún elemento que les confiera rigidez en su sentido longitudinal, para que puedan funcionar como vigas.

La solución adoptada (figura 8) consistió en adosar cuatro perfiles UPN conectados con el revestimiento de hormigón de los colectores mediante anclajes de seguridad tipo HSL-3M.

3.3. Tratamiento del terreno

3.3.1. Inyecciones desde los colectores

Uno de los problemas que se pueden presentar al excavar la bóveda del túnel nuevo en la zona próxima a la solera de los colectores, es la posible presencia de zonas de terreno reblan-

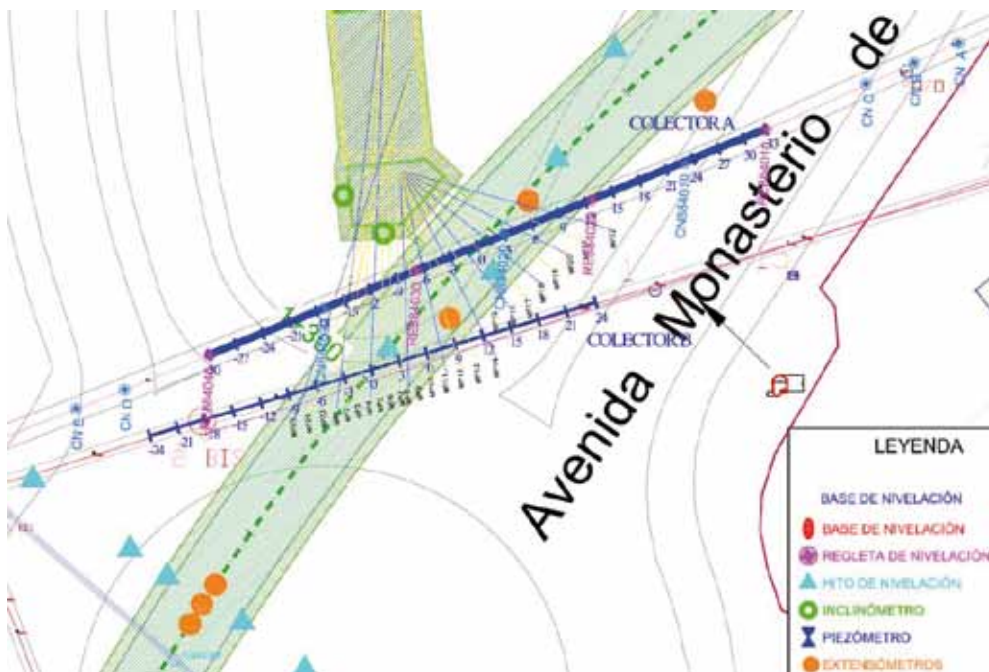


Fig. 7. Planta de la instrumentación dispuesta

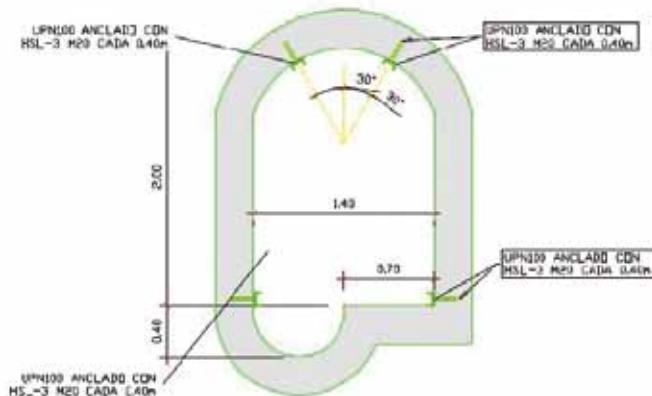
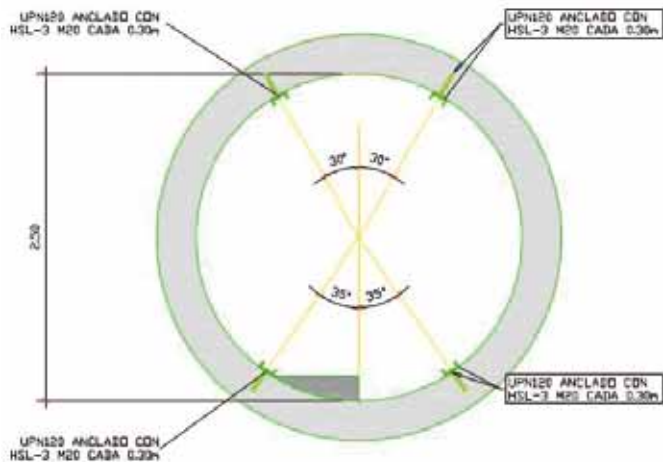


Fig. 8. Refuerzo interior de los colectores

decido, debido a las pérdidas ocasionadas, que se sumaría a unas características geotécnicas desfavorables, por tratarse de rellenos.

Ante tal eventualidad se diseñaron una serie de inyecciones (figura 9), a efectuar desde el interior de los colectores, en orden a consolidar y mejorar el terreno bajo ellos, que puede estar afectado por las pérdidas de agua y en el que se ejecute la parte superior del nuevo anillo para el túnel.

En la propia solera del saneamiento se efectúan grupos de 2 o 3 taladros de forma alternativa (aproximadamente cada 1,50 m) introduciendo un tubo de acero mediante el que se procede a la inyección, con una presión de 1,5 bares, de una lechada de agua/cemento con proporción 1/1, que debe ser ajustada durante el tratamiento en función de la admisión. La perforación es de 40 mm de diámetro y el tubo para la inyección, que se realiza en retirada para tratar toda la zona desde su extremo 1,5 m, y el propio colector, es de 32 mm.

En principio se marca un volumen máximo por taladro de 200 l, que será incrementando en una segunda pasada con una lechada más densa si se alcanza dicha admisión sin que la presión se incremente. La longitud de tratamiento en el colector circular es de 43,80 m y en el ovoide de 28,90 m con un número inicial previsto de 95 taladros en total.

3.3.2. Tratamiento desde el pozo de bombeo

En las proximidades de la zona de cruce de los colectores y el túnel, se ha ejecutado un pozo de ventilación y bombeo para la futura explotación del túnel de Metro. Dicho pozo se realizó

mediante pilotes de 1,20 m de diámetro y su profundidad, con objeto de poder instalar la cubeta de acumulación y las bombas para la evacuación del agua del túnel, es mayor que la propia contrabóveda del nuevo túnel.

Desde el pozo es posible realizar un tratamiento con micropilotes, casi horizontal, desde un punto del pozo de forma que consiga salvar tanto los colectores en su parte inferior, como la bóveda del túnel, sin tocar su límite superior. De esta forma, se propuso y ejecutó un paraguas de micropilotes (figura 10) cuya principal misión era generar una barrera entre el nuevo

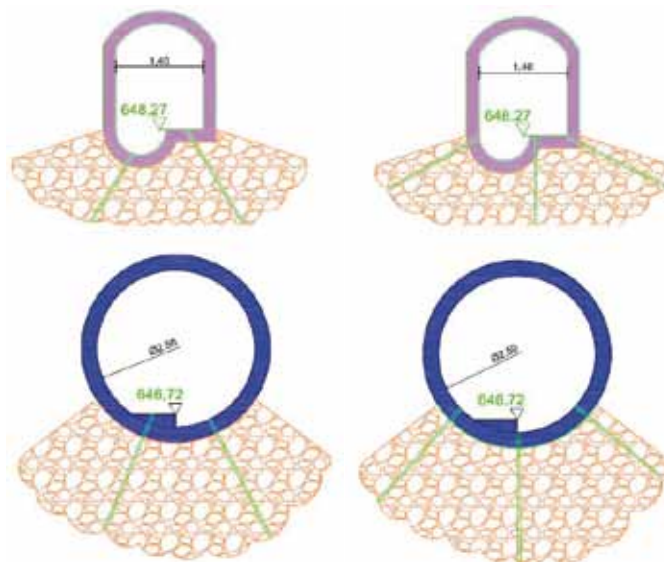


Fig. 9. Sección tipo de tratamiento colectores desde el interior

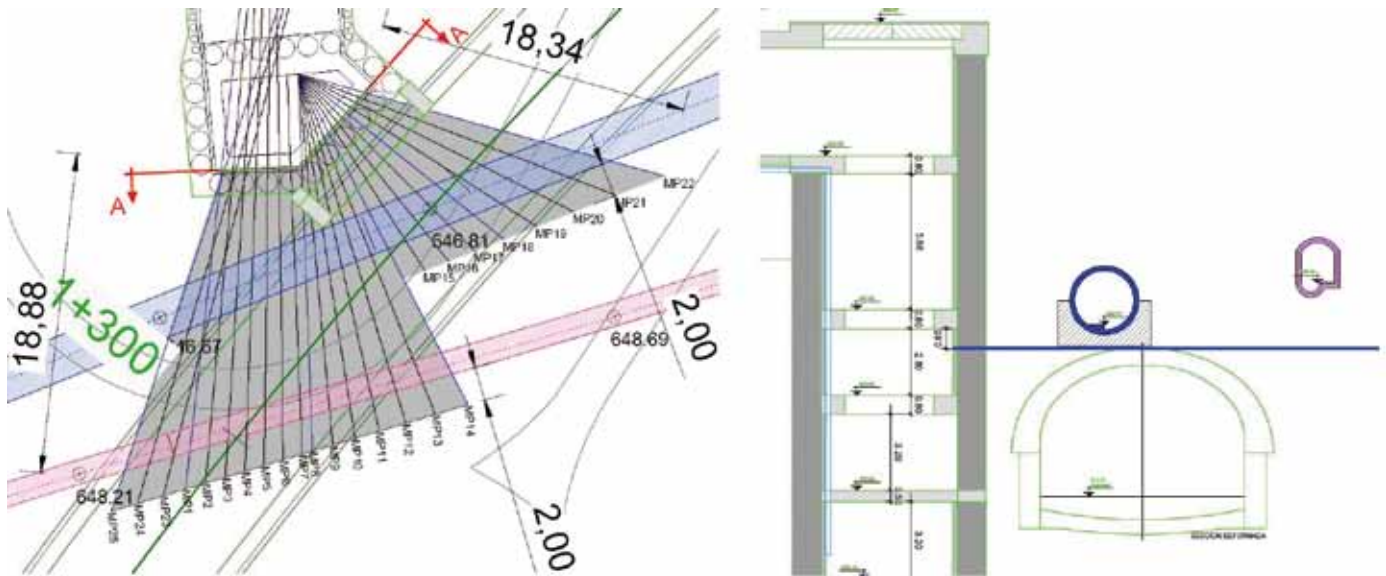


Fig. 10. Planta y sección tipo del paraguas de micropilotes

túnel y los colectores con objeto de cortar la cubeta de asientos provocada por la excavación del primero.

Las perforaciones efectuadas desde los paramentos del pozo son de 160 mm de diámetro y la armadura de los micropilotes está constituida por tubos de acero de 114 mm de diámetro con un espesor de 9 mm, teniendo la lechada de cemento para el relleno de la perforación una relación agua/cemento de 1/1,75. Teniendo en cuenta que el terreno que se ha de atravesar puede contar con una carga importante de agua por pérdidas en los colectores y además no cuenta con la suficiente cohesión para garantizar el retorno por el hueco que debe quedar exteriormente al tubo, se dispusieron obturadores separados cada 0,5 m, de forma que la inyección se pueda aplicar a través de ellos y se garantice la distribución de la lechada de cemento a lo largo de todo el taladro (inyección selectiva).

Además y gracias a la existencia de estos manguitos en los tubos, en caso de detectar movimientos importantes en los electroniveles dispuestos en el saneamiento, se podría efectuar una reinyección puntual de compensación de asientos.

El número total de micropilotes es de 25 y su longitud máxima de 22 m.

3.3.3. Sondeos de comprobación

Durante la ejecución del túnel se realizó un control continuo y sistemático de los movimientos, mediante los elementos de

auscultación instalados. Uno de los elementos que mejor y más completa información proporciona es la agrupación de hitos profundos, situados a distintas profundidades y en secciones estratégicas, como pueden ser las anteriores a un cruce importante con alguna infraestructura existente.

Antes de entrar en la zona donde coinciden los colectores y la calzada de la calle Monasterio de Silos, se dispuso de una de estas secciones (P.K. 1+484), en las que se podía controlar cuáles eran los movimientos generados por la excavación del túnel en su trasdós (-19,5 m), en las proximidades de los colectores (-7 m) y bajo la plataforma de la calzada (-12,5 m).

Se comprobó que, coincidiendo prácticamente con la llegada del avance del túnel a esta sección, se producía un asiento del terreno en todas las profundidades. Curiosamente el descenso fue superior, llegó a los 70 mm, en el extensómetro más superficial, mientras que en los dos más profundos, que mostraban el comportamiento en trasdós de bóveda y bajo los colectores, el movimiento registrado fue de 40 mm. Esta circunstancia corroboraba la hipótesis de que el material era mucho más cohesivo en los estratos más profundos que en las zonas próximas a superficie, conformadas por los mencionados rellenos antrópicos, hasta tal punto de que los movimientos aumentaban al ir ascendiendo en la sección.

Durante la ejecución de la bóveda no se produjo ninguna sobreexcavación y el terreno se comportó con las suficientes

características para poder llevar a cabo los trabajos de excavación y sostenimiento primario, sin incidencias reseñables.

Ante la posibilidad de que la excavación del túnel estuviera generando huecos importantes en el terreno y sobre todo, los produjera bajo la plataforma de la calzada a cruzar, se planteó una compañía de taladros verticales con el fin de detectar la aparición de pequeños huecos. Estos sondeos se efectuaron tanto en los tramos bajo zona verde como bajo la calle Monasterio de Silos, efectuando los correspondientes cortes de tráfico nocturnos, sin que se detectara ninguna oquedad de consideración. El relleno, mediante mortero de cemento fluido, constató que los volúmenes aportados eran los que correspondían a las dimensiones teóricas del taladro.

4. Incidencias durante la ejecución

4.1. Tratamiento desde colectores

El tratamiento desde la solera del colector circular se planteó comenzando con la inyección de los anillos de cada extremo, con objeto de conseguir un cierto efecto tapón. Tras comprobar que con la lechada 1/1 (agua/cemento en peso) se consumieron los 200 l previstos en cada taladro, sin que se apreciase un incremento de presión, se procedió a modificar la densidad de la misma. Tras varias operaciones con una mezcla que alcanzó la relación 1/1,75, se consiguió cerrar al llegar a una presión superior a los 2 bares en ambos extremos. Para continuar el tratamiento se adoptó una lechada 1/1,5 para el resto de las secciones, interrumpiéndose casi todas ellas al llegar a la presión prefijada, durante la segunda fase de inyecciones.

Durante la ejecución de los taladros se detectó que, bajo la solera de hormigón del colector, durante la construcción se había dispuesto una capa de grava que actuaba como lecho para la tubería.

Para el ovoide se procedió de igual forma con la diferencia de que, partiendo igualmente de la misma densidad de lechada (1/1,5) se fueron interrumpiendo todas las inyecciones durante la primera pasada con unos volúmenes algo inferiores a los 200 l.

4.2. Tratamiento desde pozo de ventilación

El paraguas de micropilotes efectuado desde el pozo de ventilación y bombeo se inició con los taladros de 160 mm de diámetro. Al concluir el primero de ellos se procedió a la instalación del tubo correspondiente que, como indicamos anteriormente, contaba con un diámetro de 140 mm. Pese a que estas opera-

ciones son inmediatas, la poca cohesión del suelo atravesado hizo imposible la introducción del tubo-manguito.

Al volver a taladrar ya se dispuso el correspondiente revestimiento para mantener las tierras, que debió ser metálica para ir clavándola a medida que avanzaba la perforación. Una vez concluido el taladro, ya sostenido, se comprobó que la introducción de los tubos de diámetro 114 era prácticamente imposible, ya que el espesor de la vaina necesaria, limitaba mucho el hueco disponible.

Tras sopesar la alternativa de incrementar el diámetro de la perforación, se decidió reducir el diámetro de los tubos-manguitos hasta los 90 mm, manteniendo su espesor de 9 mm, lo que no reduciría excesivamente la resistencia sin necesidad de abrir un hueco mayor.

4.3. Ejecución del túnel

Todas las actuaciones comentadas hasta el momento tenían por objeto poder ejecutar el nuevo túnel en las condiciones necesarias para garantizar la seguridad tanto de la propia excavación y sostenimiento de la bóveda como de las infraestructuras existentes: colectores y la calzada.

Previamente a la entrada del avance en el tramo más delicado, se diseñó un procedimiento que englobara todas las medidas que se debían aplicar durante la construcción del túnel y que diferían de alguna manera de la sistemática general que se viene adoptando en este método constructivo. Se pueden resumir en:

- Los avances a partir de la entrada en el tramo se reducen a 1,25 m, con lo que se adelanta el sostenimiento y la excavación se reduce al mitad.

- La distancia entre el último anillo hormigonado y el batache más cercano será de 9 anillos cortos. Con esta medida se pretende aproximar lo más posible el cierre de la sección, permitiendo así que pueda trabajar la sección completa así poder realizar la inyección de contacto en el trasdós.

- La inyección de contacto del revestimiento del túnel se efectuará como máximo a 8 anillos cortos por detrás del último anillo hormigonado. Para poder llevar a cabo esta medida sin que la lechada corra hacia el frente, impidiendo el trabajo en éste, se ha de aplicar una inyección de resinas acuarreactivas que forme un tape en forma de espuma sólida. Esta barrera se dispone en la junta del quinto anillo hormigonado de forma que, una vez materializada, la inyección de lechada de cemento debe

rellenar sólo los 3 anillos siguientes al del taladro y ascender hacia el inicio del túnel.

Las fases en que se realizó el paso bajo los colectores han sido (figura 11):

- Ejecución de la galería de conexión entre los colectores (bypass 2, con la misma sección que el ovoide) y se ejecutan los metros que faltaban entre ambos colectores (bypass 1)
- Desvío del caudal del colector de 2,5 m de diámetro a la galería por bypass 1 dejando el colector en seco. Ejecución de tratamientos en el interior del colector: inyecciones y refuerzo interior.
- Desvío del agua de la galería al colector por el bypass 2, dejando la galería seca. Ejecución de inyecciones y refuerzo interior en la galería.
- Paso del frente del túnel bajo el colector circular, para ello, previamente se ha desviado el caudal a la galería por bypass 1.
- Paso del frente bajo la galería, desviando previamente el agua por el bypass 2.
- Reposición del colector y galería a su estado original, eliminando refuerzo interior y sellado de todas las juntas.

- Reposición de los caudales por el colector y la galería, condenando las galerías de conexión realizadas (bypass 1 y 2).

5. Resultado de la auscultación

Como ya se ha indicado, tanto en el colector como en la galería se dispusieron electroniveles, de seguimiento continuo, y una serie de clavos de nivelación y regletas, para su comprobación mediante topografía convencional.

Los resultados en el colector (de 2,5 m de diámetro) y en la galería (ovoide de 1,7 x 1,40 m) es el que se muestra en las figuras 12 y 13 respectivamente.

Se puede apreciar que la información suministrada de forma instantánea por los electroniveles y la comprobación mediante topografía convencional era muy similar. En el colector norte (tubería de 2,5 m de diámetro) el máximo asiento fue de 16 mm, con una distorsión equivalente de 1/1.300; en el ovoide (galería sur) el asiento máximo fue de 30 mm, con una distorsión equivalente de 1/600.

En ninguno de los dos se observó, una vez ejecutado el túnel, ninguna junta abierta, aunque, por medida cautelar se decidió, como ya se ha comentado, sellar todas las juntas de ambos colectores.

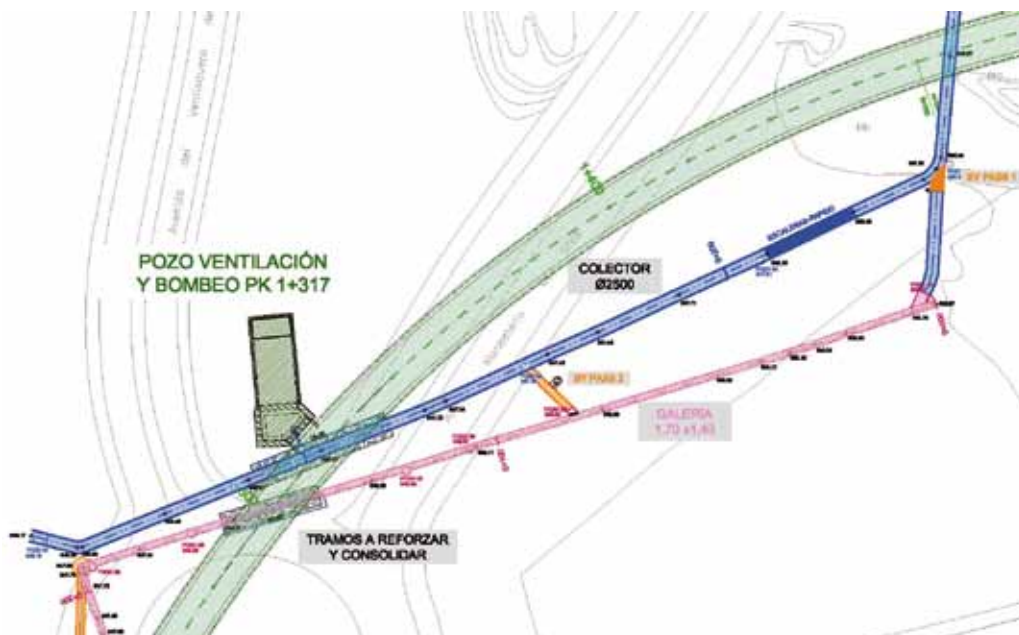


Fig. 11. Fases de ejecución y bypass entre colectores

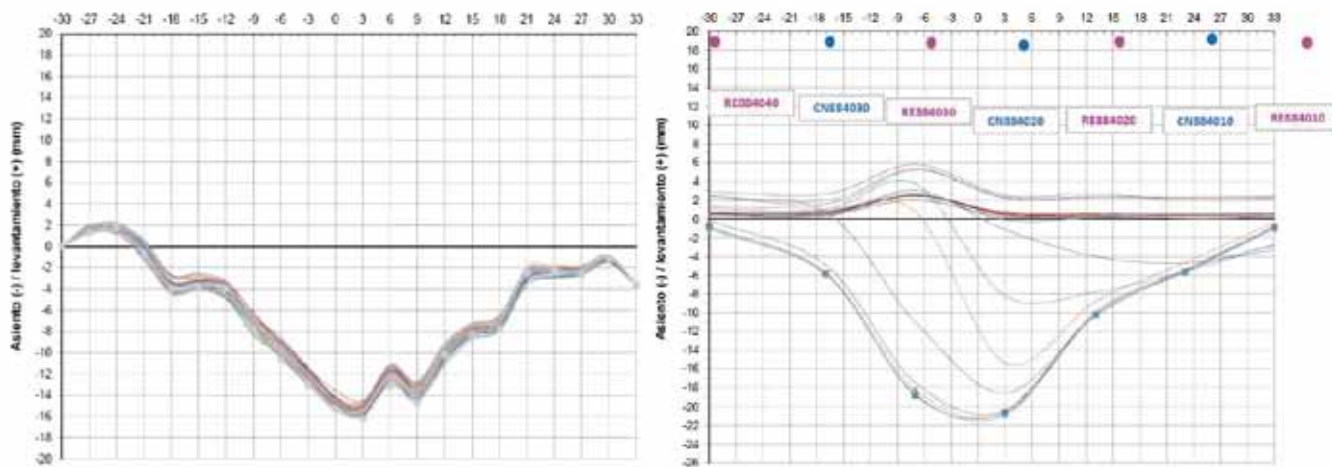


Fig. 12. Resultado de la instrumentación dispuesta en el colector: electroniveles (izda.) y topografía convencional (dcha.)

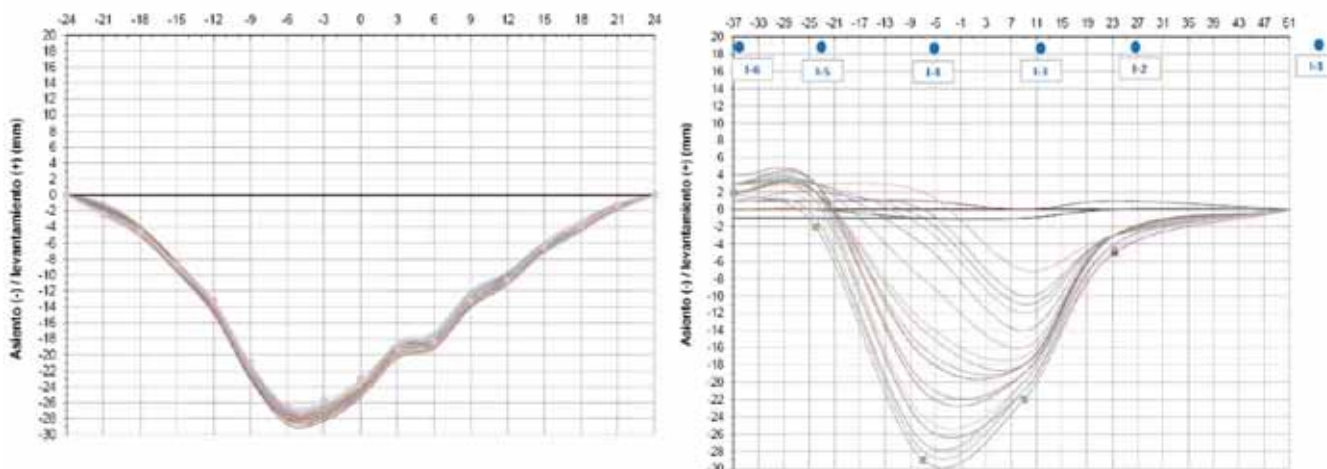


Fig. 13. Resultado de la instrumentación dispuesta en la galería: electroniveles (izda.) y topografía convencional (dcha.)

6. Conclusiones

Para poder resolver los importantes condicionantes que imponían tanto los colectores y viales que discurren próximos a la traza como las características geotécnicas del suelo atravesado, hay que destacar la ayuda imprescindible que suponen las técnicas de tratamiento del terreno. Aplicadas estas soluciones, tanto aisladas como en combinación, han permitido a los técnicos responsables de estas obras subterráneas diseñar y ajustar las medidas necesarias para finalizar la construcción del nuevo túnel de forma satisfactoria, sin afectar a las infraestructuras existentes.

7. Agradecimientos

Los autores quieren agradecer la colaboración prestada al director general de Infraestructuras: Raimundo Herraiz, al subdirector general de Obras: Manuel Ruiz de Velasco y a Oscar Miranzo, de la Dirección de Obra. Asimismo, al personal técnico de la UTE formada por Ferrovial y Sacyr, a sus diferentes gerentes: Joaquín Torres, Fernando Evangelio y Maximiliano Eisenberg y a los responsables de la obra: José Luis Lovera, Julián Pérez y Jaime Soria. A las empresas encargadas del tratamiento de los colectores: SITE y Geocisa y a la responsable de la empresa de auscultación, Empírica, Aurora Vázquez. **ROP**