

El Estanque de Tormentas de Arroyofresno



Elena de la Paz Cobos

Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos.
Ayuntamiento de Madrid



Carlos S. Oteo Mazo

Profesor doctor ingeniero de Caminos,
Canales y Puertos.
Catedrático de Ingeniería del Terreno



Pedro J. Romo Alcañiz

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.
MBA. Empírica Ingenieros



Fernando Triana Gracián

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.
Dragados

Resumen

El presente artículo describe el diseño y ejecución del Estanque de Tormentas de Arroyofresno (el más grande de Europa) y el colector anejo, un túnel de Ø 7,40 m, construido con tuneladora E.P.B. Además de los criterios de proyecto, se presentan los tratamientos del terreno que fueron necesarios para que el colector cruzara un río, pasara cerca de diversas instalaciones (en terrenos cuaternarios) y debajo de autopistas, así como los que fueron necesarios para unir el túnel con los pozos de servicios.

Palabras clave

Túneles, obras de agua urbanas, fundaciones de pilotes, refuerzo del suelo

Abstract

The article describes the design and construction of the Arroyofresno Stormwater Deposit (the largest of its kind in Europe) and the associated pipework, a 7.40 m diameter tunnel built by EPB TBM. A description is given of the design criteria as well as the soil treatment required for the passing of the pipeline through a river, alongside various installations (in quaternary soils) and below motorways, as well as those necessary to connect the tunnel to the service wells.

Keywords

Tunnelling, urban water works, pile foundations, soil reinforcement

1. Introducción

El Ayuntamiento de Madrid ha impulsado un plan de nuevas infraestructuras para la mejora de la calidad de las aguas del río Manzanares, contribuyendo con ello al objetivo prioritario de la mejora del medio ambiente. Se trata de un ambicioso plan sin precedentes en otra ciudad del mundo, del que forma parte el Estanque de Tormentas de Arroyofresno y que logra alcanzar una capacidad de almacenamiento y tratamiento de 1,3 millones de metros cúbicos de agua.

Las nuevas infraestructuras de las que ha sido dotada la ciudad de Madrid van a permitir que, en caso de grandes lluvias, estas aguas pluviales, junto con las residuales, no se dirijan al río Manzanares, ante la incapacidad de las depuradoras de absorber estos caudales punta en momentos de gran pluviometría.

Para ello, los nuevos estanques de tormentas almacenarán este agua, reteniendo la contaminación asociada, es decir, tanto la proveniente del lavado de viales, como de los sedimentos de los colectores de saneamiento que son arrastrados cuando aumenta el caudal en los mismos. Una vez finalizada la tormenta, los estanques se vaciarán gradualmente a las depuradoras en función de sus capacidades de tratamiento y serán éstas las que viertan el agua, una vez depurada, al río Manzanares.



Fig. 1. Situación de la obra en planta

Así se cumplen los parámetros exigidos de calidad de las aguas vertidas al río, establecidos por los organismos competentes españoles y europeos, siendo la ciudad de Madrid en este sentido pionera por haber logrado complementar el Sistema Integral de Saneamiento con estas nuevas infraestructuras.

2. La obra ejecutada

El conjunto de la obra que se describe en este artículo incluye:

- El Estanque de Tormentas de Arroyofresno, obra subterránea ejecutada con el sistema 'cut and cover', cuya capacidad de almacenamiento es de 400.000 m³ de agua.

- El colector de Arroyofresno, de diámetro interior 6,70 m y ejecutado con una tuneladora del tipo E.P.B., de la casa Lovat. Su longitud es superior a 3 km y tiene un revestimiento prefabricado con dovelas de hormigón armado de 0,25 m de espesor.

- El partidor de Arroyofresno, necesario para desviar las aguas hacia el estanque de tormentas, a través del nuevo colector de Arroyofresno, permite derivar un caudal máximo de 100 m³/s y tiene unas dimensiones en planta de unos 70 × 17 m en su tronco lateral y de 110 × 7 m en la conexión con los colectores, con una profundidad máxima de 16 m.

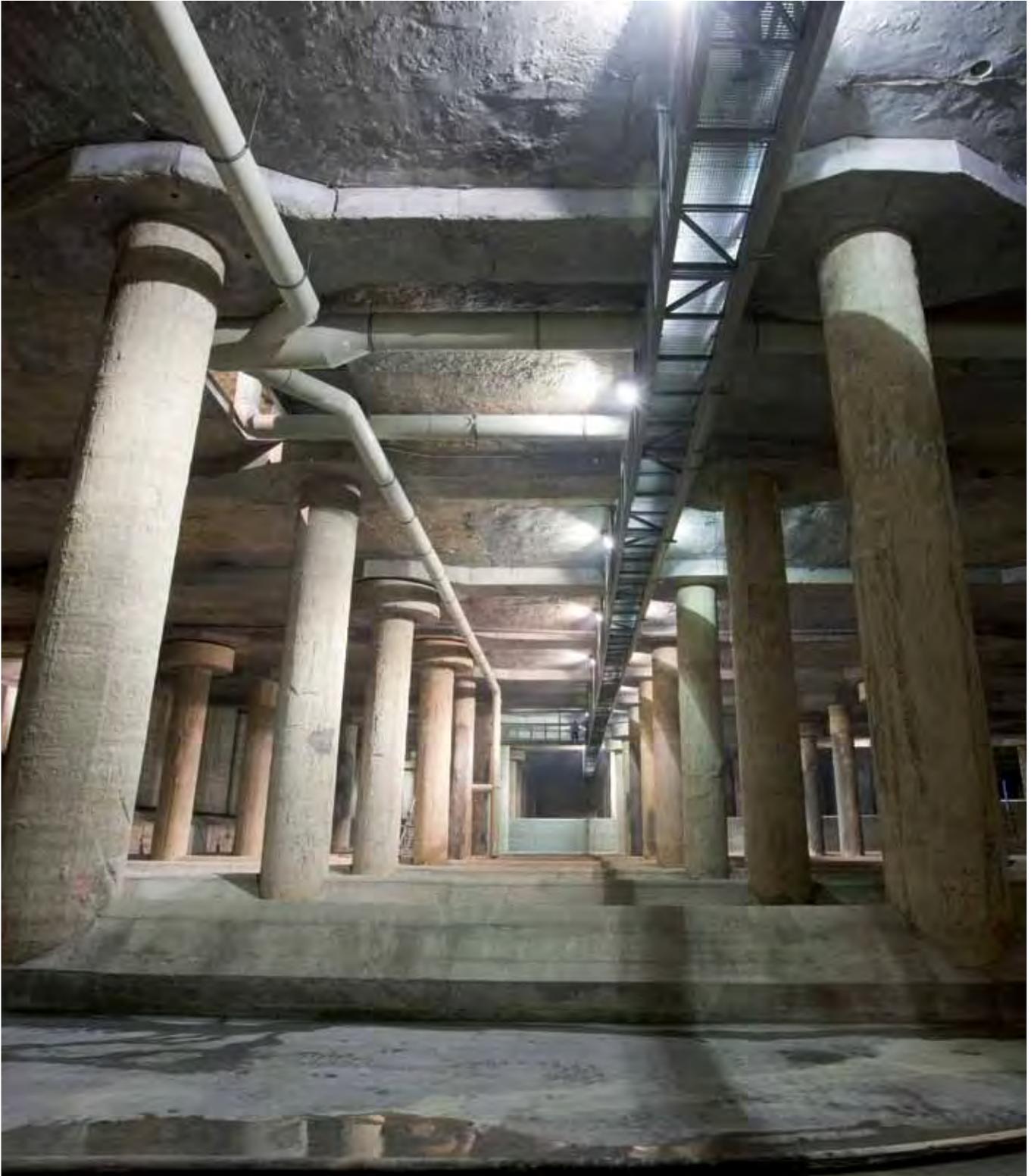
En la figura 1 se reproduce, en planta, la situación de estos tres elementos, pudiendo observarse como el nuevo colector pasa bajo el río Manzanares, bajo la A-6 y bajo Calle 30.

3. Marco geomecánico

Antes de proceder a la descripción de los tres elementos mencionados, se ha creído conveniente mostrar el marco geomecánico que 'envolvía' todas las actuaciones.

Los terrenos afectados por la construcción de las obras son los típicos del noroeste de Madrid: depósitos del terciario detrítico (pliocénicos), con diferentes contenidos de finos, esto es, alternancias de arenas de 'miga' (<25 % de finos), arenas 'tosquizas' (finos entre 25 % y 40 %), "toscos" arenosos (40 % a 60 % de finos) y 'toscos' (más del 60 % de finos), en secuencias pseudohorizontales y con extensiones muy variables, ya que todos estos materiales detríticos proceden de la erosión, arrastre y deposición de materiales graníticos de la sierra de Guadarrama.

Estos materiales suelen estar recubiertos por material aluvial, en este caso, por la influencia del río Manzanares y del arroyo Fresno y rellenos antrópicos, que suelen ser flojos y heterogéneos, con un nivel freático relativamente alto, sobre todo en las proximidades del estanque de tormentas.



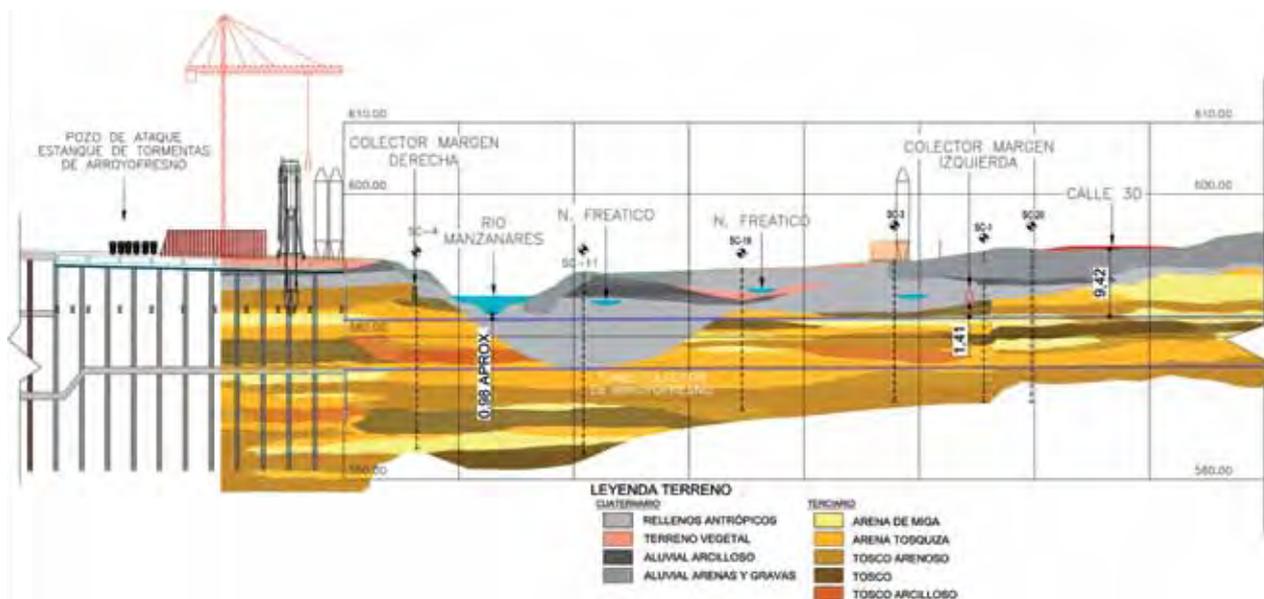


Fig. 2. Corte geotécnico en el extremo del estanque de tormentas e inicio del túnel (zona del río Manzanares)

En la figura 2 se ha representado un corte geotécnico de una zona que incluye una parte del estanque de tormentas y el inicio del colector, en el que puede verse la situación del río Manzanares y la de Calle 30. Se han dibujado las pilas-pilote del interior del estanque y la situación relativa del túnel respecto al terreno. Como se aprecia en dicha figura, al comienzo del túnel su sección queda completamente en terreno cuaternario, junto al río, manteniendo su clave en el fondo del aluvial hasta pasar la Calle 30, lo que introdujo serias dificultades para la construcción del túnel, como más adelante se indica.

La presencia de capas de arena de 'miga', muchas veces con agua, en la zona del estanque, introdujo problemas en la ejecución de los pilotes y pantallas de esta parte de la obra, lo que dio lugar a perforar con bentonita y, aun así, hubo que hacer algunas reparaciones en las cimentaciones profundas.

4. Construcción del estanque de tormentas

El estanque de tormentas es un prisma subterráneo de 35.000 m² de superficie, (o sea, equivalente a 5 campos de fútbol, ver Fig. 1) y una profundidad media de 22 m, (equivalente a un edificio de 7 plantas), distribuido en dos niveles, el de instalaciones de 8 m de altura media y el depósito propiamente dicho de 14 m. Todo esto supone un volumen total de construcción subterránea de cerca de 720.000 m³ de los cuales 400.000 m³ están destinados al almacena-

miento de agua proveniente de los colectores en periodo de tormenta. El recinto exterior está formado por 29.700 m² de muros pantalla de 30 m de profundidad media. Además, en el interior de este recinto, se perforaron 267 pilas-pilotes de hormigón armado, de 1.500 mm de diámetro y 36 m de longitud, que sirven de soporte a la losa de cubierta y la losa intermedia o de instalaciones.

Las grandes restricciones de espacio, el tipo de terreno y la situación de la obra, junto al río Manzanares, en una zona de especial protección, llevaron a pensar que el método óptimo para ejecutar el estanque debía ser el método de 'cut and cover', mediante un recinto exterior de pantallas que asegurara la estanqueidad del depósito y redujera al mínimo la afección y la consiguiente excavación necesarias para ejecutar el proyecto, de ahí la solución antes descrita.

El método de 'cut and cover' en el estanque tuvo siete fases (Fig. 3):

1. Desbroce y excavación hasta cota inferior de la losa de cubierta.
2. Ejecución del recinto perimetral de pantallas y de las pilas-pilote interiores.
3. Ejecución de la losa de cubierta sobre el terreno.



4. Vaciado del terreno bajo la losa de cubierta hasta el nivel de la losa del nivel de instalaciones.

5. Ejecución de la losa del nivel de instalaciones apoyada en el terreno y conexión a las pilas-pilote.

6. Vaciado del terreno bajo el nivel de instalaciones hasta el nivel de la losa de fondo.

7. Ejecución de la losa de fondo, muro perimetral y el muro divisorio.

Este método se ha empleado en Madrid con gran profusión para la ejecución de aparcamientos subterráneos y estaciones de metro, pero casi nunca con semejantes volúmenes.

Dadas las complicaciones técnicas, operativas y de plazo que presentaba el proyecto, hubo que planificar detalla-

damente el trabajo, con el fin de reducir al mínimo el plazo total de ejecución y permitir la continuidad entre las labores de ejecución de las losas y las excavaciones, iniciándose los trabajos de excavación una vez que se había ejecutado una cantidad razonable de losa, consiguiendo así reducir notablemente el plazo.

Lo primero que se planificó fue la secuencia en la ejecución de pantallas y pilotes de forma que se pudiera iniciar, lo antes posible, la ejecución de la losa sin que todas las pantallas y los pilotes estuvieran finalizados. Se inició la construcción de las mismas desde el lado más cercano al río Manzanares hacia el más alejado, secuencia que se repite en todos los demás trabajos.

Como se indicó en el capítulo anterior, la presencia de arenas de 'miga' con agua originó algunos problemas de estabilidad del terreno durante la perforación de las pilas-pilote.

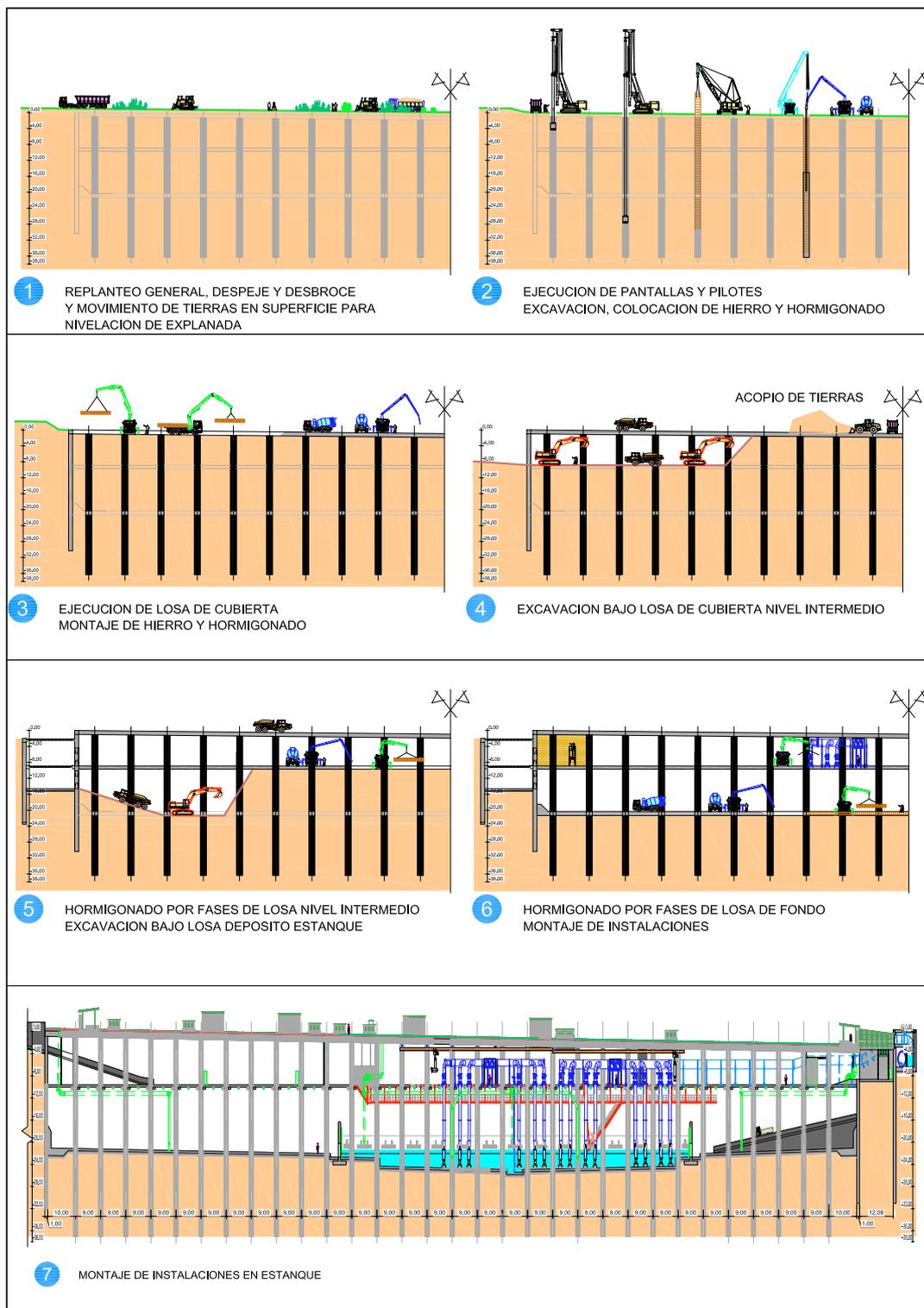


Fig. 3 Fases constructivas del estanque de tormentas

Ello obligó, durante las fases de excavación, a reforzar los afectados, un total del 3 % del total. Ello se llevó a cabo según el tipo de daños inducido. En la Fig. 4 reproducen los tres tipos de soluciones utilizadas. En la solución 1, la pila se reforzaba con una camisa de chapa unida al pilote por conectores. En la solución 2, se zunchaba el pilote con un forro de hormigón armado. En el último caso, la solución 3, se inyectaba alrededor del pilote para aumentar su constricción lateral.

Una vez que las máquinas de pantallas y pilotes se habían alejado suficientemente, se iniciaron los trabajos de ejecución de losa de cubierta. Esta losa es de tipo aligerada, de hormigón armado. El aligeramiento se realizó mediante cilindros de poliestireno expandido.

Primero se llevaba a cabo una nivelación del terreno, posteriormente se colocaban rastreles de madera y se vertía mortero entre ellos, usando dichos rastreles como guía para lograr una buena superficie de apoyo. A continuación, se colocaban tableros de madera con acabado fenólico sobre el mortero, que se aseguraban clavándolos a los rastreles.

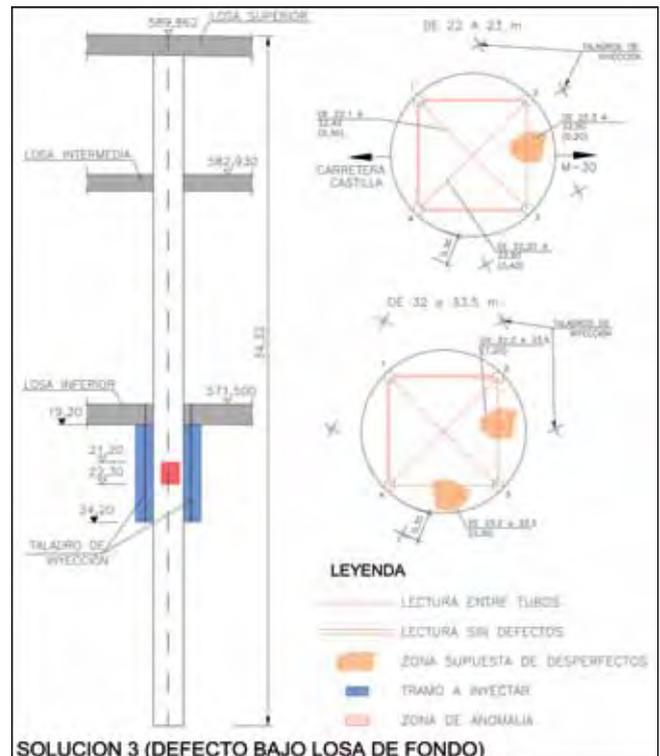
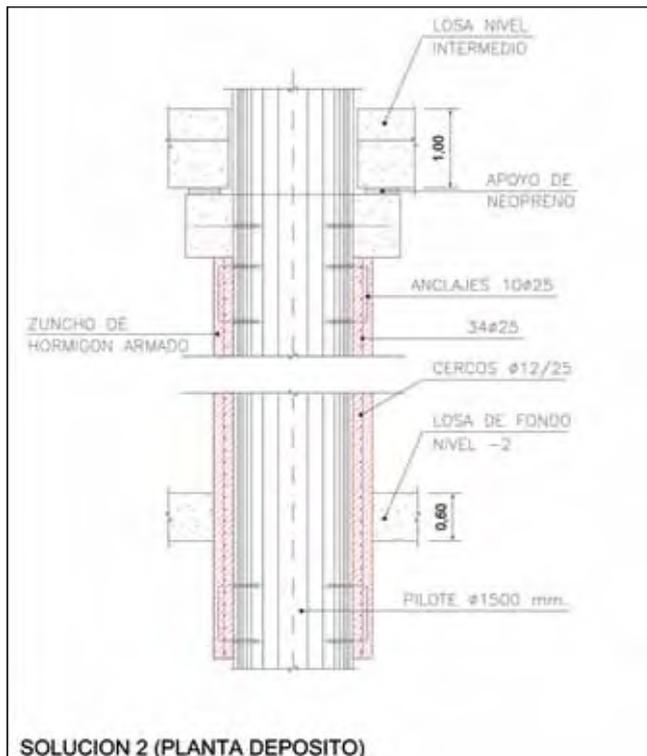
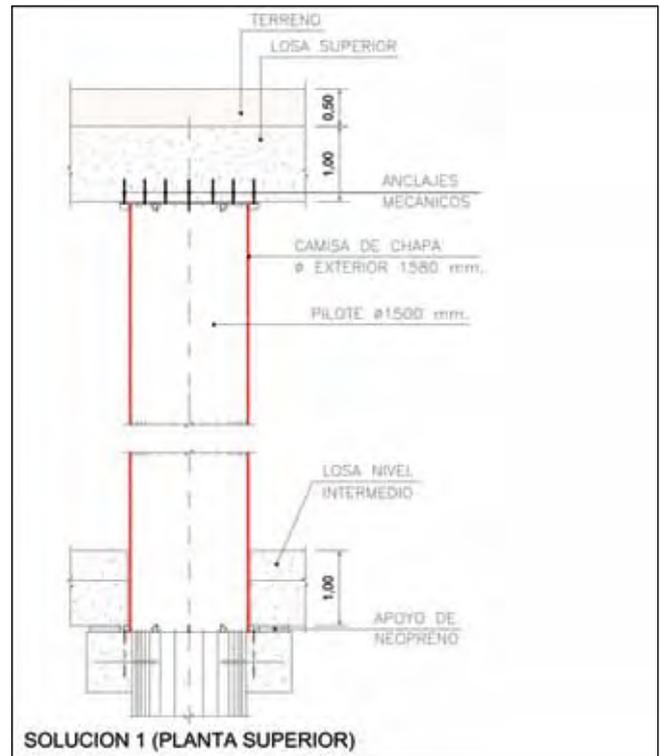


Fig. 4 Reparaciones de pilas-pilote

Una vez que ya se había ejecutado una parte importante de la losa de cubierta –aproximadamente un tercio–, se iniciaron los trabajos de excavación bajo la misma, reduciendo así considerablemente el plazo de la obra.

La tarea más difícil de las que se plantearon para la ejecución del estanque fue la excavación. Hubo que planificarla cuidadosamente, ya que había que sacar los 720.000 m³ de tierras del estanque con un coste razonable, en el corto plazo del que se disponía y cumpliendo con todos los requisitos medioambientales de gestión de vertidos de inertes, sin afectar a viales e instalaciones deportivas próximas.

Los 720.000 m³ de tierras procedentes de la excavación del estanque se reutilizaron en la ejecución de los terraplenes de los viales y relleno de parcelas en urbanizaciones de la zona sur de la Comunidad de Madrid, evitando así tener que llevar a vertedero el enorme volumen de tierras.

El vaciado bajo losa se realizó con medios de excavación y transporte más propios de movimiento de tierra a cielo abierto que de este tipo de trabajos ‘cut and cover’ empleándose retroexcavadoras de 35 Tn o *dumpers* extraviales articulados de 40 Tn, que podían maniobrar entre las pilas-pilotes.

Fue necesario construir una rampa por la que se pudiera acceder a los dos niveles con el ancho y la pendiente apropiados para permitir el intenso tráfico de camiones que la excavación del estanque y el hormigonado de las losas iba a generar.

El material sacado del interior del estanque se vertía en un acopio intermedio para su posterior carga a camiones articulados tipo bañera. Se construyeron caminos de acarreo para sacar las tierras del Club de Campo Villa de Madrid sin usar los viales existentes, incluso fue necesario construir un puente provisional sobre el río Manzanares para poder absorber el intenso tráfico de más de 135 camiones nece-



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.



sarios para poder sacar las tierras de la excavación, más el tráfico de camiones de entrada con los suministros de hormigón, acero, madera etc. Gracias a estos potentes medios se pudieron obtener los elevados rendimientos obtenidos en la excavación y cumplir los ajustados plazos de tan solo 9 meses para la excavación total del estanque.

Al igual que ocurrió en las demás fases de la obra una vez que ya se había excavado una parte importante del primer nivel del estanque, aproximadamente el 50 %, y ya se había terminado de ejecutar la losa de cubierta, empezaron los trabajos de construcción de la losa intermedia. En este caso, la losa era de canto constante de 40 cm de espesor, excepto unas vigas descolgadas con un canto de 1 m, que unían las pilas según el lado más corto.

Se volvió a repetir la secuencia y, en cuanto hubo suficiente losa intermedia ejecutada, comenzaron los trabajos de excavación del nivel de depósito. En este caso, y dado el enorme volumen de tierras a extraer y la intensidad de tráfico para transportar el escombros al exterior, no se iniciaron los trabajos de ejecución de la losa de fondo hasta que se hubo terminado la excavación de dicho nivel.

Una vez terminada la excavación del nivel de depósito se inició la ejecución de la losa de fondo, que es de tipo drenada para evitar la subpresión, de más de 16 m.c.a. Se dispuso un geotextil sobre el terreno, una cama de grava de 30 cm de espesor, una lámina de polietileno de separación y por último, una losa de hormigón armado de 40 cm de

espesor constante. El agua que llega a la grava se drena a través del pozo de bombeo de vaciado del estanque. Se han dispuesto además válvulas de retención de bola a lo largo de esta losa para asegurar que, de no funcionar el drenaje de la capa de grava, la subpresión se libere sin romper la losa.

Terminada la estructura del depósito se iniciaron las instalaciones de explotación del estanque, compuertas de entrada y separación de zonas, instalaciones de bombeo, ventilación, equipos eléctricos, de telecontrol, etc.

5. El túnel del nuevo colector de Arroyofresno

El gran estanque de tormentas es alimentado por el nuevo colector de Arroyofresno, cuyas dimensiones son acordes a las de aquel, al ser el de mayor sección de toda la ciudad de Madrid, junto con su gemelo del baipás de Abroñigales. Con una longitud de más de tres kilómetros, tiene una sección circular de 6,70 m de diámetro interior, la cual permite el paso de un caudal de agua de 100 m³/s (Fig. 5).

La gran longitud del túnel, junto con los condicionantes de plazo y la escasez de zonas disponibles en los que ubicar pozos de ataque intermedios, aconsejó el empleo de una máquina tuneladora, la cual, dado el exigente trazado en cuanto a puntos singulares y zonas de baja cobertura sobre clave, junto con las buenas experiencias previas, recomendaba que fuera del tipo EPB. La elegida para esta ocasión fue una vieja conocida en Madrid: la Lovat M-288 SE, más conocida como 'Cibeles'.

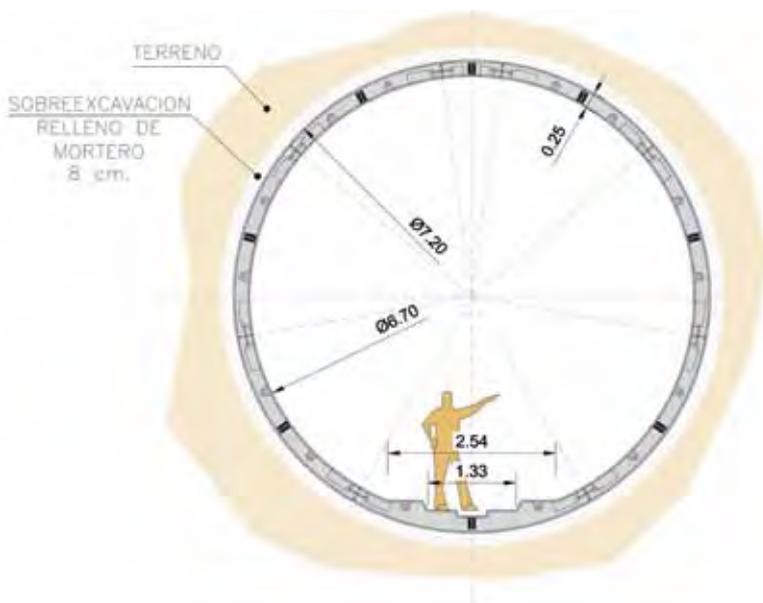


Fig. 5. Sección transversal del túnel del colector de Arroyofresno

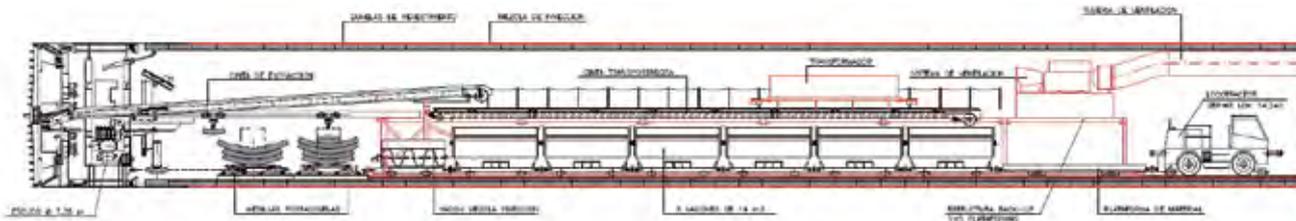


Fig. 6. Sección longitudinal de la tuneladora Lovat

El diámetro de excavación de Cibeles es de 7,38 m y en su avance instala anillos de 1,20 m de longitud, formados por 8 dovelas de hormigón armado de 25 cm de espesor (Fig. 6). El anillo de dovelas es del tipo izquierda-derecha, es decir, solo hay dos tipos de anillo, uno a izquierdas y otro a derechas. Si el trazado es recto, se colocan alternativamente un anillo de derechas y otro de izquierdas. En este anillo la dovela de base y la de clave siempre son iguales. Una vez instalado el anillo de revestimiento, la máquina dispone de un sistema de bombeo de mortero de cemento para rellenar el hueco remanente o *gap*, entre el trasdós de las dovelas y el terreno. La inyección de este mortero se realiza a través de un orificio existente en el centro de cada dovela.

Una de las características de las máquinas tuneladoras es que la horquilla de tipos de terreno en la que puede emplearse cada modelo es bastante estrecha. Es decir, una máquina diseñada para excavar terrenos muy blandos no tiene igual rendimiento en suelos muy duros y puede ser incapaz de excavar roca. Una tuneladora buena en suelos granulares

puede ser ineficaz en suelos cohesivos muy plásticos. Este hecho supone, sin duda, un problema para la elección de la máquina cuando las características del terreno atravesado cambian a lo largo del trazado. En estos casos, es preciso evaluar cuáles son las condiciones más probables en las que va a trabajar la máquina y considerar si esta será capaz de superar los tramos más desfavorables, sola o con ayuda en forma de cambios en los métodos constructivos o de tratamientos del terreno.

En el caso del colector de Arroyofresno, el trazado discurre principalmente por los suelos tosquizos de Madrid. En este terreno, la tuneladora Cibeles tiene un rendimiento simplemente espectacular. Habiendo ejecutado previamente más de 15 km de túnel en obras tales como la construcción del Pasillo Verde ferroviario o las ampliaciones del Metro de Madrid, basta decir que, operada por el mismo equipo humano, consiguió el récord mundial de avance de tuneladoras EPB en su diámetro, logrado durante la construcción del tramo Mar de Cristal-Recintos FERIALES de la línea 8 del Metro de Madrid, posteriormente superado.

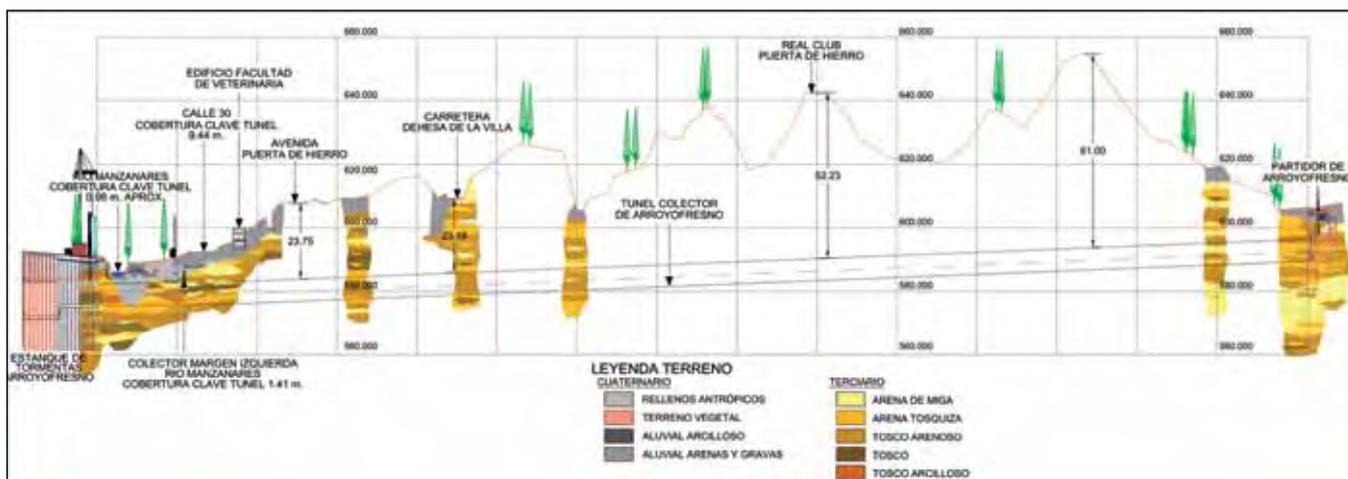


Fig. 7. Corte geotécnico del trazado del túnel

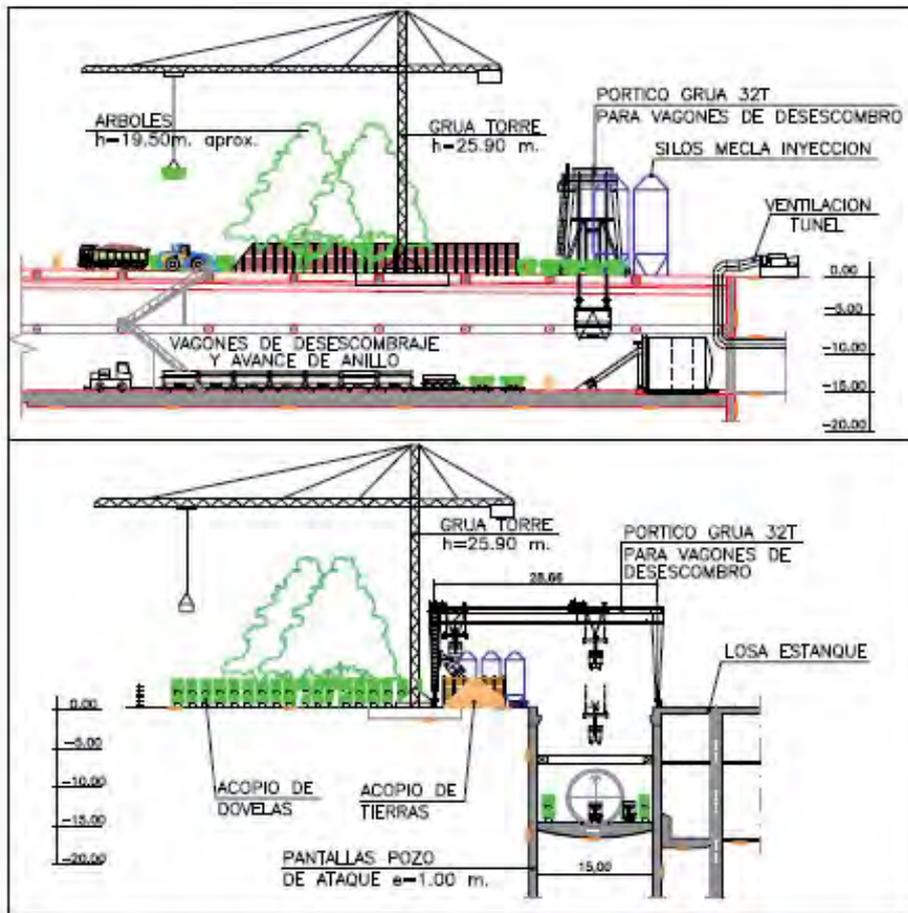


Fig. 8. Pozo de ataque de la tuneladora dentro del estanque de tormentas

Sin embargo, la parte inicial del túnel discurre por suelos aluviales o suelos tosquizos con coberturas muy reducidas sobre la clave del túnel, además de pasar muy cerca de cimentaciones de edificios y bajo autopistas, antiguos colectores y el río Manzanares. Este difícil trazado no se debió a un capricho del proyectista, sino que, para juzgarlo, hay que considerar las enormes restricciones al trazado en planta y, sobre todo, en alzado, de un túnel hidráulico como el que nos ocupa. Evidentemente, los puntos de comienzo y finalización del colector eran fijos e inamovibles, así como algunos puntos intermedios en los que era posible la ubicación de pozos de registro, por lo que el reducido rango de pendientes admisibles para mantener una adecuada velocidad de las aguas dentro del colector dictaba el trazado. En la Fig. 7 se ha reproducido el corte geotécnico a lo largo del túnel. Hay zonas con menor número de sondeos por problemas de ocupación en superficie, no obstante se consideró que se disponía de la información necesaria para perforar el túnel con la tuneladora prevista.

El túnel comienza atravesando la pantalla perimetral del Estanque de Tormentas de Arroyofresno, que hace en este caso la función de pozo de ataque (Fig. 8), y avanza en el sentido contrario al de circulación del agua, con ligera pendiente ascendente del 0,15 %. En el punto de partida, el frente del túnel se encuentra por completo en un plioceno de buena calidad (Fig. 2), aunque con poca cobertura de este terreno sobre clave, dado que a menos de medio diámetro por encima del túnel se encuentra ya alterado. La excavación se realiza, dada la proximidad al río Manzanares, bajo el nivel freático. En esta zona se pasa por debajo del muro de cerramiento del Club de Campo y del colector de margen derecha del río Manzanares.

Apenas 35 m más adelante se encuentra el propio río Manzanares, el cual se cruza alrededor de 1 m por debajo del fondo de su cauce (Fig. 9). Este cauce es el cauce actual, no el histórico, que ha sufrido desvíos por la construcción de la

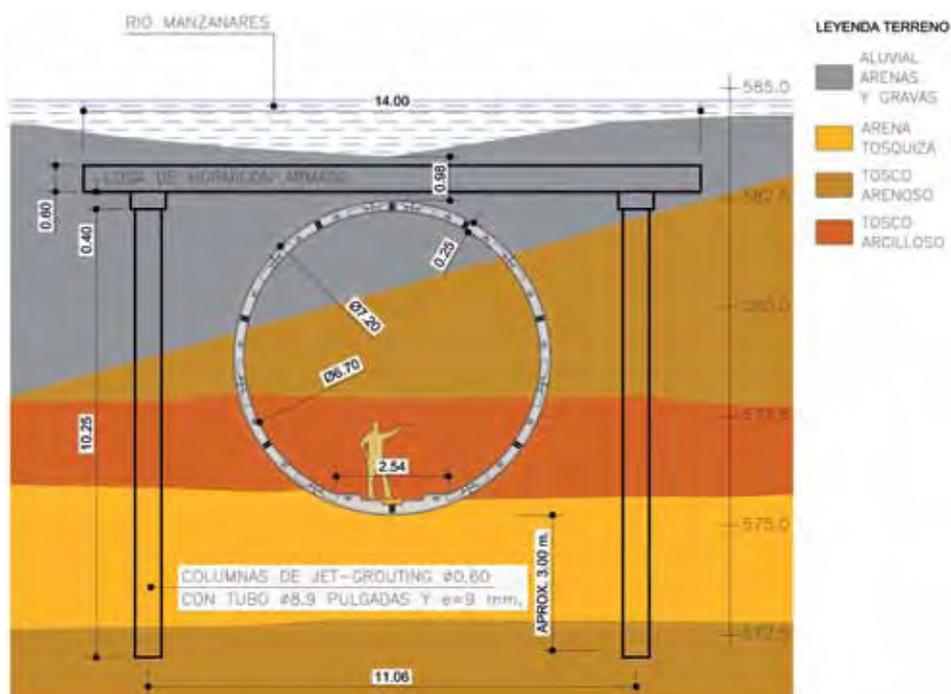


Fig. 9. Paso del túnel bajo el río Manzanares

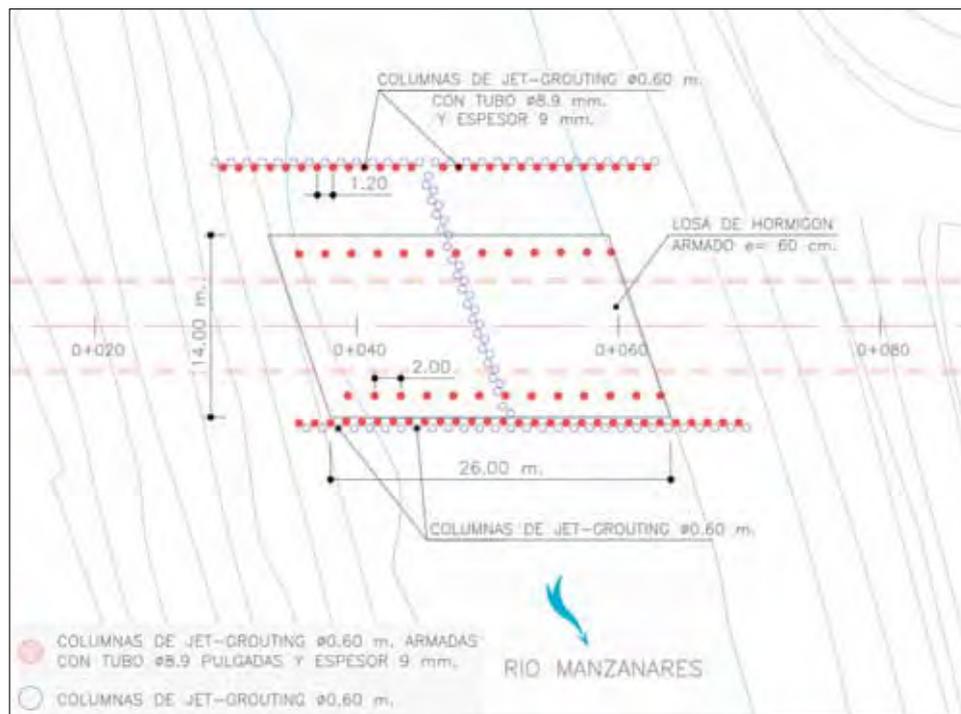


Fig. 10. Cruce del río Manzanares y construcción de la losa superior de hormigón armado

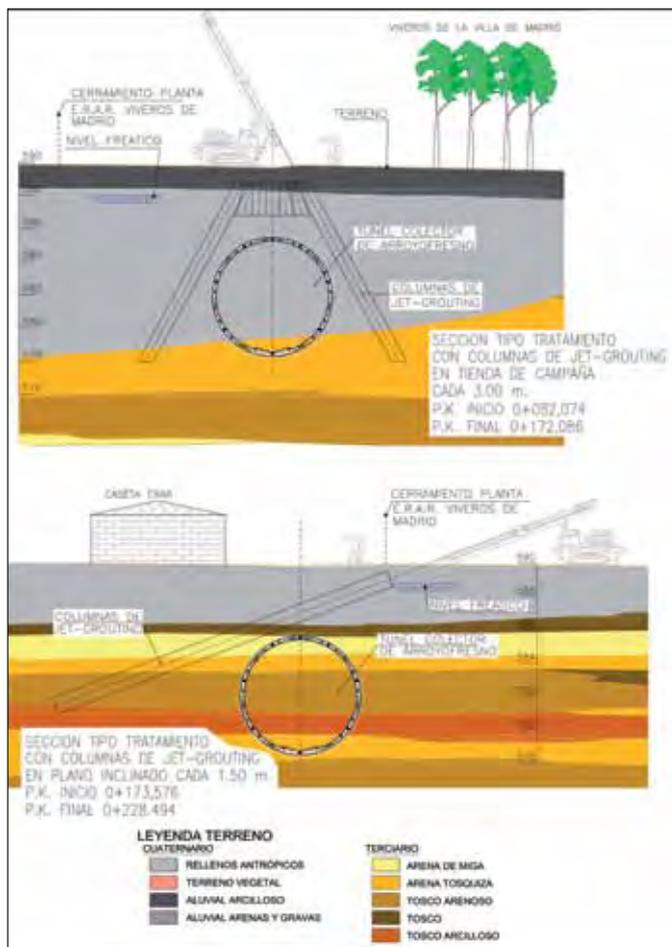


Fig. 11. Paso junto a la depuradora de Viveros y protección de la instalación

Calle 30 y de la depuradora de Viveros, por lo que la llanura aluvial se extiende mucho más allá (Figs. 2 y 7). Por este motivo, en esta zona y durante los siguientes 150 m, la excavación se realizó en suelos aluviales muy blandos a lo largo del llamado camino de Viveros, con diversos problemas.

El propio cruce del río Manzanares necesitó la ejecución de una losa de hormigón armada, cimentada sobre columnas de *jet-grouting*, por dos motivos: a) evitar la flotación del túnel y b) evitar inestabilidades durante la excavación y aislar el túnel del cauce del río.

Para construir la losa sobre el lecho del Manzanares, se cortó el río en dos fases. Se rellenó primero con tierras la mitad derecha del cauce, creándose una plataforma de trabajo desde la que ejecutar el tratamiento con *jet-grouting*, que servía como cimentación, además de servir de barrera de impermeabilización con ayuda de otra barrera transversal en el centro del río. Una vez retiradas las tierras se ejecutó la primera mitad de la losa. Su construcción se completó dando paso al río sobre la mitad de la losa ya finalizada y rellenando con tierras la parte izquierda del cauce, repitiéndose la operación ya descrita.

La excavación junto a la E.R.A.R. de Viveros necesitó, al realizar la excavación del túnel con poco o nada de recubrimiento resistente, (Figs. 2, 7 y 12) un refuerzo del terreno o protección de las instalaciones, al preverse importantes asentamientos sobre la clave. En la Fig. 12 aparecen esquematizados los dos tipos de protección realizados: a) sección de tratamiento con columnas de *jet-grouting* en forma de



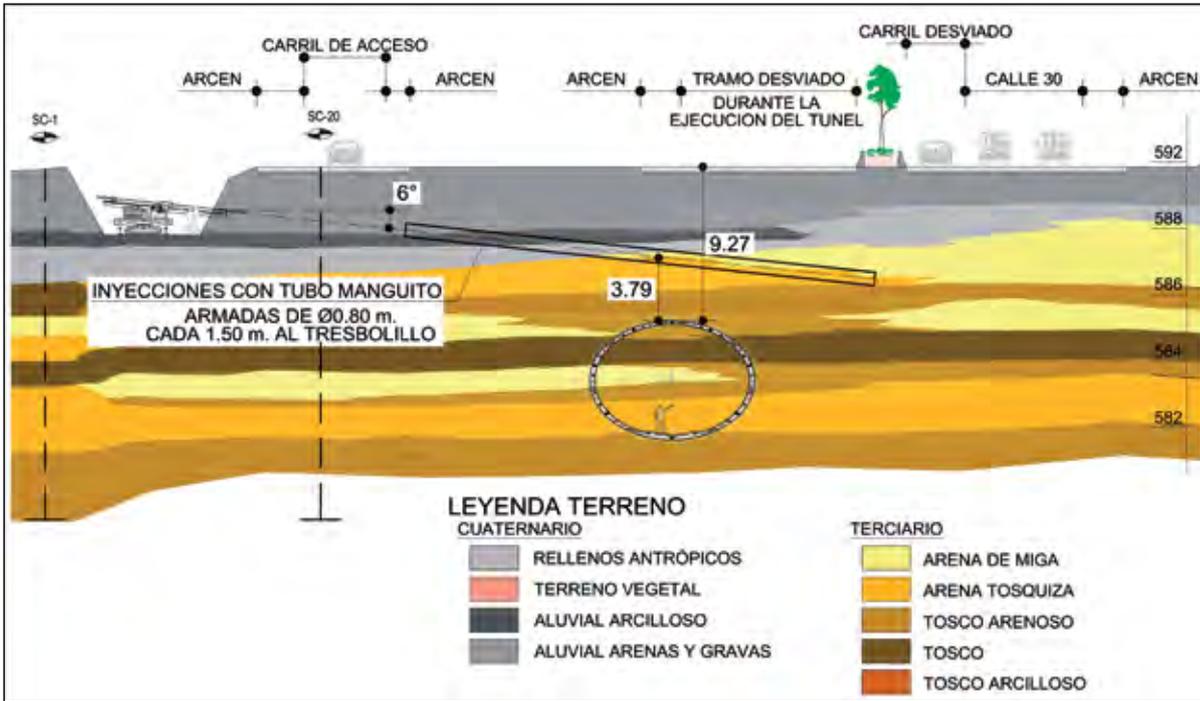


Fig. 12. Tratamiento bajo la M-30 (alzado)

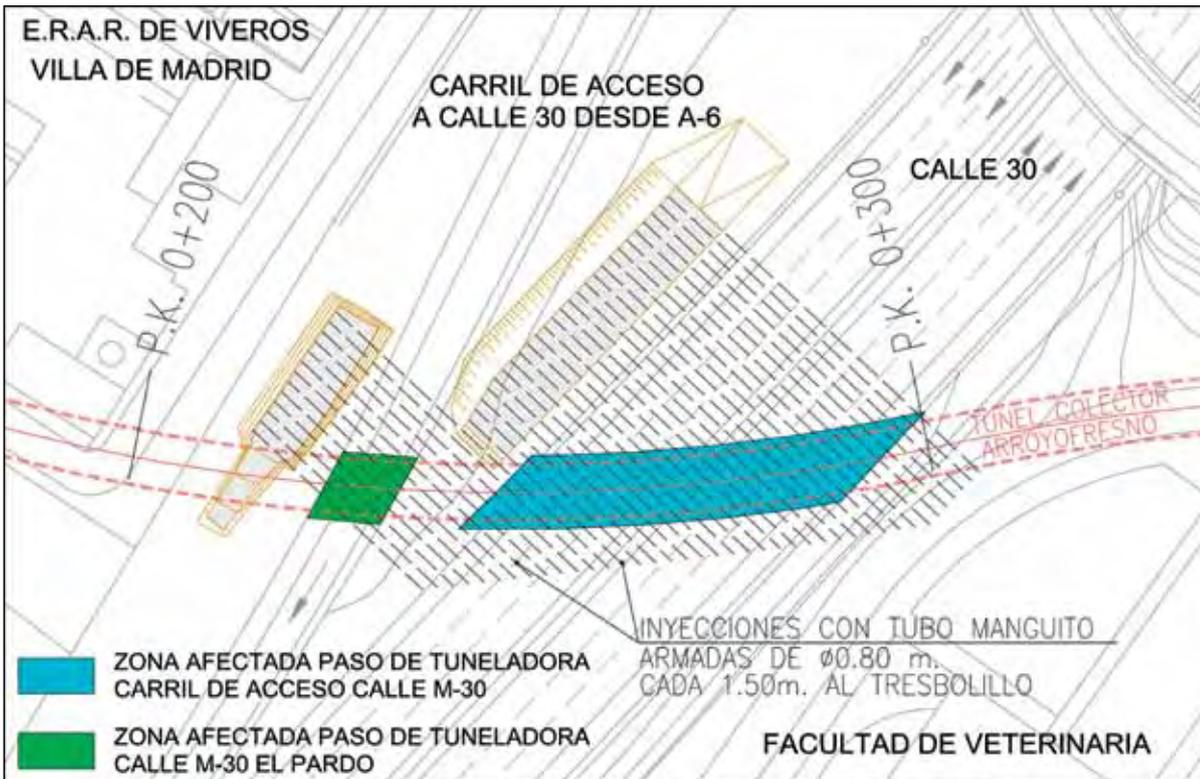


Fig. 13. Tratamiento bajo la M-30 (planta)

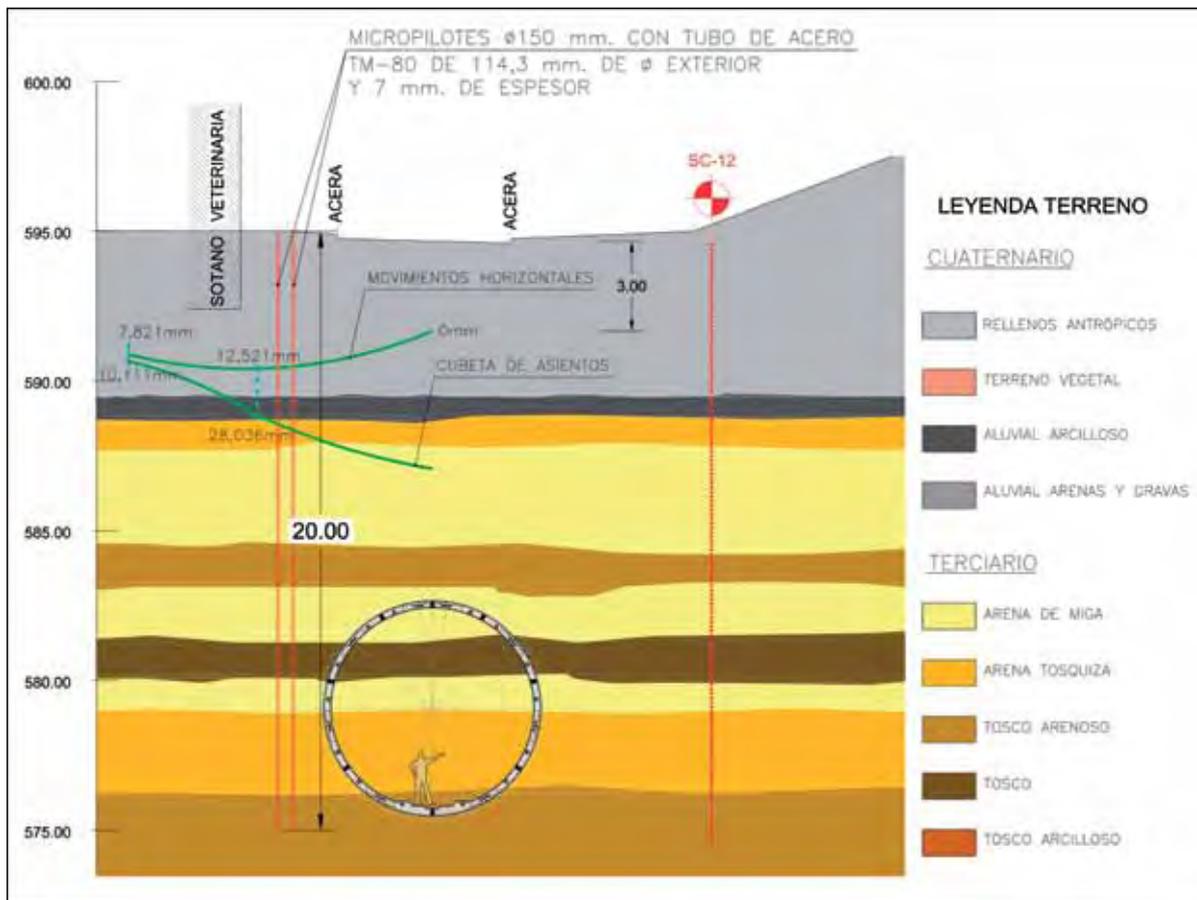


Fig. 14. Paso junto a la Facultad de Veterinaria

'tienda de campaña', con la finalidad de impedir la formación de socavones y b) sección de tratamiento con columnas de *jet-grouting* cuasi-horizontales, para cortar la cubeta de asientos y que dicha cubeta no afectara a instalaciones de la depuradora. Las secciones de tratamiento estaban separadas 3 m en dirección del eje del túnel, en el primer caso, y de 1,5 m, en el segundo.

Al final de este camino, el trazado llega a otro de sus hitos más relevantes, el cruce con el colector de margen izquierda del río y con la Calle 30. El colector de margen izquierda es un antiguo colector con revestimiento de ladrillo, el cual era preciso cruzar a solo 3 m bajo su solera. Respecto a la Calle 30, es inútil señalar la importancia de esta autovía, la de mayor intensidad de circulación de España. En este caso, el trazado cruza a 4,70 m por debajo, que continúa siendo una distancia inferior a un diámetro de excavación. En todo este tramo de cruce, el frente de excavación se ubica en suelos terciarios, pero con recubrimientos de estos inferiores a 1 m sobre la clave.

Para proteger la Calle 30 de posibles inestabilidades del terreno y formación de "socavones" se hizo un tratamiento con inyecciones de tubo manguito, armados con tubo metálico, limitándose la presión para no levantar la Calle 30. En la Fig. 13 puede verse el tratamiento realizado desde un zanjón paralelo a Calle 30 y área de terreno afectada, representando en la Fig. 14 la planta del tratamiento. Los taladros se dispusieron en dos filas, separadas 0,70 m, con taladros al trespelillo, separados 1,50 m. Las inclinaciones utilizadas en las perforaciones variaron de 5° a 30°, según la situación del zanjón, el túnel y la M-30. Dentro de los taladros superiores se instalaron tubos de acero de Ø 88,9 mm y 9,5 mm de espesor, con manguitos cada 0,5 m. La fila inferior se realizó con tubos de PVC de Ø2", para evitar que se desviara pudieran afectar al túnel. Se realizaron 3 fases de inyección, inyectando en cada manguito hasta 150 l/m de lechada de agua/cemento, con relación 1/1. La presión máxima de inyección fue de 7 bares.

Pasada la Calle 30, el túnel se adentra en los terrenos pertenecientes a la Facultad de Veterinaria de la Universidad

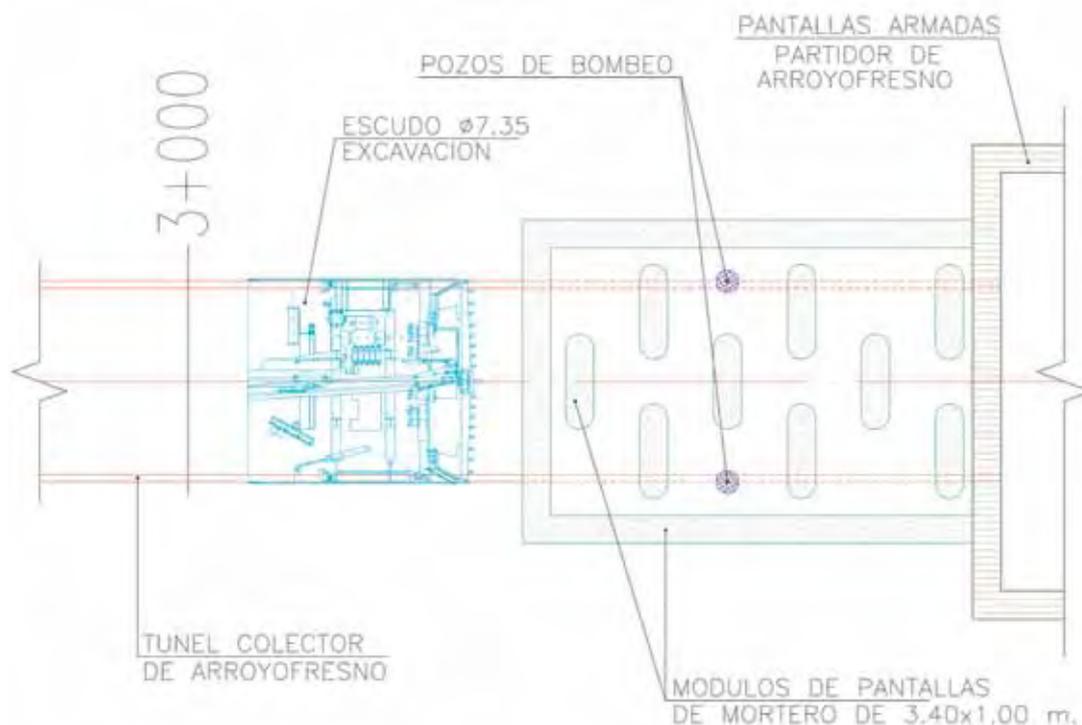


Fig. 15. 'Corralito' para la entrada de la tuneladora en el pozo de extracción (planta)

Complutense de Madrid (Fig. 14). La situación relativa del túnel y de la fachada de dicha Facultad puede verse en la Fig. 15. Dada la presencia de espesores importantes de rellenos antrópicos, 5 m, y los movimientos previstos, que eran del orden de 30 mm en la fachada del edificio mencionado, (Fig. 15), se decidió construir una pantalla de protección, para cortar la cubeta de asientos, a base de dos filas de micropilotes $\varnothing 150$ mm, con tubo de acero de $\varnothing_{\text{ext}} 114,4$ mm y 7 mm de espesor, con una longitud de 20 m, hasta pasar el punto más bajo del túnel (Fig. 15). Tras el tratamiento y la excavación del túnel, el asiento medido fue de 9 mm, casi cuatro veces menos del previsto sin tratamiento, sin tener que lamentar daños en los edificios. A partir de este punto, la pendiente del túnel se eleva hasta el 0,5 %, la cual se mantendrá hasta el final (Fig. 7). Afortunadamente, dada la rápida elevación del terreno en superficie, el frente del túnel comienza a tener una profundidad mayor y la cobertera de plioceno sobre la clave alcanza ya el diámetro de excavación. Apenas 50 m más adelante, al pasar bajo el paso inferior de entrada a la facultad, la cobertera ya alcanza los dos diámetros.

El siguiente punto singular apareció de inmediato. Se cruzó perpendicularmente la autopista A-6, en el tramo en que se

denomina Avenida de Puerta de Hierro. Este cruce tiene una longitud de unos 40 m en una zona donde los recubrimientos de terciario sobre cable ya son aceptables, superando los dos diámetros de excavación. A continuación discurre paralelo al ramal de enlace de la A-6 y la Calle 30 para finalmente cruzar la Carretera de la Dehesa de la Villa, en el p.k. 0+900 del túnel, la cual puede considerarse ya el último punto singular del trazado.

Por estos motivos se juzgó innecesaria una protección especial de la A-6, lo cual resultó acertado a la vista de los asientos registrados.

El resto de la excavación, más de 2.100 m de túnel, discurre bajo el campo de golf del Real Club de la Puerta de Hierro, a coberturas medias de 30 metros (Fig. 7), salvo en un punto bajo de 18 m en mitad del trazado y a la llegada al partidor, a unos 5 m.

En resumen, la mayor parte del túnel discurre a unas profundidades y con una calidad del terreno atravesado ideales para realizar la excavación sin dificultades con la máquina en cuestión, con unos rendimientos elevados y sin apenas

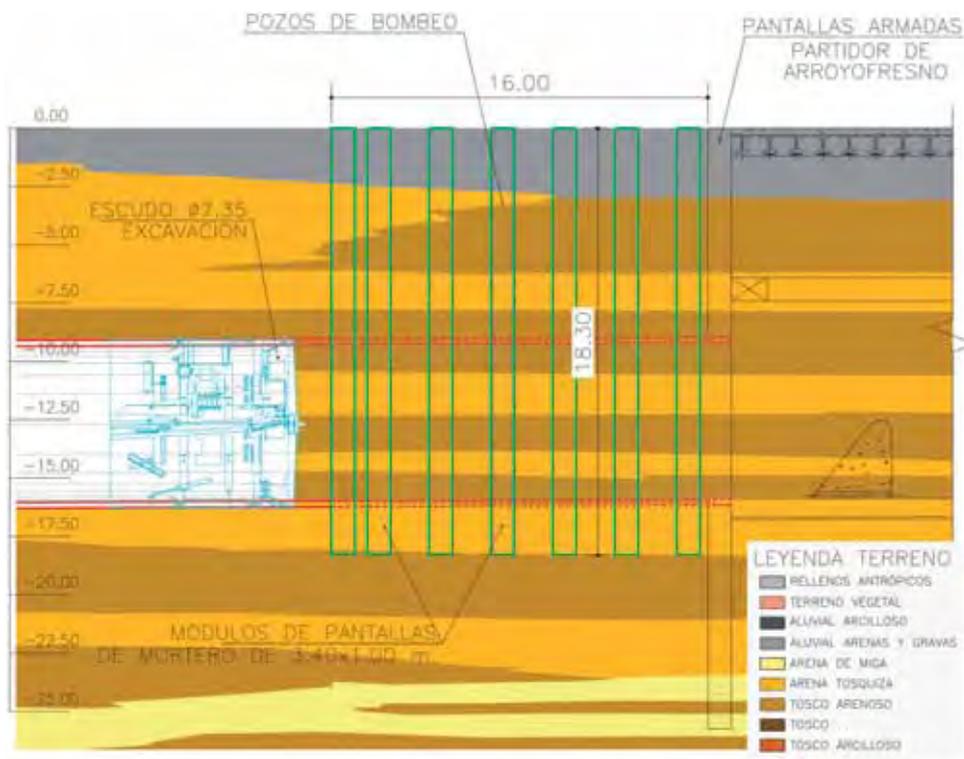


Fig. 16. “Corralito” para la entrada de la tuneladora en el pozo de extracción (planta)

producir subsidencias ni cualquier otro tipo de afección al entorno. En cambio, los primeros 500 m constituyeron uno de los tramos más difíciles que se hayan podido excavar en Madrid. Basta con decir que mientras el avance de la tuneladora en esta zona fue de 250 m/mes, el resto se excavó a una media de 750 m/mes.

Volviendo a la descripción de la traza en el sentido de avance de la tuneladora, es necesario recordar que esta inició su excavación atravesando la pantalla continua del estanque de tormentas. Para que la tuneladora pudiese atravesarla, los módulos de la pantalla que era preciso perforar con la máquina se hicieron con mortero de cemento y sin armadura de acero. La salida de una tuneladora EPB desde un recinto construido con pantallas continuas es un problema recurrente en la excavación de este tipo de túneles. La rotura de la pantalla produce una súbita descompresión del terreno ya alterado previamente por la construcción de la misma, además de una rápida pérdida del agua del terreno cuando el nivel freático se sitúa por encima de la cota de excavación. Todos estos factores suelen producir arrastres del terreno hacia el interior del recinto produciendo fuertes asientos en superficie, cuando no se produce una inestabilidad global y la

formación de una chimenea. La solución más habitual a este problema es realizar en el trasdós de la pantalla un recinto con pantallas impermeables, que coloquialmente se denomina ‘corralito’, generalmente de cemento-bentonita o mortero, de dimensiones suficientes para que pueda alojar todo el escudo de la tuneladora e instalar el primer anillo de dovelas fuera de la pantalla del pozo de ataque. Este recinto permite vaciar de agua este espacio mediante pozos de bombeo. Además se mejora el terreno mediante algún tratamiento, como la ejecución de pilotes de mortero, columnas de *jet-grouting* o inyecciones.

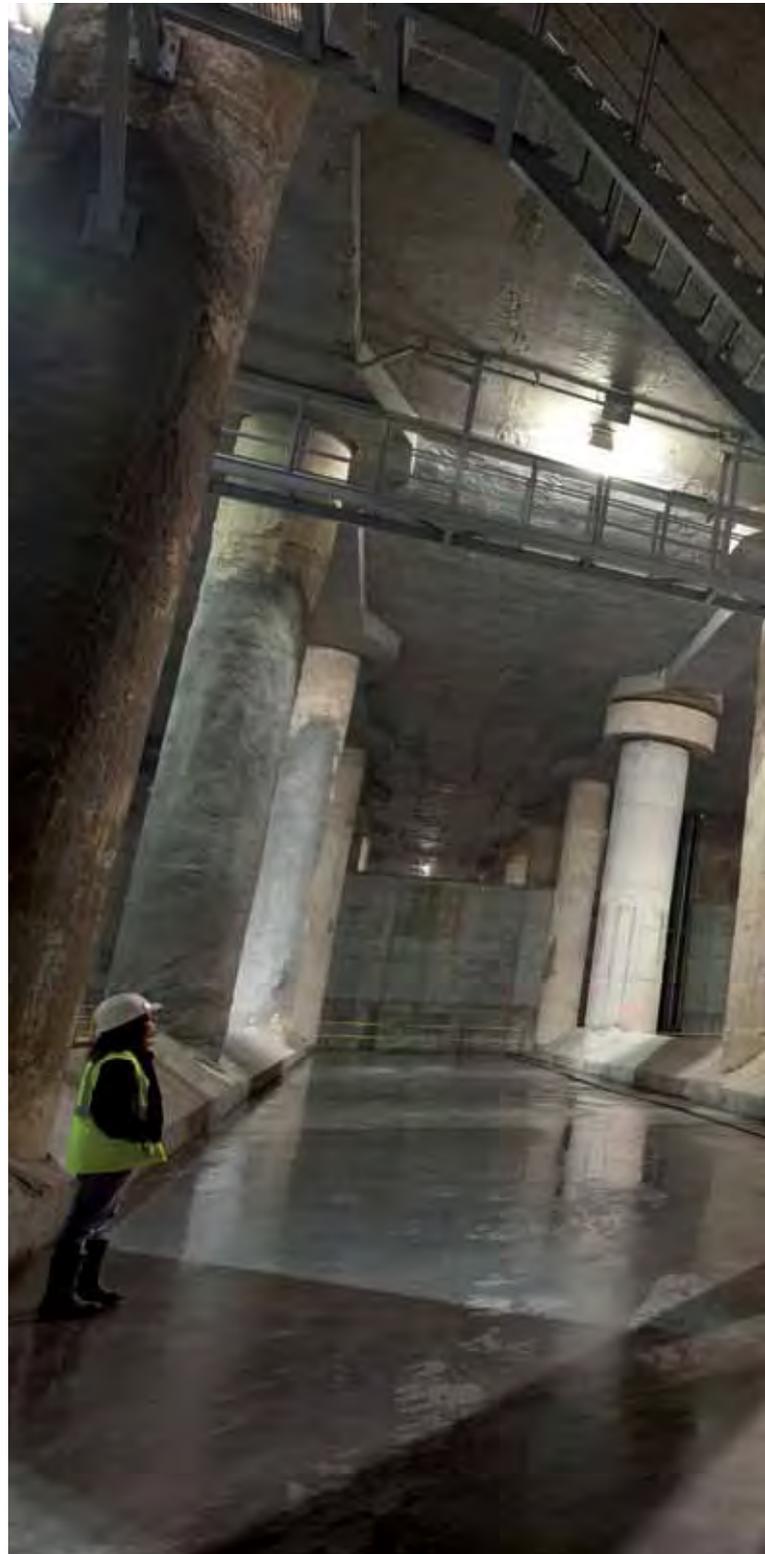
La singularidad en este caso concreto es la presencia del muro perimetral del Club de Campo. La solución adoptada consistió en dividir el corralito en dos partes mediante una pantalla adicional paralela al muro. La primera parte se consolidó mediante pilotes de mortero de diámetro 800, espaciados en planta 1,5 m aproximadamente y que profundizaban hasta 8 m bajo el túnel, además de vaciar de agua el recinto mediante dos pozos de achique. En la segunda parte no se drenó el agua freática para no producir asientos excesivos bajo el muro, pero las pantallas laterales se construyeron armadas.

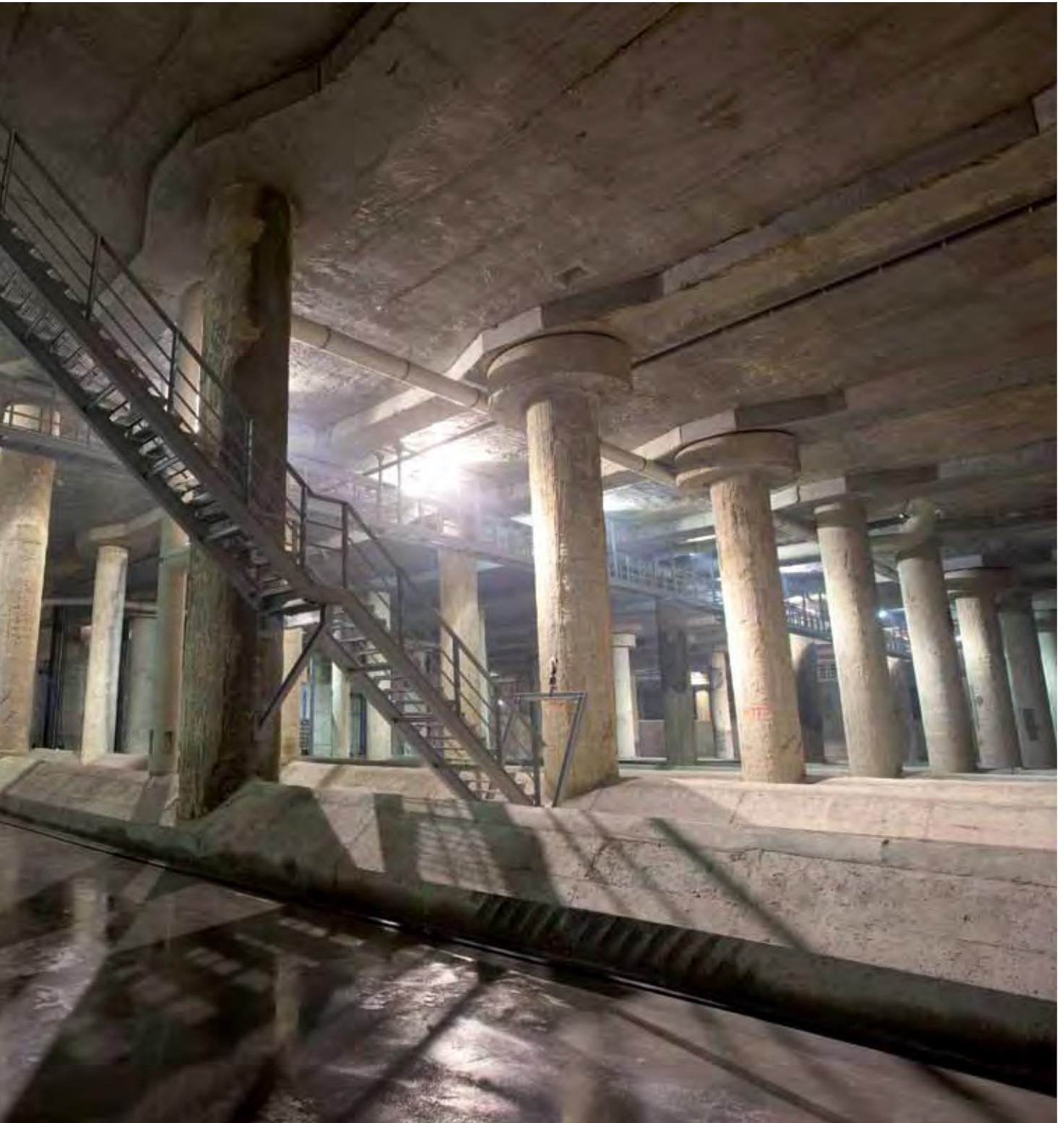
Lo mismo debe tenerse en cuenta en el final del túnel, al llegar al pozo de extracción de la tuneladora. En la Fig. 16 se ha reproducido la solución utilizada: el pozo de extracción es el propio partidor de Arroyofresno, excavado al abrigo de pantallas continuas de hormigón armado. En la zona a la que llega el túnel se le añadió un 'corralito' de módulos de pantalla de mortero, armando su interior con módulos individuales de $3,40 \times 1,0$ m y situando los pozos de bombeo en su interior.

De esta forma, cuando la tuneladora llega a penetrar en el 'corralito' y se detiene, con el escudo entero dentro del mismo, la zona de rotura queda 'rellena' por la propia inyección del *gap* de las dovelas. A continuación se elimina el agua de dentro del 'corralito' y ya puede entrar la tuneladora en el pozo de extracción, ayudando a esta operación mediante 'picado' de la pantalla del pozo de extracción desde su interior. Armar el 'corralito' con módulos de mortero tiene como misión el dar una 'cohesión' equivalente al terreno, a fin de que los empujes sobre la pantalla del pozo de extracción, no armada en toda su profundidad, no superen a aquellos que esta es capaz de resistir.

Para ajustar adecuadamente el diseño de los tratamientos realizados en la depuradora de Viveros y bajo la Calle 30, se acotó un campo de pruebas muy próximo a la zona a tratar, realizándose un total de 9 columnas de 5 m de longitud con presiones comprendidas entre los 300 y 400 bar y admisiones de entre 250 y 350 kg/m de cemento y lechada con relación agua/cemento 1/1. Estas pruebas señalaron que la configuración óptima era una combinación de 300 kg/m de admisión de cemento inyectado a una presión de 300 bar. Con estos parámetros las columnas resultantes tenían un diámetro de 60 cm, lo que permitió definir las dos geometrías del tratamiento distintas para dos tramos de túnel que ya se han explicado anteriormente.

Antes de iniciar los tratamientos en Viveros, al comienzo del túnel se empezaron a producir socavones en superficie, por lo que inmediatamente se procedió a rellenarlos con tierras y a vallar el área situada sobre la traza del túnel para impedir el acceso a personas y vehículos de obra. Tras un tramo intermedio de tranquilidad, en el que no se produjeron nuevos socavones, se llegó a la última parte del tramo, donde surgieron los principales problemas en la zona en que las columnas de *jet* formaban un voladizo sobre el túnel. Dentro del recinto de la depuradora de viveros, junto al edificio de almacenamiento de reactivos, se produjo una chimenea que,







en superficie abarcaba un área de unos 50 m², afectando a un vial de servicio, a un contenedor metálico, a la red de drenaje de aguas pluviales, a varias conducciones eléctricas enterradas y al propio edificio de reactivos, del que se hundió la acera perimetral y cuyas cimentaciones sufrieron asentamientos del orden de los 70 mm, produciéndose algunas fisuras en sus muros de cerramiento.

La causa de estas inestabilidades en el frente de excavación fue la inestabilidad dorsal, problema identificado, descrito y analizado por primera vez durante diversas obras de las ampliaciones del metro de Madrid (Arnaiz, 2003). Este tipo de inestabilidad se produce cuando en la zona de la clave se excavan arenas sin finos. La falta de cohesión hace que se origine una sobreexcavación sobre el túnel que si bien al principio no es de gran importancia, a medida que la máquina avanza se va arrastrando y agrandando hasta producirse el colapso. De hecho, las chimeneas se produjeron allí donde se detectó la presencia de este tipo de arenas procedentes de los suelos aluviales, mientras que en el tramo central, en el que se eleva un poco el techo de los estratos terciarios, no surgieron inestabilidades. La principal causa de que no se pudiera prever este problema fue que estos niveles de arenas limpias se encuentran intercalados entre otros más arcillosos, en lo que localmente se denominan 'lentejones' de arenas, por lo que no fueron detectados por los sondeos puntuales disponibles.

El gran socavón fue rellenado inmediatamente con tierras procedentes de la excavación del estanque en su tercio más profundo y con hormigón hasta la superficie. El relleno se realizó de esta forma para no verter hormigón fresco sobre el frente de la tuneladora. Un vez que la tuneladora avanzó y se colocaron anillos de dovelas, se ejecutó un tratamiento con inyecciones de lechada de cemento para consolidar este relleno de tierras y evitar asentamientos en la superficie a medio y largo plazo.

El relleno del socavón no supuso el final de los problemas, sino el inicio de un completo rediseño de los tratamientos del terreno previstos, dado que de inmediato había que cruzar bajo el colector de la margen izquierda del río Manzanares y la Calle 30.

El arranque de la tuneladora, como ya se había previsto, supuso una nueva sobreexcavación del terreno y una chimenea, de un tamaño similar al anterior y que fue reparado de manera similar. Como medida de precaución, el muro

de cerramiento de la depuradora, de hormigón armado, se desmontó para evitar que se derrumbase en el caso de que la chimenea se prolongase hasta su cimiento.

El colector de margen izquierda tiene una sección abovedada de 2,70 x 2,50 m, con un revestimiento de fábrica de ladrillo de 25 cm de espesor. El cruce del nuevo túnel se producía a 3 m bajo el mismo. Como ya se ha señalado, el fenómeno principal en la inestabilidad dorsal que produce el colapso del terreno es la propagación o arrastre de la sobreexcavación a lo largo de la clave. Para cortar esta propagación y evitar el colapso bajo el colector, se crearon tres barreras verticales de pilotes de mortero de diámetro 650 mm, perpendiculares al sentido de avance del túnel, con separación entre sus centros de 1,15 m y 13,5 m de profundidad. La primera barrera se situaba 5 m antes de colector, la segunda junto al primer hastial del colector y la tercera barrera junto al otro hastial, tras el cruce. Además, se realizaron dos tipos de inyecciones desde dentro del colector para mejorar el comportamiento estructura-terreno. En la parte alta de los hastiales se realizaron unos taladros cortos, simplemente atravesando el revestimiento, por los que se inyectaron 150 litros de una lechada densa con relación agua/cemento de 1/1,5, con la finalidad de rellenar los habituales huecos en el trasdós de los hastiales de esta tipología de colector. En la solera se realizaron otros dos taladros aunque más largos, de 1,50 m de longitud, por los que se inyectó el mismo volumen y el mismo tipo de lechada, esta vez para mejorar el terreno de cimentación, que podría estar reblandecido por fugas o filtraciones del colector. En ambos casos se fijó un estricto límite de presión de las inyecciones de 2 bar, para evitar cualquier daño o deformación del revestimiento. El espaciamiento entre las secciones transversales de taladros era de dos metros, cubriendo 16 m de colector a cada lado del eje del túnel, lo que implicaba superar en 6 m una posible cubeta teórica de asentamientos de 45°. En este caso, el tratamiento funcionó a la perfección, no produciéndose ningún daño al colector ni ningún colapso del terreno en sus cercanías.

El sistema de barreras verticales perpendiculares al túnel también se utilizó al iniciarse el paso de la Calle 30, aunque ahí se realizaron dos filas de micropilotes de Ø 200 mm, con mortero y separados 0,5 m.

La otra medida adicional tomada en la Calle 30 y de mayor calado fue el corte parcial del tráfico para impedir la circulación de vehículos por encima del frente de excavación.

De esta forma se cumplían tres objetivos: se evitaba que un posible colapso afectara a la seguridad de los usuarios de la vía; permitía controlar y rellenar posibles huecos en la zona de la clave mediante sondeos verticales y, por último, posibilitaba la toma de medidas de asientos sobre la calzada para comprobar la estabilidad de la vía durante el paso del túnel.

Tras la construcción de un carril adicional aprovechando el arcén y la isleta de separación con el carril de acceso a la A-6, se desvió el tráfico impidiendo su circulación sobre el frente del túnel, creando una zona de exclusión de unos 10 m por delante y por detrás de éste. De esta forma, según avanzaba la máquina se iban cortando nuevos carriles al tráfico y se liberaban los ya superados. El área de exclusión al tráfico se aprovechó para realizar taladros desde superficie desde los que detectar posibles huecos producidos por sobreexcavación y para realizar inyecciones de mortero próximas a la clave. Estas inyecciones se ejecutaron en las dovelas impares, es decir, cada 2,40 m de avance del túnel mediante taladros de diámetro 200 mm y se realizaban por gravedad, sin emplear presión, para evitar que el mortero se comunicara con la cabeza de la tuneladora. Además, se colocaron clavos de nivelación sobre la calzada y regletas en la mediana de la autovía para medir asientos mediante

nivelación de precisión. El asiento máximo medido fue de 8 mm en la vertical del eje del túnel, con un volumen de asientos del 0,1 % de la sección, lo cual puede considerarse un muy buen resultado y la prueba del buen comportamiento de los tratamientos efectuados para el cruce de la Calle 30. Las medidas de nivelación se prolongaron durante casi un año en el caso de las regletas de la mediana, reportando una absoluta estabilidad. El cruce de la Calle 30 se consiguió realizar en solo 6 días.

Como colofón a estas actuaciones y con el objetivo de garantizar la seguridad del entorno del túnel, una vez finalizado el túnel se decidió realizar una campaña de inyecciones de consolidación de la clave del túnel en todas aquellas zonas, ya relatadas, en las que se habían detectado sobreexcavaciones. El fin de las inyecciones era crear una corona circular alrededor de la clave del túnel de un espesor de 0,50 m, aparte de rellenar cualquier hueco que perdurara desde la excavación. Dado que las dovelas de esta tuneladora tienen un orificio para la realización sistemática de las inyecciones de contacto entre la dovela y el terreno durante la construcción del túnel, se aprovechó dicho orificio de las dos dovelas adyacentes a la clave del túnel para realizar taladros de 0.50 m de longitud desde los que inyectar lechada de cemento

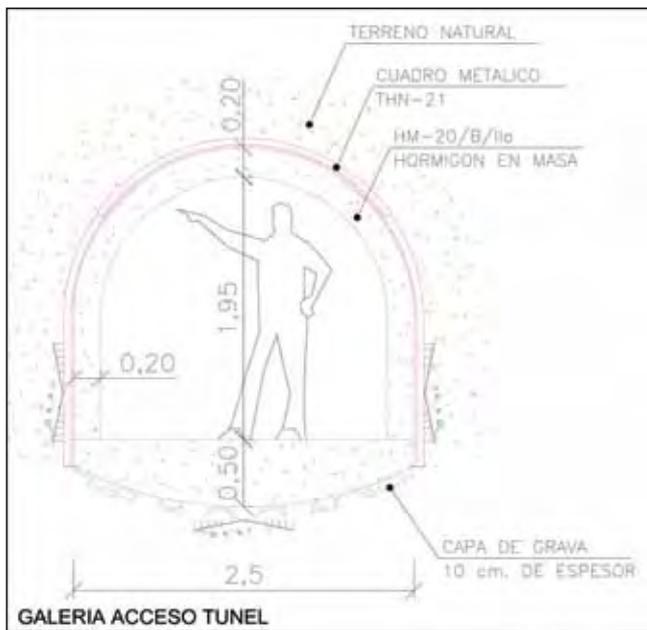
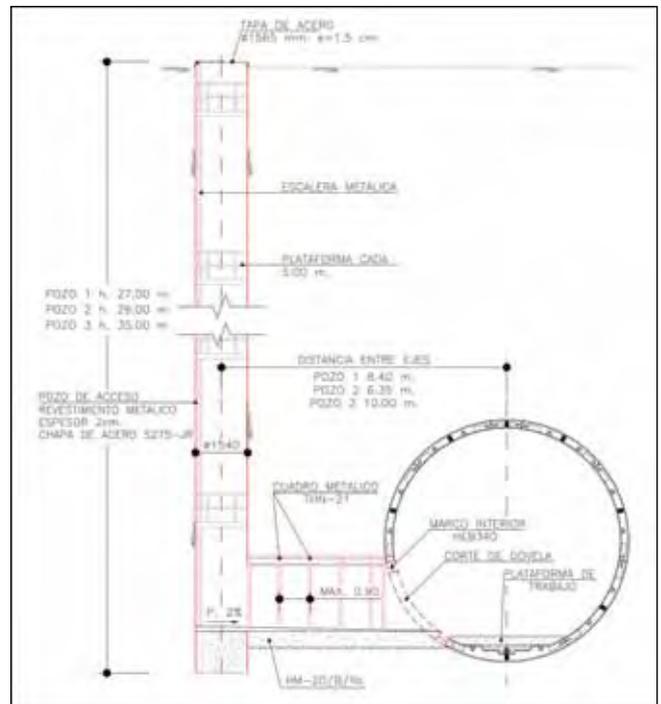


Fig. 17. Pozos y galerías de acceso al túnel principal



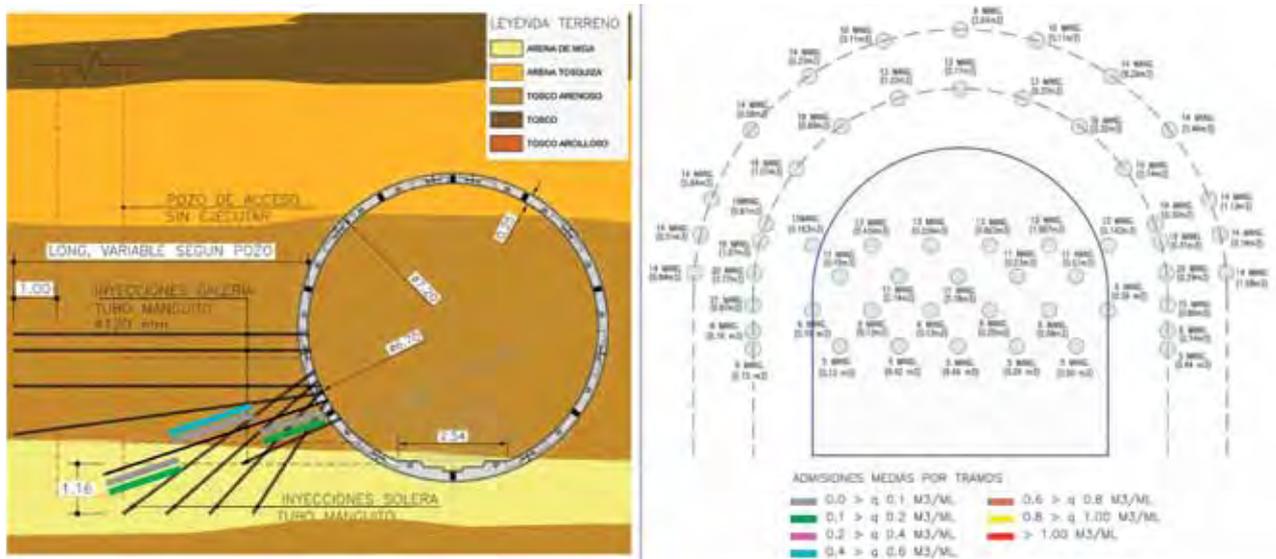


Fig. 18. Tratamiento de arenas con agua en las zonas de las galerías de acceso

con ayuda de un obturador simple. Para poder atravesar los orificios, el diámetro de perforación tuvo que limitarse a 56 mm.

La inyección se realizó con una mezcla estable de cemento-bentonita con relación agua/cemento de 1/1,5 y 3 % de bentonita, efectuándose pasadas de 150 litros con una presión máxima de 3 bar. Tras cada pasada se revisaban los datos de la inyección y se reinyectaban aquellos taladros que alcanzaban el máximo volumen sin llegar a la presión límite. Evidentemente, al emplearse un obturador simple, para reinyectar un taladro era preciso reperforarlo previamente. En general, fue preciso realizar tres pasadas de inyecciones, aunque en algunas zonas fue preciso alcanzar las 5 repeticiones, lo cual corroboró el acierto en la decisión de efectuar este tratamiento.

Una vez terminada la excavación del túnel se construyeron las conexiones del mismo con los diversos pozos de acceso. Estos se realizaron mediante perforaciones con maquinaria de pilotes, con un diámetro de 2,0 m, instalando en su interior una chapa de protección de \varnothing 1,565 mm y 2 cm de espesor (Fig. 17). Estos pozos tienen profundidades de 17 a 35 m. Terminado el túnel, se ejecutaron galerías de acceso del túnel principal a los pozos (Fig. 17) de unos 2,65 m de altura y 2,5 m de anchura, ejecutados con métodos convencionales (entibación de cerchas y madera) y con revestimiento de 20 cm de hormigón en masa.

La rotura de las dovelas correspondientes del túnel principal necesitó la construcción previa de un marco metálico interior unido a las dovelas por bulones inyectados.

En algunos casos la presencia de arenas de 'miga' con agua, obligó a realizar inyecciones con tubos manguito para asegurar la estabilidad de las excavaciones, tal como se indica en los esquemas de la Fig. 18.

Por último y en relación con el túnel, cabe señalar la actuación que se llevó a cabo junto al río Manzanares para dotar al sistema de un aliviadero de emergencia, que funcionará en el caso que se ha llenado el estanque y falle el alivio de caudales por medio del partidor de Arroyofresno.

Se construyó un recinto rectangular con pilotes de hormigón armado (Fig. 11a), al estar siendo necesario tratar las zonas laterales del túnel (Fig. 11b), a fin de conseguir impermeabilizar la zona y permitir la excavación hasta la cota del túnel, ya que esta se situaba bajo el nivel freático. Una vez descubierto el túnel se cortaron las dovelas superiores, con hilo de diamante, conformando la sección por la se evacuará los caudales entrantes en caso de emergencia.

6. El partidor de Arroyofresno

En la figura 19 se sitúa el partidor de Arroyofresno, con el pozo de extracción de la tuneladora y la conexión con los colectores existentes.

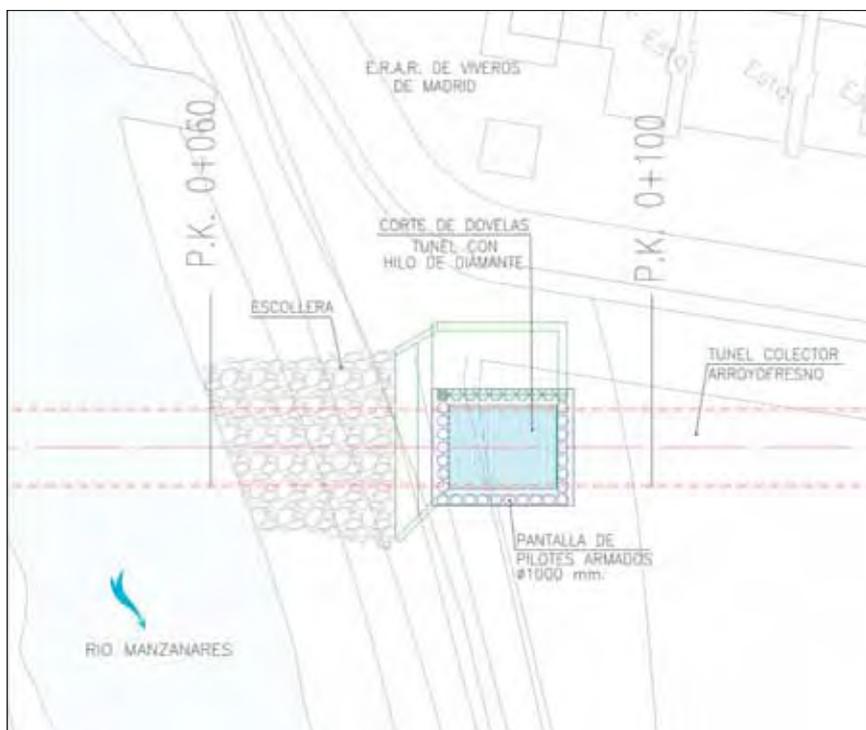


Fig. 19. Planta del aliviadero de emergencias (planta)

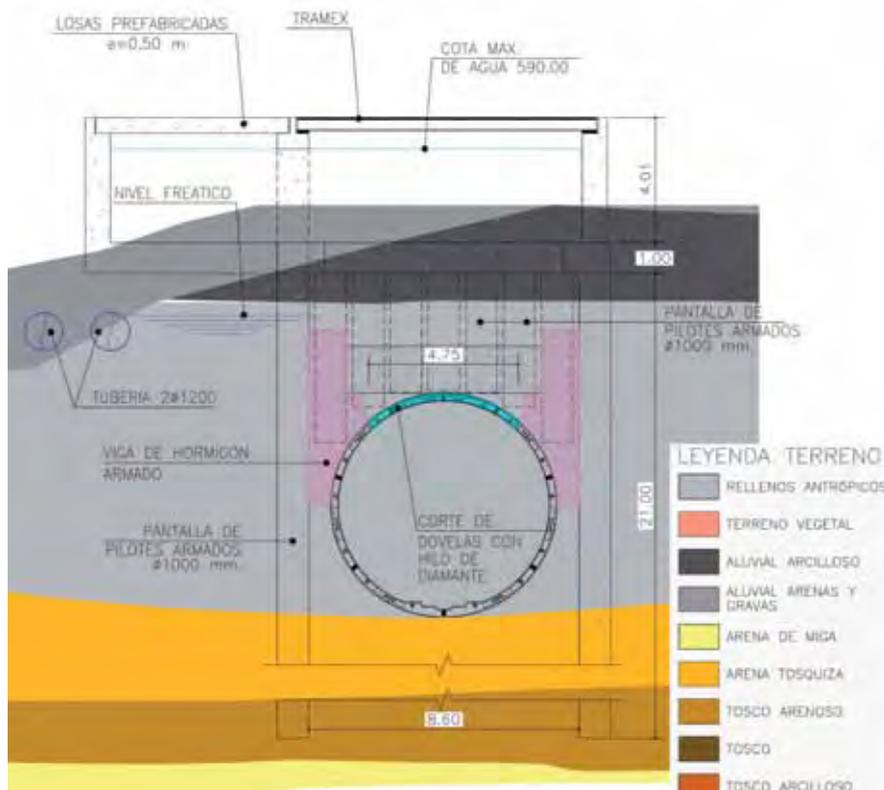


Fig. 20. Planta del aliviadero de emergencias (alzado)

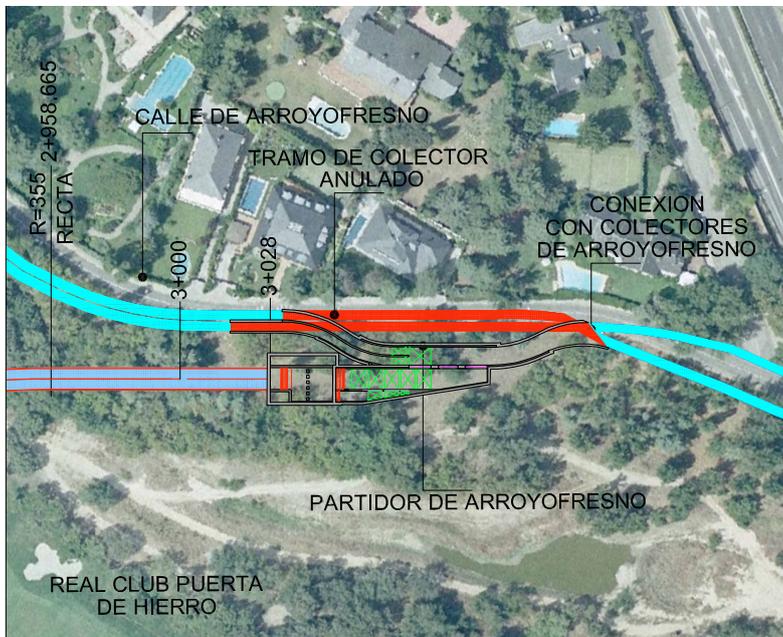


Fig. 21. Situación en planta del Partidor de Arroyofresno

Esta parte de la obra tuvo una menor importancia dadas sus dimensiones: las excavaciones se hicieron al abrigo de pantallas continuas de hormigón armado, con algunas dificultades en su parte superior, por la presencia de materiales tipo aluvial y rellenos antrópicos, hasta unos 6 m de profundidad.

Dada la presencia de algunas edificaciones residenciales de baja altura próximas (Fig. 19), se hicieron filas de micropilotes de protección previa. A pesar de ello, hubo alguna reclamación, a pesar de que los movimientos controlados junto a los edificios fueron de solo algún milímetro.

7. Conclusiones

A modo de resumen y conclusión de todo lo anteriormente expuesto puede decirse:

- Se trata de una obra muy compleja, sobre todo la parte del estanque de tormentas y el primer tramo del túnel, hasta la M-30.
- En todo momento se prestó atención especial a la instrumentación del terreno e instalaciones próximas al túnel, controlando movimientos verticales y horizontales en el terreno y asentamientos y desplomes en estructura. En la zona del partidor hubo de hacerse solo en el terreno, ya que los propietarios de los edificios no dejaron entrar ni a medir ni a comprobar el estado de los mismos.

– La realización de un túnel de estas características, en terrenos blandos y sin recubrimientos resistentes, obliga a definir muy bien los tratamientos de refuerzo del terreno necesario y las barreras de protección de las instalaciones próximas. Aun así, pueden producirse inestabilidades dorsales sobre el túnel, para lo que hay que tomar precauciones aislando las zonas de riesgo del acceso de peatones y vehículos, realizar barreras perpendiculares al túnel para cortar la sobreexcavación, etc.

– Los temas ambientales se cuidaron mucho, dado el especial contexto existente en los alrededores de la obra.

8. Agradecimientos

Los autores quieren expresar su agradecimiento al Excmo. Ayuntamiento de Madrid por el permiso concedido para publicar este trabajo. Asimismo quieren expresar su reconocimiento más directo a Fernando López Ortum que, en todo momento, lideró el desarrollo de esta obra, así como a la Dirección General de Aguas del Ayuntamiento de Madrid, promotora de la misma. También quieren reconocer su deuda de gratitud con todas las personas y organizaciones que intervinieron en la obra: los asesores de la tuneladora, Doctor Felipe Mendaña y D. Ramón Fernández, al personal de la UTE Dragados-Drace Medio Ambiente, de Typsa como Asistencia Técnica de la Dirección de obra, de Inmateinsa, a cuyo cargo corrió la instrumentación, a Samuel Estefanía y Adolfo Pérez de Albéniz, asesores de la UTE. Sin ellos no se hubiera podido culminar la obra con éxito. **ROP**

Los expertos en encofrados.

Soluciones adaptadas a las necesidades

- 1 Construcción de túnel de 544 m con el carro SL-1-AVE „Y Vasca“, Tramo Tolosa, Guipúzcoa**
UTE Tolosa (Dragados, Leza y Obras Subterráneas)
- 2 Encofrado de presas para 163.000 m³ de volumen - Presa del Búrdalo, Cáceres**
UTE Búrdalo (OHL, Sogeos)
- 3 2 carros de encofrado en voladizo con el servicio llave en mano - Viaducto sobre el río Nervión, Vizcaya**
UTE Zarátamo (Dragados e IZA, Obras y Promociones)
- 4 Encofrado y mano de obra de un único proveedor - Galería de emergencia, Bilbao**
UTE Zarátamo (Dragados e IZA, Obras y Promociones)

Doka España Encofrados, S.A. | Acero, 4 - Pl. Aimayr | 28330 San Martín de la Vega (Madrid) | T +34 91 685 75 00 | www.doka.es

