

## El agua y los túneles



### Carlos Oteo Mazo

Doctor ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Catedrático de Ingeniería del Terreno

#### Resumen

Se presentan, de forma abreviada, los problemas de interacción del agua y los túneles, tanto durante su excavación como durante su explotación, pasando revista a los problemas generales que pueden existir, principalmente, durante la construcción.

Se presentan varios ejemplos en ese sentido. Pero también se abordan los casos de afección, a medio y largo plazo, al medio ambiente y viceversa.

#### Palabras clave

Túneles, agua, interacción agua-excavaciones, afección medio ambiente

#### Abstract

*The article outlines the problems of water interaction and tunnels, both during excavation and operation and considers the general problems that may arise, particularly during construction.*

*A series of examples are provided and consideration is given to those cases with medium and long term effects on the environment and the reciprocal effects of the same.*

#### Keywords

*Tunnels, Water, water-excavation interaction, environmental effects*

### 1. Introducción

El tema del agua y los túneles (o de los túneles con el agua) es de los más antiguos que el ‘tunelero’ se ha encontrado, tanto al atravesar montañas (con cargas hidráulicas supuestamente elevadas) como al realizar el paso de ríos en ámbito urbanos, pasando por el eterno sueño de unir continentes o continentes e islas bajo el mar.

El agua presiona y arrastra el terreno, al producirse una excavación próxima, ya que se induce un gradiente favorable a la salida del agua. Con ello puede producirse el problema doble de que el agua acude y puede anegar al excavación y, además, arrastra terreno de poca cohesión, haciendo inestable la excavación y, en el peor de los casos, llenando la zona excavada. Así ocurrió en el túnel de Talave, al llegar la TBM a una zona de areniscas del Albense, saturadas (y con carga hidráulica elevada), terreno permeable y poco cementado, con lo que una importante longitud del túnel realizado quedó lleno de agua y terreno, con el consecuente “hueco” por delante de la excavación.

Por su importancia, este tema ha sido seleccionado por el Comité Técnico de Aetos (recientemente constituido) como el prioritario para la nueva etapa a desarrollar por los Grupos de Trabajo de dicha Asociación, a fin de constituir una Guía de Aetos respecto al problema en cuestión, para ‘guiar’ a tuneleros de poca experiencia y mostrar los sistemas de estudios, posibilidades técnicas, procedimientos de mejora del terreno disponibles en la actualidad, etc.

Debido a ello, el autor de estas líneas se ha atrevido a redactar estas páginas, a modo de introducción para ese Grupo de Trabajo, sin que el contenido de este trabajo pueda considerarse más que un prólogo amplio al cometido que ha de desarrollar dicho Grupo de Trabajo.

### 2. La situación en el perfil geológico

Una manera simple (y a veces equívoca) es situar el ‘nivel freático’ en los cortes geológicos longitudinales del terreno en el que se va a diseñar y construir el túnel. Aparece así una línea (generalmente, dibujada en azul), muchas veces continua y que se sitúa próxima a la superficie del terreno.

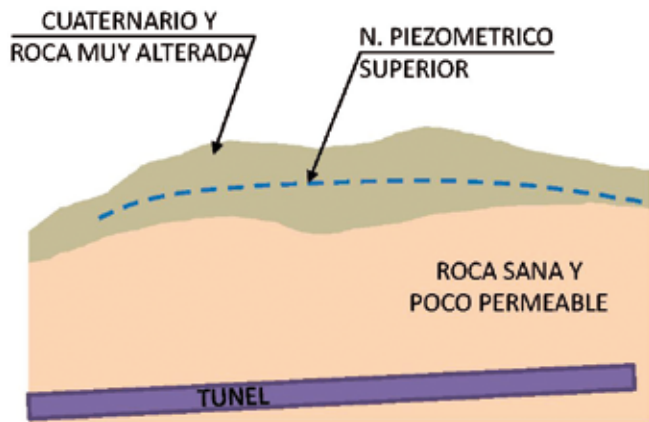


Fig. 1. Nivel piezométrico superior, independiente del terreno en que se excava el túnel

Ello puede corresponder a la ‘verdad’ o solo a una ‘verdad relativa’. Efectivamente, por lo general, el terreno superficial está más alterado que la roca o materiales masivos que aparecen en el macizo que se va a atravesar con el túnel. Muy probablemente, esa línea o ‘nivel freático’ puede ser la zona saturada de esa banda más alterada o eluvial – probablemente– más permeable que el terreno tiene en superficie. O bien corresponde a depósitos cuaternarios y coluviones (Fig. 1).

Pero, pasada esa ‘capa’ (cuaternario, nivel rocoso muy alterado, etc.), el agua prácticamente no tiene presión. El terreno no está saturado y el caudal que puede filtrarse a través de él puede ser muy pequeño, de forma que no represente problemas para el túnel. A veces se ha cometido el error de adjudicar esa agua a todo el macizo, a través del agua de perforación de sondeos, que ha de limpiarse bien antes de instalar piezoconos.

Esto puede dar lugar a que, a corto plazo, el túnel no tenga problemas con el agua. No está actuando sobre él la altura piezométrica que marcaría el nivel freático superior.

Excepto que haya ‘algo’ que comunique esa zona superior con agua (que se recarga con las lluvias) con el espacio que atravesará el túnel: por ejemplo una falla o algún tipo de accidente tectónico con función equivalente, como por ejemplo las disposición de los estratos (quasivertical, fig. 2) y la alternancia de estratos permeables e impermeables. Ello hace que el agua que se infiltra desde la parte alta de la montaña vaya a parar directamente a la zona

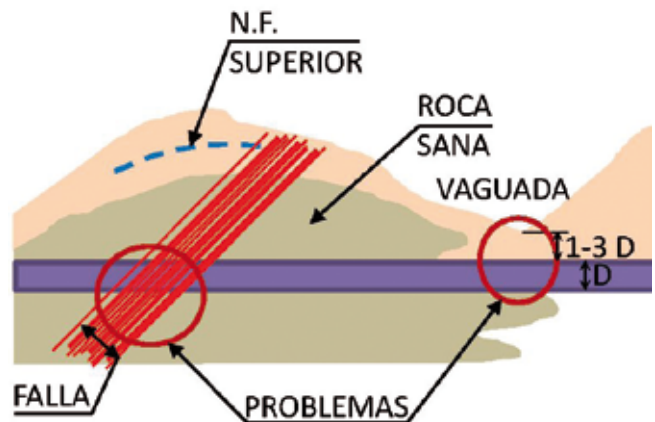


Fig. 2. Problemas bajo vaguadas próximas y en el cruce de fallas

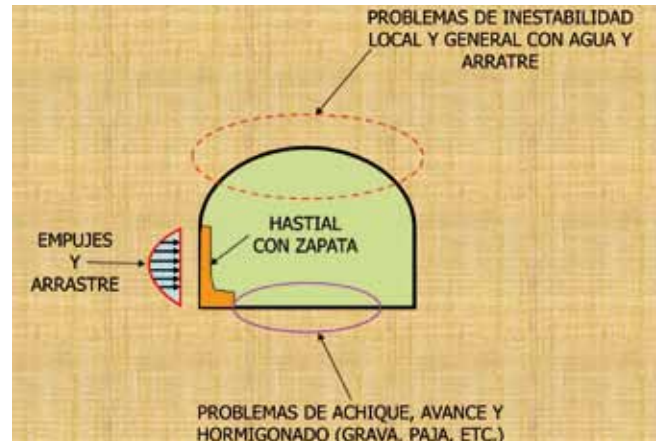


Fig. 3. Posibles problemas inducidos por el agua en un túnel

de excavación del túnel. Ello tendrá varias consecuencias (fig. 3):

- Constructivas, ya que el agua acudirá hacia la excavación, con posibles arrastres (que pueden convertirse en bloques en movimiento), caudal importante, etc.
- De servicio, con presiones del agua no despreciables sobre el sostenimiento y revestimiento.
- Medioambientales, al afectar –por drenaje– a los cuíferos confinados entre las capas impermeables, lo que puede tener sus consecuencias en la explotación humana de esos acuíferos (riego, abastecimiento, etc.).

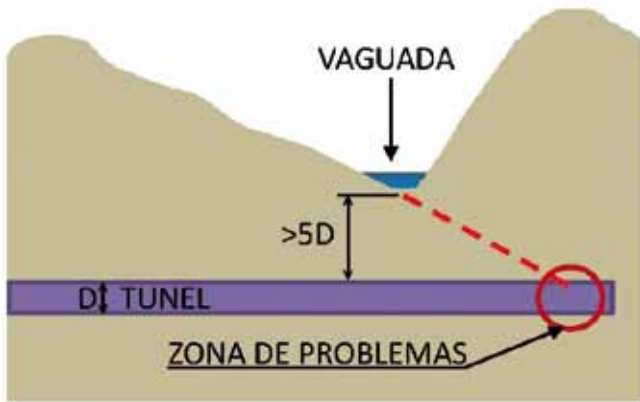


Fig. 4. Zona de problemas bajo vaguada formada al abrigo de falla inclinada

cedió en el túnel realizado por la Dirección General de Ferrocarriles en la Variante a Camarillas (cerca de la línea divisoria entre Albacete y Murcia).

Otro punto importante es el cruce bajo vaguadas superficiales. En ese caso, la situación del problema depende de lo que ha originado la vaguada. Si esta se ha desarrollado a través de una falla inclinada (que también ha permitido guiar la erosión del agua y conformar los laterales del valle). Con el esquema de la fig. 4 (correspondiente a un caso real cerca de Puebla de Sanabria), los problemas con el agua no se produjeron en la vertical de la vaguada, sino en el punto extrapolado siguiendo la dirección del lateral del valle, correspondiente a la presencia de una antigua falla, que ayudó a conformar dicho valle.

El contacto entre materiales permeables e impermeables es un punto típico de problemas, como suele suceder en el contacto de formaciones margosas con calcáreas. El agua se almacena y mueve por la zona caliza –más permeable– y no penetra apenas en la margosa, o más impermeable. Si el túnel llega a un contacto de este tipo, puede producirse una ‘llamada’ al agua de la masa calcárea, sobre todo a través de su litoclasas y, aunque la posibilidad de arrastres sea menor, sí podrá dificultar el avance y hacer desprenderse bloques durante la perforación con sistemas convencionales (NATM, Bernold, etc.). Sin embargo, con una tuneladora cerrada (tipo EPB, con cabeza adecuada para roca) puede no haber ningún problema, como su-

Sin embargo, en otras ocasiones la proximidad a la vaguada puede entrañar serios problemas. Como ejemplo, puede citarse el cruce de los túneles ferroviarios de Guadarrama (de 27 km de longitud, cada uno) bajo el arroyo Valparaíso, afluente del río Eresma (Segovia). Tal como se esquematiza en la fig. 5, la primera tuneladora se encontró con una falla dentro de un conjunto adamellítico episiemitizado fracturado. El Río se había inscrito dentro de un relieve relativamente suave, en la zona de falla (la de Valparaíso), cerca del antiguo campamento militar de El Robledo. El recubrimiento en este caso fue, prácticamente de un diámetro y

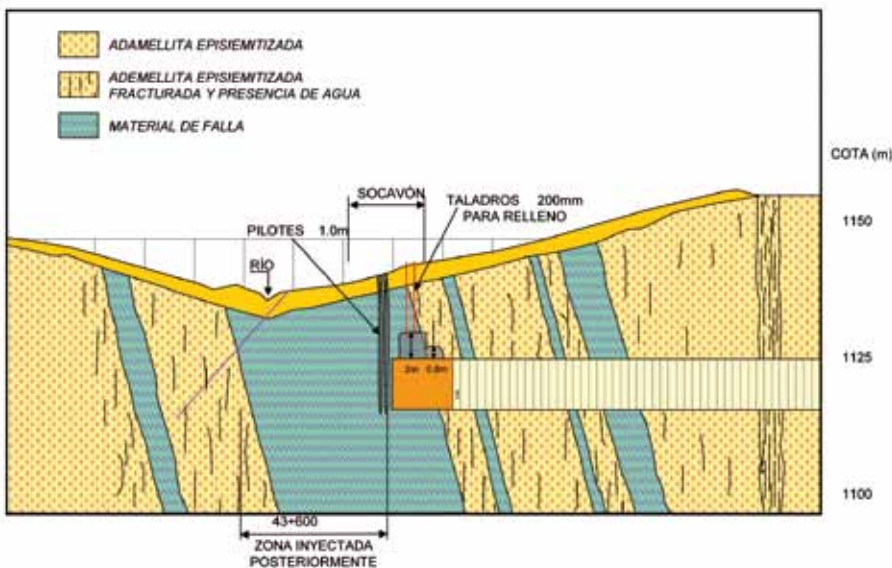


Fig. 5. Perfil geológico longitudinal de la zona de la falla Valparaíso (Túnel 4)

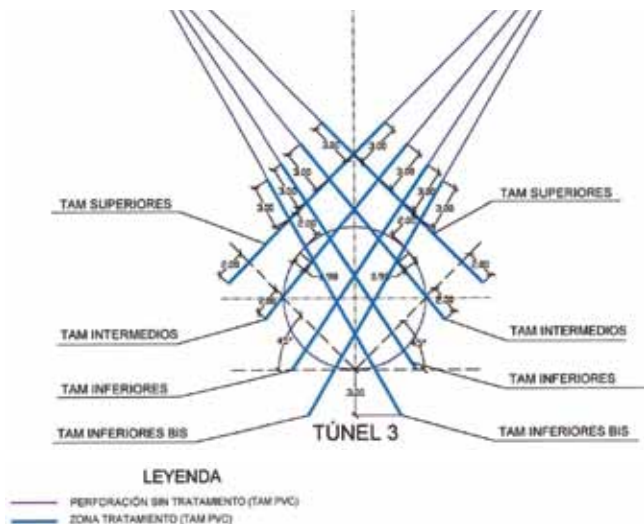


Fig. 6. Falla Valparaíso: tratamiento previo al paso del túnel 3 (alzado)

medio del túnel, por lo que el granito adamellítico estaba bastante más alterado que en zonas de mayor cobertura (Oteo, 2005).

Al perforar la tuneladora un terreno claramente más débil que la roca hasta entonces perforada, el escudo frontal cabeceó y se produjo una cierta sobreexcavación, con el consiguiente socavón superficial, de unos 4-5 m de profundidad y unos 10 m de anchura, descendiendo varios robles jóvenes por el socavón. Estos tuvieron que extraerse por el frente de la máquina, cortándoles en fragmentos de unos 30 cm de longitud. El cabeceo de la máquina obligó, al acabar el túnel, a modificar el túnel 'subiéndolo' adecuadamente.

Hubo que realizar una barra de pilotes verticales ( $\varnothing 1,0$  m) hasta 3 m por debajo del túnel (y a 2 m del frente), para estabilizar el socavón y que la máquina pudiera llegar a una pared estable y un tratamiento con inyecciones tipo TAM como el de la fig. 6. Para el paso del segundo túnel se hizo el tratamiento de la fig. 7 y se pudo pasar sin problema.

En el caso de materiales con granulometría de arenas y poca cementación (como suele suceder con las areniscas del Albense), la permeabilidad puede ser muy elevada, sobre todo en zonas fracturadas, con lo que la aportación de agua puede ser muy importante (como en el caso ya citado del Tránsito Tajo-Segura). Pero también puede haber

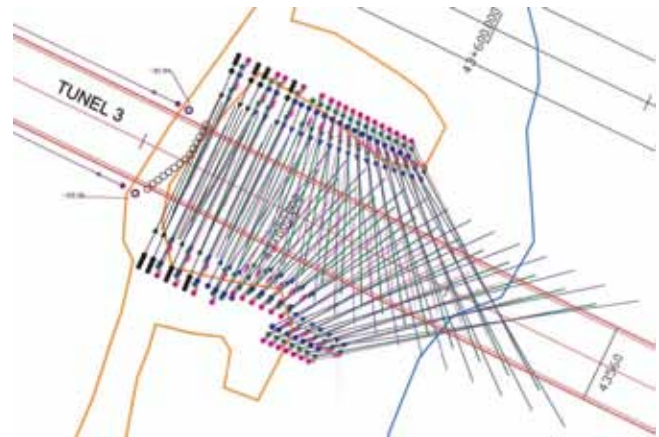


Fig. 7. Falla Valparaíso: tratamiento previo al paso del túnel 3 (planta)

problemas de este tipo en verdaderas arenas arcósicas, como las 'arenas de miga' y arenas con pocos finos (<15 %), de origen pliocénico que se presentan en el centro de España. Estos materiales no sólo pueden aportar agua si no que no tienen cohesión (o es tan pequeña que su movimiento del agua la hace 'desaparecer'), con lo que se pueden producir fenómenos de inestabilidad con facilidad, tanto en bóveda como en hastiales, con caudal importante de agua y con arrastres. En estas formaciones pliocénicas, con alternancias de arcillas ('toscos') y arenas ('de miga') el agua se acumula en los materiales permeables, con diferentes niveles piezométricos. Ello debe tenerse en cuenta a la hora de proyectar obras subterráneas, sobre todo durante el reconocimiento geotécnico, en que debe intentarse el aislar estos estratos con diferentes niveles piezométricos.

### 3. Influencias en el medio ambiente

Hay que tener en cuenta que, ya durante la construcción, puede afectarse al medio ambiente, influyendo sobre los niveles piezométricos, bien por inyectar el terreno, bien por desviar los cauces subterráneos. Generalmente es el segundo caso el factor que más afecta a las condiciones hidrogeológicas del entorno y que puede producir las posibles alteraciones en el equilibrio ambiental.

Por ejemplo, en Madrid, en la zona de la Castellana existía, bajo el acerado, el antiguo arroyo de igual nombre. Este flujo de agua dio lugar a problemas en las primeras obras

para el metro y construcción de colectores. Con el tiempo –y las obras–, el problema fue desapareciendo y hemos intervenido en obras subterráneas durante los últimos 20 años sin, prácticamente, presencia de agua en las capas arenosas.

Incluso, en algunos casos, las obras subterráneas realizadas a cielo abierto también pueden suponer un obstáculo en los movimientos de las aguas naturales, lo que puede obligar a captar el agua que afluye por un lado e inyectarla por otro. Este aspecto de ‘barrera’ trae como consecuencia, si no se le pone remedio, el ascenso del nivel freático por el lado que llega el agua (con posible inundación de sótanos próximos o expansividad de arcilla) y descenso en el otro (con posibles asentos, al aumentar las tensiones efectivas en el terreno, por descenso de las presiones intersticiales). Así ha ocurrido en una zona próxima al metro de Málaga (asientos) y en el sur de Madrid (expansividad). Generalmente, estos movimientos se producen en áreas grandes y es difícil que produzcan asentos diferenciales, pero hay que tenerlos en cuenta, para evitar daños a largo plazo.

En los túneles de montaña en materiales calcáreos puede afectarse a niveles piezométricos importantes, al producirse drenajes durante la construcción. Pero el tema puede agravarse durante la explotación y servicio del túnel. En ese caso, los proyectistas suelen considerar tres tipos de soluciones:

- Túneles ‘drenados’, en que se capta el agua (a través de láminas geotextiles, drenes en taladros, etc.) que llega al túnel, evacuándose por su sistema drenante interno. Ello pretende que, prácticamente, no haya presiones del agua sobre el túnel. Ello ha de hacerse para caudales que no sean muy grandes, (hasta del orden de 30 l/s en 1 km de túnel), a fin de no producir arrastres, aperturas de fisuras o diaclasas.

- Túneles ‘estancos’, en que se intenta hacer lo contrario: que no entre nada de agua y resistir toda la presión del agua que va hacia la excavación. Ello obliga a conseguir ya una impermeabilización de la misma desde antes de su apertura, generalmente con inyección tipo TAM o con *jet-grouting*. Ello va unido a poder perforar contra la presión del agua, mediante sistemas tipo ‘preventer’. Con ello, se construyó el sostenimiento con control de las filtraciones, para –después– ejecutar un revestimiento (armado o no) de suficiente entidad para que resista toda la presión final del agua. Esto puede hacerse también con tuneladora, con un revestimiento prefabricado de dovelas relativamente ligero y con un revestimiento (hormigonado in situ) continuo posterior, como se hizo en los túneles de Abdalajis (Málaga).

- Túneles intermedios, en que se intenta controlar el caudal que acude al túnel, con un cierto tratamiento de inyecciones, posterior a la excavación y a la colocación del sostenimiento (e, incluso, del revestimiento). Se trata, a veces, de una solución del tipo ‘no queda más remedio’, más que una solución diseñada de antemano.



Fig. 8. Inestabilidad de frente (rotura y avance de medio metro). Túnel de Casimiro Sainz (Santander)



**Fig. 9. Rotura en el frente. Túnel de Casimiro Sainz, Santander**

En el esquema de la fig. 8 (que viene a corresponder a casos que hemos vivido en Cantabria y en el País Vasco) se muestra la presencia de materiales areniscosos permeables entre materiales pizarrosos, muchos más impermeable. Esas capas de mayor transmisividad pueden estar conectadas con otras lejanas, con lo que la aportación de agua puede ser muy importante. La excavación de un túnel y el drenaje que ello puede suponer pueden afectar a mucha distancia y a fuentes en explotación urbana o agrícola. Por ejemplo, en el caso de Cantabria (túnel urbano de Casimiro Sainz) la comunicación llegaba hasta unos 30 km de distancia, con lo que podría encontrarse agua, en las areniscas poco cementadas, con una presión de unos 3-4 bares, que llegaba a romper el frente y moverlo del orden de 1 m (fig. 9).

En esas condiciones, además del problema constructivo (por la posible inestabilidad del frente), se puede presentar claramente la afección a los niveles piezométricos de cada estrato areniscoso, en función de su espesor, comunicación con el exterior, recarga de lluvia, explotación de pozos y fuentes cercanas.

#### **4. Problemas constructivos y soluciones**

A continuación, vamos a exponer una serie de ejemplos reales en que el agua y el túnel se han interactuado claramente, con problemas a veces de difícil solución.

Empezaremos por el caso de Santander (túnel de Casimiro Sainz) cuya morfología geológica hemos presentado en la fig. 8. La presencia de agua a presión en el frente originó una rotura parcial del mismo, en la zona en que dicho frente descubrió (figs. 8 y 9) esas areniscas con 3 bares de presión hidráulica. El túnel se construía con el método Bernold y la excavación se hacía con rozadora. Se procedió a cerrar el frente, gunitándole, y a realizar un tratamiento del terreno que permitiera excavar el túnel en areniscas, entre dos capas esquistosas aislado del agua.

Para ello se hizo una prebóveda con columnas de *jet-grouting*, tipo 1, distribuidas en dos coronas. Además se ejecutaron diversas columnas (una cada 2-3 m<sup>2</sup>) en el frente, a fin de ‘armar’ las areniscas decomprimidas. Las columnas de jet se introdujeron 3 m en la pizarra, con lo que se consiguió una barrera cónica respecto al agua, lo

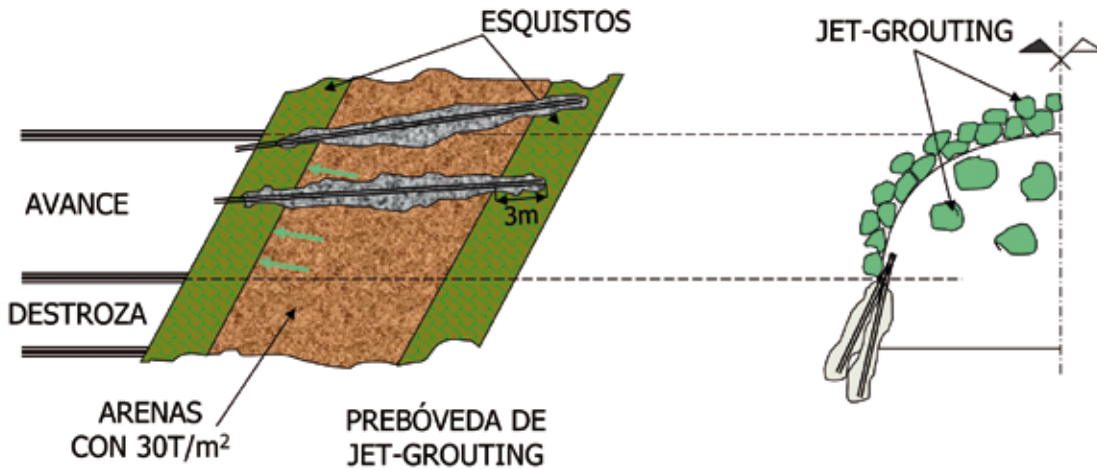


Fig. 10. Solución en el túnel de Casimiro Sainz



Fig. 11. Paraguas de inyecciones de silicatos (planta)

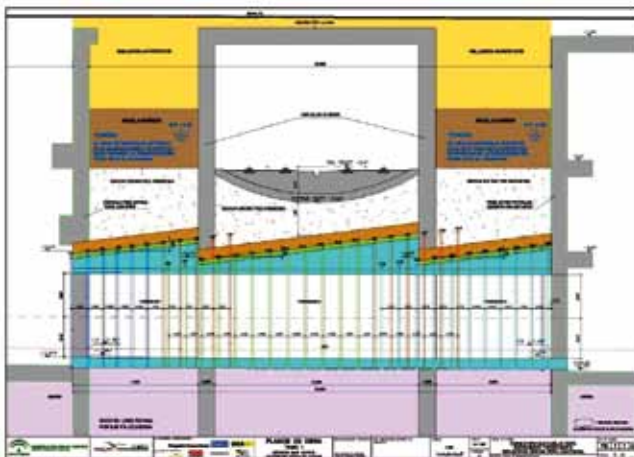


Fig. 12. Sección longitudinal de uno de los túneles del metro bajo el túnel del ferrocarril

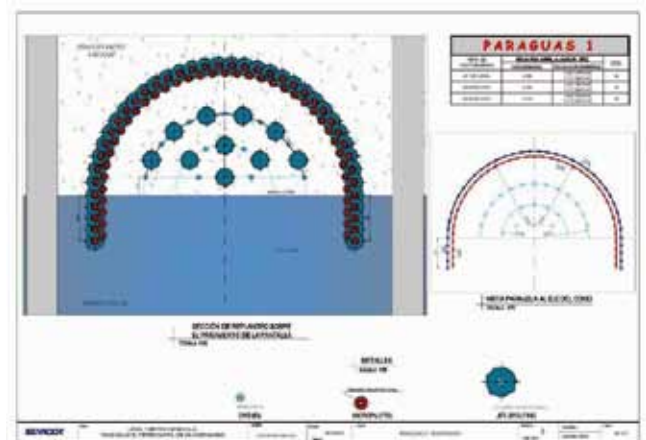


Fig. 13. Paraguas de jet-grouting y de micropilotes. Sección transversal

que permitió continuar la excavación (fig. 10). Este procedimiento se repitió cada vez que se llegaba a estratos areniscosos. En una ocasión, en que por prisas, las columnas se introdujeron sólo 0,5-1,0 m en las pizarras, el 'cierre' no fue suficiente, actuó la presión y movió el frente de excavación 1 m.

Como la excavación se hacía en dos fases, para la excavación de la destroza, se hicieron columnas de *jet-grouting* pseudoverticales (fig. 10).

Soluciones parecidas se han utilizado, por ejemplo, bajo la Casa de Campo, al ejecutar un túnel para la línea 5 del metro de Madrid, construido por el Método Tradicional de Madrid. La presencia de capas de arena con pocos finos (<20 %), saturadas y aportación de agua, hacia la inviable excavación de la bóveda, ya que se producían arrastres importantes. Por ello, hubo que acudir a la realización de 'paraguas' cónicos sucesivos, con tapón de fondo en cada caso, mediante taladros con manguitos, inyectando lechada de cemento en primera fase y silicatos enriquecidos aqua-reactivos en la segunda fase. Ello dio resultado adecuado (fig. 11).

También se utilizó un sistema de paraguas para ejecutar un tramo del metro de Sevilla bajo el túnel de San Bernardo de Renfe, excavado por procedimientos tradicionales en gravas. En este caso el paraguas fue doble: una corona con columnas de *jet-grouting* y otra con pilotes (figs. 12 y 13).

Vemos, pues, que en estos 3 casos los paraguas no son iguales:

- El *jet-grouting* se ha utilizado como prebóveda impermeabilizante en un material relativamente compacto (arenisca poco cementada).
- En el caso de las arenas, con bastante huecos, se ha utilizado la inyección de silicatos, impermeabilizante y poco resistente.
- En el caso de Sevilla, en que se necesita impermeabilización en las gravas y resistencia (por encima hay un túnel en servicio) se acude al sistema doble: *jet-grouting* y micropilotes con tubo de acero.

En alguno de estos casos (por ejemplo, Sevilla y Santander) hubo que utilizar el sistema de 'preventer' para realizar

la perforación contra la presión de agua, lo que dificultó y retrasó las operaciones de inyección.

Otras veces los problemas con el agua pueden ser inesperados. Por ejemplo, en un túnel de ADIF en Guadalajara se construyó un túnel para vía doble por el Nuevo Método Austriaco. Antes de construir el revestimiento definitivo, se produjo el hundimiento de varias docenas de metros del túnel. Unos sondeos, realizados para colocar instrumentación sobre el túnel, atravesaron una capa con agua y pusieron en comunicación el acuífero confinado existente con el sostenimiento de gunita (fig. 14). Este no se había diseñado para resistir las presiones de agua (del orden de 10-15 m de columna). Ello llevó a que, poco a poco, el sostenimiento entrara en carga y como se había colocado (el terreno atravesado era una marga yesífera de cierta calidad) con unos 10-12 m de espesor, no fue suficiente para resistir el empuje total. El agua debió añadir una compresión media en la gunita de unos 90 Kp/cm<sup>2</sup> adicionales.

Entre estas sorpresas se puede incluir el problema vivido en el Pueblo de Barajas un cinco de enero. La tuneladora que construía el túnel del metro al aeropuerto, había pasado bajo unos edificios (con algunas instalaciones auxiliares en patios

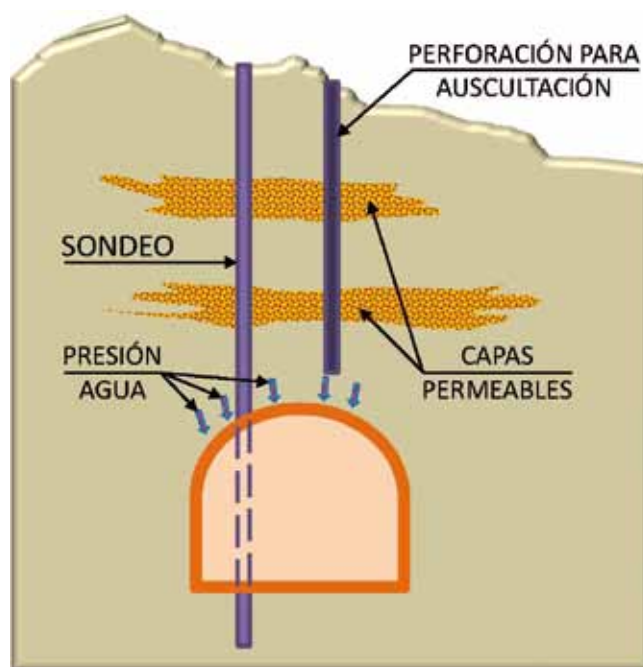


Fig. 14. Empujes de agua a través de perforaciones no selladas



muy antiguos) hacia un mes. En ese momento se detectó presencia de algo de agua, pero como la tuneladora era de frente cerrado, tipo EPB, ello no tuvo la menor consecuencia para la excavación. Sin embargo, un mes después, se abrió un socavón que aparecía en el interior de un pabellón de las antiguas instalaciones existentes en superficie. Ese día se rellenó el hueco con 600 m<sup>3</sup> de mortero. En la fig. 15 se esquematiza lo sucedido: hace mucho tiempo se hizo un pozo y un aljibe en una capa de arena con agua, para abastecer la zona (hay varios en Barajas). Posteriormente, al agotar ese acuífero confinado, se hizo otro pozo más profundo. Con el tiempo se abandonó esta explotación y cuando llegó la tuneladora cortó el pozo inferior y vació el agua que quedaba en el aljibe. Al desecarse sus paredes se produjo un hundimiento del pozo superior. En días posteriores al del primer incidente, todavía descubrimos un hueco adicional, de unos 300 m<sup>3</sup> de capacidad, bajo las zapatas y solera de un taller. Gracias a que este tenía una solera de hormigón de unos 40 cm de espesor, no se había producido su hundimiento.

También puede ser raro encontrarse con agua y gas en el terreno. Pero en las ‘margas azules del Guadalquivir’, en el centro de Sevilla hemos encontrado esta circunstancia. Para el proyecto inicial del metro se ejecutó un pozo (con pantallas continuas), de Ø 25 m, atravesando las arcillas y gravas superiores e introduciéndose unos 10 m en las “margas”. Este pozo iba a ser la salida de la estación de Plaza Nueva. Una noche de Feria de Abril, el fondo del pozo se levantó 1 m, por

acción de la presión del gas-agua existente en profundidad, dejando 8-9 m de margas totalmente decomprimido y hojoso (ensayos SPT posteriores dieron golpes de 5-6/30 cm).

En el caso de túneles a cielo abierto, al abrigo de pantallas continuas, la presencia de un nivel piezométrico tiene diversas consecuencias:

- Empujes muy importantes sobre la pantalla (que pueden triplicar los del terreno), lo que se traduce en mayor espesor de la pantalla, mayor armadura y mayor necesidad de apuntalamiento (e, incluso, preapuntalamiento).
- Riesgo de derrumbes durante la excavación de los módulos de las pantallas, sobre todo si el terreno es arenoso con gruesos y gravas.
- Riesgo de filtraciones en juntas entre pantallas, con probabilidad de fallo de las mismas y de penetración de terreno en el interior del recinto a excavar.
- Riesgo de levantamiento o rotura de fondo, si las pantallas no tienen la longitud adecuada o no se producen en un estrato impermeable.

En la fig. 16 se muestra un ejemplo de rotura de fondo en una zona del metro de Sevilla, en que –para dejar paso al agua y no hacer efecto barrera– se construyó un ‘portillo’,

## TRAMPAS PARA TUNELADORA

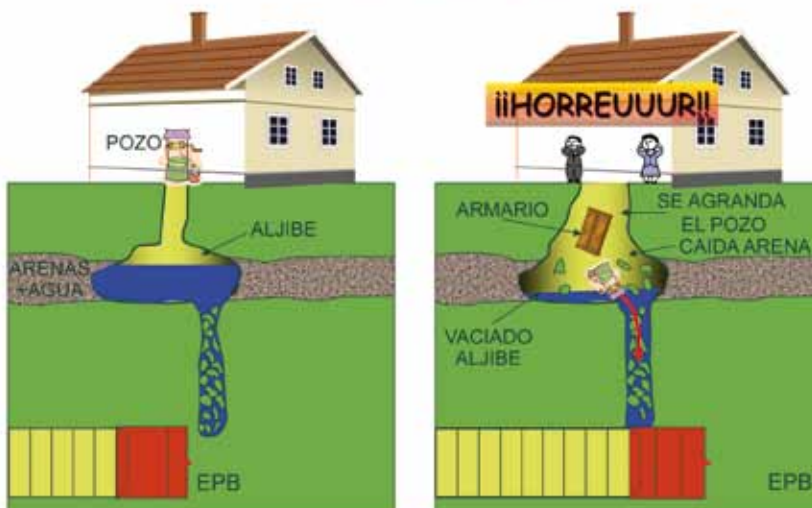


Fig. 15. Pozos y aljibes sobre una tuneladora. Consecuencia: socavón superficial

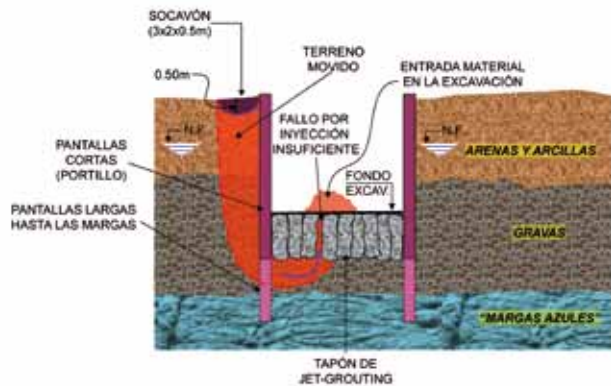


Fig. 16. Socavón producido en una zona con "portillo" en las pantallas continuas. Metro de Sevilla (Oteo, 2015)

con un tapón de *jet-grouting* bajo la máxima profundidad excavada. El control de ejecución de dicho tapón no fue todo lo eficiente que debería haber sido y el agua rompió el tapón puntualmente, arrastrando terreno (socavón en trasdós de la pantalla) y llenando de agua el túnel.

En la Estación Puerta de Jerez hubo que hacer –por motivos que serían muy largos de explicar– una parte de las pantallas con pilotes secantes, la mitad de los cuales no va armada. La presión del agua era de 2,4 bares, por lo que o falló una junta o se rompieron pilotes no armados (o las dos cosas). Con ello se produjo una entrada de material en la estación (fig. 17), provocando un socavón superficial (que se 'tragó' un kiosco). Hubo que reunir a los tratamientos que se esquematizan en la fig. 18.

En el ferrocarril Málaga-Fuengirola, hace muchos años y diez años después de construir el ferrocarril con pantallas (fig. 19) se produjo un fallo de una junta (en que había quedado bentonita) y penetraron 60 m<sup>3</sup> en la sección del túnel, con el consiguiente socavón superficial en la calle Cuarteles. En el túnel, en ese momento, podrían observarse diversos refuerzos y tubos de inyección, que indicaban que el problema –en menor magnitud– llevaba años presente.

En estos casos de túneles con pantallas, en metros como el de Málaga y Valencia se ha acudido –para evitar el efecto barrera– al sistema de 'almenado' o paso superior del agua sobre el túnel.

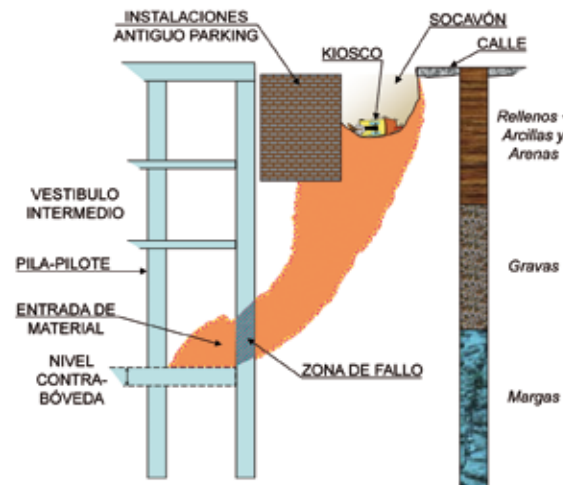


Fig. 17. Socavón en Puerta de Jerez (Oteo, 2015)

## 5. Otras cuestiones

No queremos hacer esta exposición demasiado extensa por lo que no incluiremos más casuística.

Simplemente queremos, para finalizar, recordar que existen otros puntos de notable interés.

- Los efectos reales del drenaje en el túnel sobre el terreno circundante.
- La situación del drenaje del túnel dentro de la sección definitiva, la cual debe estudiarse para evitar ampliar la excavación innecesariamente.
- La utilización de soleras planas, que son fáciles de ejecutar, pero resisten mal a flexión, si hay empujes de agua.
- La utilización de soleras curvas o poligonales (de más facilidad de ejecución).
- Los problemas de colapso y expansividad en suelos metaestables por los cambios de humedad.
- La colocación de láminas drenantes o impermeables entre sostenimiento y revestimiento.
- La conservación de elementos de drenaje a lo largo del tiempo. En este sentido cabe señalar el caso del túnel de Niévares, en que los depósitos de carbonatos (casi cegan-

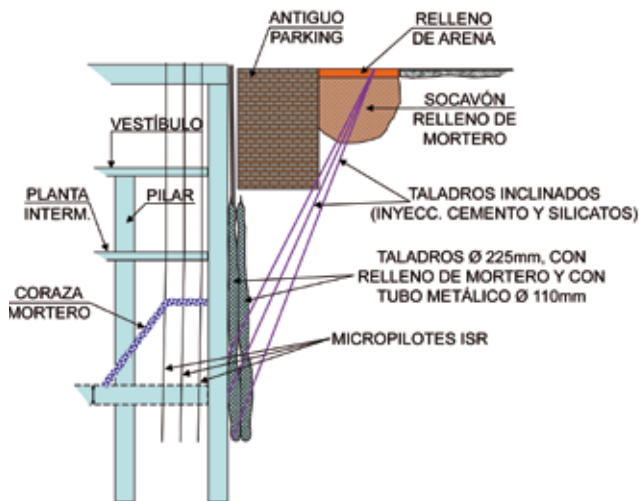


Fig. 18. Tratamiento en Puerta de Jerez (Oteo, 2015)

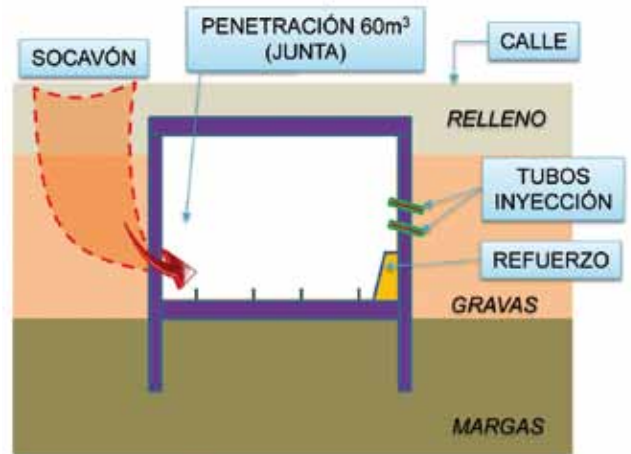


Fig. 19. Socavón en c/ Cuarteles de Málaga

do, los tubos de drenaje) y la escasa presencia de arquetas de registro han llevado a una actuación de emergencia descrita por Fernández Nespral y otros (2014).

- El caudal de filtración que se puede admitir, siempre será discutido. Según la Norma UNE 104424 un túnel ‘seco’ o con goteo de agua, puede admitir una filtración menor de 0,001 o menor de 1,0 l/m<sup>2</sup>, respectivamente. También suele utilizarse el criterio de que una filtración de menos de 5 l/sg/km en un túnel no tiene importancia; cuando esta agua se multiplica por 10 ya queda evidenciado que hay problemas, etc.

Animamos a los lectores de este trabajo, si es que llega a haberlos, a que si están interesados en este tema, contacten con Aetos para formar parte del Grupo de Trabajo que va a iniciar pronto sus cometidos. **ROP**

**Referencias**

- FERNÁNDEZ-NESPRAL, C., OTEO, C., & SOLA, P. (Septiembre de 2014). “Rehabilitación de los túneles de Niévares (Asturias) por las patologías derivadas del depósito de sales carbonatadas en su sistema de drenaje”. Revista Obras Públicas (nº 3557), pp. 31-54.
- OTEO, C. (2005). “Geotecnia, auscultación y modelos geomecánicos en los túneles ferroviarios de Guadarrama”. En capítulo del libro “Túneles de Guadarrama” (págs. 189-220). Madrid: Ed. Entorno Gráfico.
- OTEO, C. (2015). “Quince lecciones y un epílogo sobre Geotecnia de Obras Subterráneas”. Madrid: Asociación Técnica de Carreteras.