

EL AGUA EN LA CONSTRUCCIÓN Y EXPLOTACIÓN DE TÚNELES DE COMUNICACIÓN

Manuel Romana Ruiz

Universidad Politécnica de Valencia/STMR

Resumen

Se repasan los problemas causados por las filtraciones de agua en la explotación de túneles y obras subterráneas. En muchos casos los problemas se derivan de defectos u omisiones de proyecto. Se clasifican los túneles y obras subterráneas en función de su posición respecto al nivel freático (general o estacional) que condiciona las filtraciones. Los túneles urbanos presentan una casuística propia. Se analiza la problemática del drenaje de túneles de acuerdo con la clasificación anterior y se presentan varios ejemplos concretos de problemas debidos a la entrada de agua en túneles. Finalmente se comentan problemas de expansividad de terrenos

1. Introducción

Los túneles tienen “mala prensa”. Los usuarios, y el público en general, recelan de ellos y el resultado es que cualquier incidente o accidente en un túnel recibe una cobertura mediática mucho mayor de la que recibiría si el incidente se hubiese producido fuera de un túnel. Además los políticos, en España y en muchos otros países, han cogido la costumbre de utilizar los problemas en los túneles como arma arrojadiza contra el partido contrario, tanto en el poder como en la oposición. De forma que los túneles siempre están, no en el candelero sino en el candelabro (que, como se sabe, es peor porque tiene siempre varios candeleros).

Un aspecto que el público da siempre por supuesto es que, puesto que el agua fluye en la superficie del terreno, y los túneles están en el interior, donde no llueve, los túneles deben estar secos. Y si no lo están debe a causa de alguna negligencia importante. De hecho en el interior del terreno hay agua (volveremos sobre este tema más adelante) y el agua tiene querencia a introducirse en los túneles de forma subrepticia o a chorros.

Por citar un solo ejemplo de carrusel mediático-político sobre una inundación en un túnel recordemos la inundación en los túneles de la M-30. Los túneles estaban impermeabilizados y tenían dispositivos de bombeo para su drenaje. Pero se inundaron varias veces por diversas causas: entrada de agua superficial por los accesos a los túneles desde calles inundadas; problemas en el Puente del Rey (que es el punto más bajo de la red) donde persiste la influencia del freático del arroyo Meaques (canalizado en la Casa de Campo); perforación de la impermeabilización superior durante la construcción de la cimentación de las pasarelas de diseño del parque del Manzanares (según carta abierta del ingeniero Manuel Melis) coincidiendo con el desbordamiento de un colector y estando fuera de servicio parte de los equipos de bombeo.

Todas estas causas son problemas “normales” de ajuste de una instalación tan compleja como la de los túneles de la M-30 que, de no haber sido totalmente previstas



Figura 1.-Titulares y fotos en el diario El País el 30 de abril de 2007

en el proyecto, tienen fácil arreglo. Pero el “ruido” organizado en torno a ellas fue enorme, y en mi modesta opinión injustificado. Es más nuestras ciudades, como la mayoría de las urbes del llamado “primer mundo”, están muchas veces en equilibrio inestable, como lo prueban las numerosas incidencias que sufren por causas climáticas o de cualquier otra índole. Pero lo que se tolera cuando nieva no se tolera cuando ocurre en un túnel.

La M30 no es la única circunvalación subterránea en el mundo que se inunda. La figura 2 muestra una inundación en el túnel de Oslofjord de función equivalente “grosso modo” a los túneles del Pardo en la M 40.



Figura 2.- Inundación en el túnel de Oslofjord (Oslo)

En túneles situados en zonas muy frías las filtraciones pueden dar origen a la formación de “montículos” de hielo sobre la calzada, con riesgo de accidentes. Este problema es general en algunos países, como por ejemplo en Noruega, donde se prevé en los proyectos impermeabilizando el túnel, aunque no esté sostenido ni revestido (Public Road Administration Norway 1992), pero también puede producirse en nuestro país.

Tiene interés evocar aquí el dictamen de la Comisión Jurídica Asesora del Gobierno de Aragón de dos de julio de 2002, cuyo resumen final se reproduce a continuación en la figura 3.

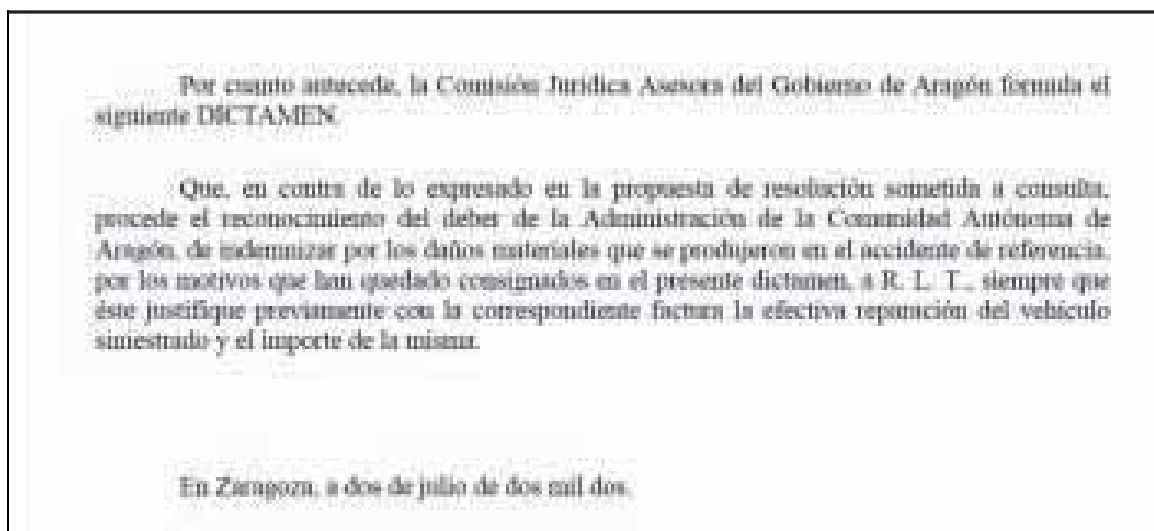


Figura 3.- Dictamen de la Comisión Jurídica Asesora del Gobierno de Aragón

El dictamen razona que hubo relación de causa a efecto entre el accidente de un vehículo que patinó debido al montículo de hielo en la calzada y las filtraciones en un túnel, que era de competencia de la Diputación de Teruel, filtraciones conocidas y no señalizadas. El Dictamen niega que el hecho de que “las muy bajas temperaturas de aquellos días...hicieran imprevisible e inevitable la formación de hielos” eximiera de responsabilidad de la Administración a la que correspondía la gestión del túnel ya que los daños podían haber sido evitados en función de “el estado de los conocimientos de ciencia o de la técnica existentes en el momento de producción del daño” (según jurisprudencia del Tribunal Supremo). Por lo tanto, según el Dictamen, conocidas las filtraciones en el túnel, deberían haber sido corregidas mediante la pertinente obra de reparación de acuerdo con las técnicas actuales del momento.

No conozco ningún caso similar pero sin duda se habrá producido porque hay sentencias que condenan a la administración a causa de accidentes debidos a baches en la calzada. Parece que, en el futuro, las administraciones propietarias de los túneles y sus agentes delegados para la explotación van a correr riesgos jurídicos no previstos en el proyecto, y precisamente a causa de las imprevisiones de proyecto, construcción y puesta en servicio.

2. El drenaje en el proyecto

El drenaje de los túneles debe partir de un buen estudio hidrogeológico de proyecto, lo que es raro de encontrar. En muchos proyectos se pide a un hidrogeólogo que escriba rápidamente el capítulo de hidrogeología que, aunque esté bien hecho, no tiene

trabazón real con el resto del proyecto. Y con frecuencia no se aplican rigurosamente las especificaciones técnicas de la Administración.

El conocimiento de la buena práctica existe, y puede consultarse en fuentes editadas de fácil acceso (véase por ejemplo el excelente artículo sobre el tema del Ingeniero Emilio Bayón en Ingeotúneles, volumen 10, capítulo 5, que puede también consultarse en la página web de INOCSA).

Las Especificaciones Técnicas son buenas (véase por ejemplo la Instrucción IGP-0.1.2.5., Anejo de Geología, en el Manual de Instrucciones y Recomendaciones para la redacción de los proyectos del Adif y otras Instrucciones IGP, 2008). Y tiende a aumentar la atención de las administraciones (¿escarmentadas?) a los problemas hidrológicos e hidrogeológicos. Por ejemplo la futura Instrucción para el Proyecto de Túneles en Cataluña (en elaboración) dedica uno de sus capítulos íntegramente a prescribir, con minucioso detalle, como debe realizarse el estudio hidrogeológico en el proyecto.

Entonces ¿qué es lo que falla? Quizá el problema radique en que no se presta al drenaje la atención debida ni en el proyecto ni en la ejecución. Y se trata realmente de un riesgo, riesgo durante la construcción y durante la explotación, que debe ser tratado mediante los métodos de Análisis de Riesgos que constituyen la esencia del nuevo planteamiento del proyecto y construcción de túneles.

El Código ITIG ha sido promovido en 2006 por el ITIG::International Tunnelling Insurance Group (Grupo internacional de aseguradores y reaseguradores de túneles) con el título “Código de práctica profesional para la Gestión de Riesgos en Obras de Túneles”. Ya se está implementando en las obras por las compañías de Seguros y está llamado a convertirse en un estandar mundial. Según dicho Código la Gestión y Análisis de Riesgos es un proceso sistemático que incluye los siguientes puntos.

1. Identificación de los peligros (hasards) y riesgos asociados, mediante Análisis de Riesgos, y de su impacto en costes y programas, incluyendo los riesgos a terceros.
2. Cuantificación de los riesgos incluyendo su implicaciones en programas y costes.
3. Identificación de medidas pro-activas para eliminar o mitigar los riesgos.
4. Identificación de los métodos a utilizar para el control de riesgos.
5. Distribución de los riesgos entre las diversas partes interesadas.

El código menciona el agua freática en numerosos apartados (6.2.2 a, 6.2.2 b, 6.3.1 a, 6.3.1 d, 8.3.2 c, 8.3.4 f, 8.5.3, 8.5.4, y 8.6.1) enfatizando la necesidad de su conocimiento y del control de los riesgos asociados a ella.

Es evidente que se trata de un proceso con múltiples agentes, que deben colaborar estrechamente. El riesgo debido al agua en los túneles se presenta en dos fases bien distintas: la etapa de construcción, con impactos a veces muy importantes, y la etapa de explotación, con costes de mantenimiento y riesgos para los usuarios.

3. Requisitos de estanqueidad de los túneles en España

Los requisitos de estanqueidad están definidos en España por la Norma UNE 104 424 (de febrero de 2.000) en su Anejo Informativo A y se reproducen a continuación en la Tabla 1.

Grado de impermeabilidad	Características de la humedad	Utilización de la obra	Filtraciones l/día/m ²
1	No permitida la difusión de vapor desde el exterior	-Locales secos -Locales refrigerados -Presencia continuada de personas -Almacenes sensibles a la humedad (papel, alimentos)	0
2	SECO Permitida la difusión de vapor	-Instalaciones militares -Locales húmedos (baños) -Locales con instalación de suministro de energía (subestaciones) -Locales subterráneos de uso general	0
3	SECO	-Almacenes y locales comerciales -Estaciones de metro	<0,001
4	CASI SECO	-Túneles de autopista -Túneles de montaña -Túneles ferroviarios de Alta Velocidad	<0,01
5	Filtraciones capilares	-Aparcamientos -Túneles de carretera y en roca	<0,1
6	Ligero goteo de agua	-Túneles de ferrocarril -Líneas de metro	<0,5
7	Goteo de agua	-Túneles de alcantarillado	<1,0

Tabla 1.- Requisitos de impermeabilidad en túneles y obras subterráneas según la Norma UNE 104424 (Anejo informativo A) Febrero de 2.000

Como se ve los requisitos son bastante estrictos y el goteo, aunque sea ligero, no se considera conveniente en ningún túnel de circulación viaria ni en ningún local de aparcamiento. La razón de la mayor exigencia en túneles de montaña es precisamente el riesgo de formación de hielo en invierno.

Pero si hay goteo, generalmente ligero, el mejor método de prevenir el riesgo sería utilizar pavimentos asfálticos con granulometría abierta, como ya se está haciendo en muchas carreteras y calles y vías urbanas. Esto está formalmente prohibido en túneles largos por la normativa actual española, que ha añadido el requisito de firmes de hormigón a la trasposición a España de la Directiva Europea sobre Seguridad en Túneles de la Red Transeuropea de Carreteras.

No es éste el sitio de introducir la polémica, siempre activa, entre los firmes de hormigón y los asfálticos, pero permítaseme señalar dos puntos concretos.

1. PIARC autoriza el uso de firmes asfáltico de granulometría cerrada, que no eliminan las filtraciones superficiales;
2. La negativa al uso de firmes de granulometría abierta se basa en el argumento de que estos firmes facilitarían la circulación de líquidos inflamables, o inflamados, a lo largo del túnel. Este evento no se ha producido nunca, que yo sepa, en los túneles españoles y, por otra parte, el firme de hormigón no inhibió la transmisión entre vehículos del incendio en el Túnel del MontBlanc, a causa del flujo sobre la calzada de margarina líquida ardiente.

4. Los túneles en relación con el agua en el terreno

Tradicionalmente se ha clasificado a los túneles en dos categorías en relación con el agua: drenados y no drenados.

Los túneles drenados no buscan la impermeabilidad total y permiten un flujo moderado de agua a canalizar por medio de cunetas y conducciones dentro de la sección del túnel. Puesto que se permite el flujo de agua ésta no desarrolla presiones intersticiales apreciables sobre el sostenimiento o revestimiento. Estos túneles constituyen la gran mayoría de los construidos para vías de comunicación. Las técnicas de impermeabilización son bien conocidas:

- membrana impermeable y geotextil entre el revestimiento y el sostenimiento de hormigón “in situ”
- pieza impermeable separada de la superficie interior del túnel (la “huevera” de plástico de los túneles no revestidos o el “paraguas” de fibrocemento protegiendo la bóveda de las estaciones antiguas, por ejemplo en el Metro de Madrid)
- bandas de neopreno (o rellenos con materiales hidrofílicos, como por ejemplo hidrotita) entre las dovelas de los revestimientos prefabricados de hormigón en los túneles construidos con tuneladora, que en teoría garantizan la impermeabilidad pero en la práctica no (figura 4).



Figura 4.- Filtraciones en un túnel hidráulico construido con dovelas

Los túneles no drenados se supone que son totalmente impermeables, prácticamente sin flujo de agua a su interior. Por lo tanto se desarrolla sobre el revestimiento toda la presión intersticial del acuífero dentro del cual se sitúan. El número de túneles no drenados es escaso (excepto en los túneles hidráulicos que tienen una casuística propia).

En realidad es conveniente clasificar los túneles, a efectos de su relación con el agua en las siguientes categorías, clasificadas de menor a mayor importancia del problema:

- Túneles situados sobre el nivel freático y encajados en terrenos poco permeables
- Túneles situados sobre el nivel freático y encajados en terrenos permeables (por ejemplo calizas o areniscas fracturadas).
- Túneles situados sobre el nivel freático general permanente, pero bajo niveles freáticos colgados y/o estacionales.
- Túneles situados dentro de la franja de variación estacional del nivel freático.
- Túneles situados bajo el nivel freático.
- Túneles urbanos, que tienen una problemática propia.

En los apartados siguientes comentaremos la casuística de estas categorías incidiendo no tanto en los problemas de construcción que se presentan, sino en los problemas de explotación, que a veces sólo aparecen a largo plazo.

5. Túneles situados sobre el nivel freático y encajados en terrenos poco permeables

En España muchos de los túneles entran en esta categoría. Las vías de comunicación tienden a tomar cada vez cotas más altas respecto al fondo de los valles por los que discurren, fondo que es el que controla el nivel freático y los túneles están altos respecto a él.

Estos túneles presentan en general pocos problemas en relación con el agua y filtraciones escasas.

Tiene interés recordar aquí que si el terreno encajante es ácido (macizos ígneos, areniscas silíceas...) el agua que fluye dentro del terreno por la escorrentía subterránea será también ácida, con un valor bajo del pH, por debajo de 7. Al atravesar el hormigón del sostenimiento/revestimiento el agua ácida tenderá a disolver la cal libre (hidróxido cálcico que es muy soluble) del hormigón. Después, cuando el agua entre en los sistemas de drenaje, tenderá a evaporarse y a depositar acúmulos de calcita que acabarán taponando los drenes en pocos años (figura 5). El proceso es más importante cuanto más poroso sea el hormigón y cuanta más cal libre contenga, lo que pasa más en los hormigones antiguos que en los modernos.

Este fenómeno de taponamiento casi total de los sistemas y cunetas de drenaje ocurrió en el primer túnel de peaje de Guadarrama, puesto en servicio en 1963. Veinticinco años después hubo que reconstruir todo el sistema de drenaje.



Figura 4.- Acumulación de calcita en un dren en un túnel.

6. Túneles situados sobre el nivel freático y encajados en terrenos permeables

Hay distintas formaciones geológicas que son permeables pero las que abundan más en España son las formaciones calcáreas. Si las calizas no son margosas resultan permeables y es muy probable la formación de conductos cársticos, que pueden ser de muy distintos tamaños. Estamos acostumbrados a pensar solamente en los grandes sistemas cársticos con cavernas visitables. Pero en la mayoría de los sistemas cársticos el tamaño de los conductos es decimétrico o incluso centimétrico. Aunque se esté encima del nivel de base del carst el agua de la lluvia circula lentamente por el terreno, de arriba abajo, y produce filtraciones en los túneles.

Si los túneles tienen poca cobertera la filtración tiende a ocurrir durante varios días después de la lluvia. Ese es el caso de muchos túneles valencianos, sobre todo en los construidos hace años, como por ejemplo el Túnel de Jeresa en la Autopista AP-7.

Si los túneles tienen gran cobertera el macizo calcáreo puede acumular mucha agua que la excavación subterránea drenará. Las filtraciones pueden ser importantes y deben ser consideradas seriamente en el proyecto y explotación de la obra subterránea.

Un ejemplo “de libro” de este problema lo proporciona el macizo del Somport en Huesca, donde hay dos obras subterráneas con grandes coberteras, próximas a los 900 metros, dentro de un macizo calcáreo denominado “El Tobazo”. Son el Túnel de Somport y el Laboratorio Subterráneo de Canfranc (dedicado al estudio de las partículas de neutrinos que emite el Universo, y promovido por la Universidad de Zaragoza)). El Laboratorio está situado en varias cavernas entre el Túnel y su galería de seguridad (antiguo túnel de ferrocarril). En el proyecto del Túnel se tuvo en cuenta el agua correctamente y se construyó una caverna para los sistemas de drenaje y bombeo, anexa al túnel. La calzada está seca. En el proyecto del Laboratorio la atención al problema del drenaje fue menor. Las filtraciones, infravaloradas en proyecto, excedieron de la capacidad del sistema de drenaje que ha debido ser reconstruido íntegramente aumentándolo, con algunos problemas de gálibo.

7. Túneles situados sobre el nivel freático general permanente, pero bajo niveles freáticos colgados y/o estacionales

Este caso también es frecuente en los túneles de profundidad media y/o que atraviesan sierras más o menos ortogonalmente a ellas. Los arroyos y ríos en superficie

tienden a originar grandes niveles freáticos colgados en invierno, que inevitablemente tienden a producir filtraciones en el túnel a través de accidentes geológicos, siempre presentes (fallas, diques). La figura 6 muestra un caso de filtraciones en la boca de un túnel a través de un dique basáltico. Es prácticamente imposible eliminar estas filtraciones mediante inyecciones, ya sea en superficie o desde el interior del túnel. Lo más que se consigue es reducir las caudales, y eso después de campañas importantes.



Figura 6.- Filtraciones a través de un dique basáltico en un túnel en Virginia

Un ejemplo notable de este problema lo constituye el túnel ferroviario de Guadarrama, cuyos dos tubos se han excavado con tuneladora. En la vertiente Norte de la sierra de Guadarrama hay varios ríos y arroyos, cuyo cauce está encajado en fallas locales. En invierno las filtraciones crecen y, aunque no dificultan la circulación del trenes, el ADIF ha iniciado pequeñas obras de corrección en el interior de los dos tubos (en su tramo Norte) construyendo recintos de drenaje y bombeo del agua al exterior.

8. Túneles situados dentro de la franja de variación estacional del nivel freático

En España las condiciones hidrológicas son siempre muy variables de año a año. Y, consecuentemente, los niveles freáticos tienen variaciones anuales importantes además de las estacionales. Este problema está especialmente presente en la franja

mediterránea española y ha creado problemas serios de inundación en muchas instalaciones subterráneas, como por ejemplo un aparcamiento en Badalona (acuífero del río Besós), o en la estación de Guimerá del Metro de Valencia (acuífero del río Turia, cauce antiguo).

Adicionalmente las crecidas de los ríos pueden causar una subida del nivel freático con inundación de sótanos e instalaciones subterráneas, como por ejemplo en Logroño con el Ebro o en Bonn con el Rhin (que inundó totalmente unas instalaciones dedicadas a un futuro Parlamento de Alemania, antes de la reunificación).

Cuando, en un año húmedo, sube el nivel freático el agua penetra por la solera y su primer efecto es la inutilización de las bombas y circuitos eléctricos que no estén preparados para trabajar dentro del agua. El nivel del agua empieza a subir en la obra subterránea y es preciso recurrir a medidas de emergencia para su achique.

A veces el nivel freático desciende otra vez en un año seco, y se puede acometer la impermeabilización de la solera. Pero también puede suceder que haya varios años húmedos seguidos.

Es preciso que el proyecto tenga en cuenta este riesgo y que en toda obra subterránea que lo corra proyecte y construya una solera impermeable, capaz de resistir las subpresiones esperables. Además el riesgo de inundación debe estar presente en el diseño de instalaciones eléctricas y de bombeo.

9. Túneles situados bajo el nivel freático

Afortunadamente no hay en España muchos túneles situados permanentemente bajo el nivel freático, aunque su número crecerá en el futuro en entornos urbanos a medida que se saturen las superficies urbanas (un fenómeno que se está dando ya con los accesos ferroviarios a muchas ciudades).

Los túneles situados bajo el nivel freático deben impermeabilizarse totalmente, incluyendo la solera y su diseño estructural debe tener en cuenta las presiones intersticiales debidas al agua. Un ejemplo de impermeabilización completa puede verse en la figura 7.

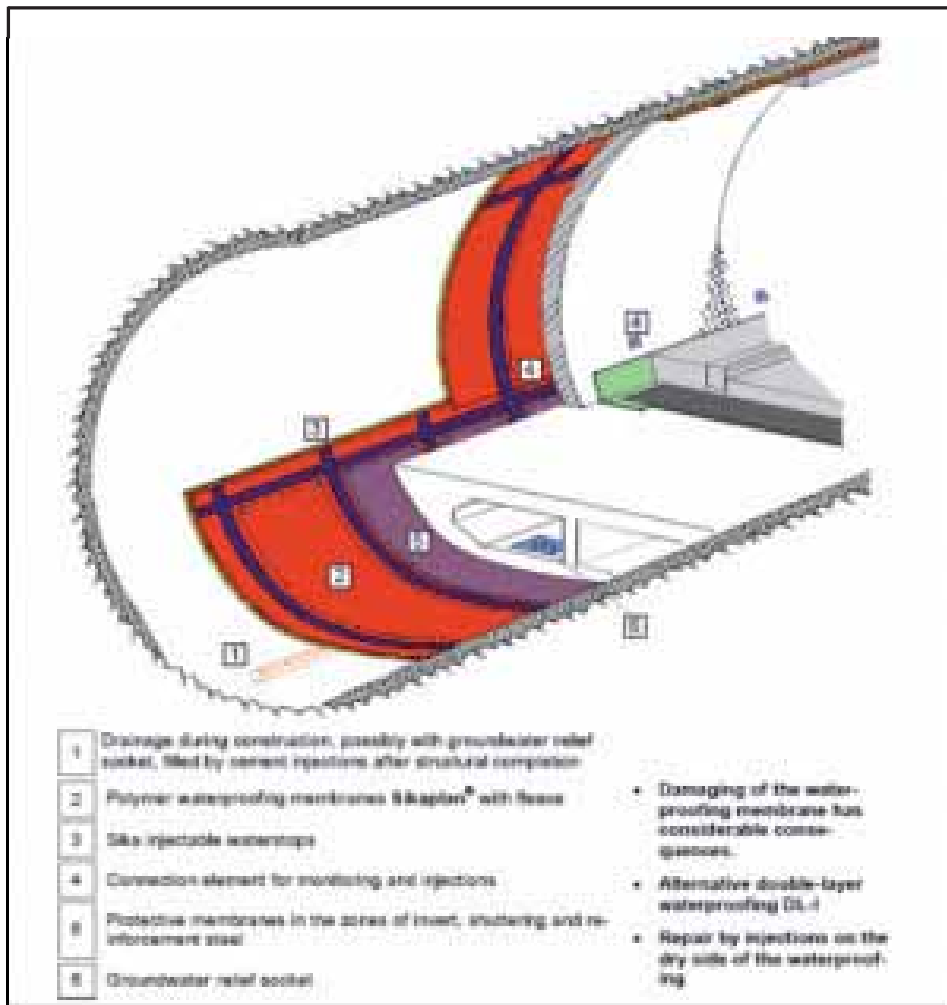


Figura 8.- Esquema del proceso constructivo para una impermeabilización integral de un túnel (cortesía de Sika)

El ejemplo español más reciente de esta problemática es el túnel de Abdalajis, con dos tubos, de más de 7 km. de longitud, en el tramo ferroviario de Alta Velocidad Córdoba-Málaga. Puede hablarse públicamente de este problema porque el propio ADIF, con responsabilidad y seriedad técnica, lo aborda en su página web. Además hay un excelente artículo del Ingeniero Gustavo Armijo sobre las inyecciones y reparaciones en curso (publicado en la revista INGEOPRES).

El perfil geológico simplificado del túnel se presenta en la figura 9. (parte central y norte, p.k 2.600 a boquillas N), tomada de la página web de la empresa austriaca Jaeger que realizó la perforación del tubo Oeste en UTE con Dragados.

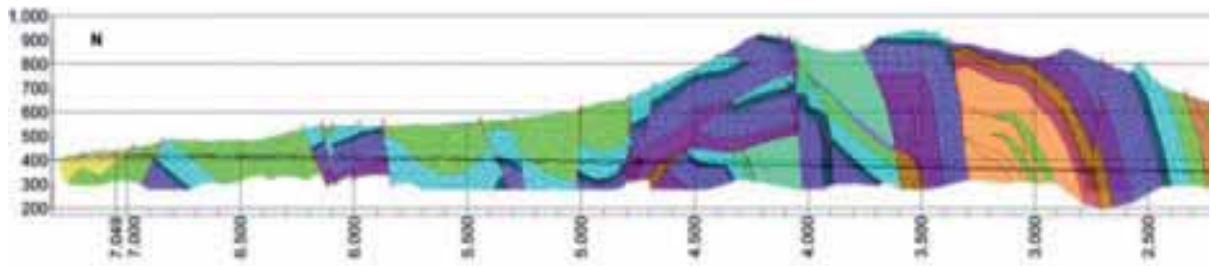


Figura 9.- Perfil geológico simplificado del túnel de Abdalajis (p.k 2.600 a final) (www.Jaeger.com)

La geología, que corresponde al sistema Penibético, es extraordinariamente complicada, con una serie de escamas tectónicas que cabalgan una sobre otra y están compartimentadas por numerosas fallas subverticales. Varias de estas escamas son de naturaleza calcárea y en ellas se desarrollan acuíferos, que son explotados para abastecimiento del pueblo de Abdalajís y para aprovechamientos agrícolas.

El reconocimiento de proyecto (con numerosos sondeos y pozo) no detectó agua a presión a la cota del túnel y consideró que los acuíferos estaban aislados entre sí. El túnel se proyectó como drenado con un sostenimiento-revestimiento de dovelas prefabricadas de gran calidad, pero con una resistencia limitada a las presiones intersticiales que podían llegar a niveles altos.

Los acuíferos sí estaban conectados entre sí y la excavación del túnel, con tuneladoras, provocó un aporte muy importante de agua a los dos tubos y un descenso de los niveles piezométricos de casi 200 m. Para resolver este problema el ADIF ordenó la construcción de un revestimiento interior suplementario, de hormigón encofrado de alta resistencia, en la parte afectada del túnel. El cometido de este revestimiento es impermeabilizar el túnel y, a la vez, resistir las presiones hidrostáticas que actuarán sobre el túnel cuando los niveles piezométricos vayan volviendo a subir como consecuencia de la impermeabilización del túnel, que en este tramo tiene la categoría de “no drenado”. Simultáneamente se está realizando una gran campaña de inyecciones y de control de los niveles piezométricos.

Y en ello está el ADIF. Los dos tubos del túnel están en servicio hace años, aunque con velocidades limitadas a causa de la entrada de agua. Esperemos que en el próximo Simposio de Túneles pueda anunciarse que las reparaciones efectuadas han tenido éxito y los niveles de los acuíferos han vuelto a ser los mismos que antes de la construcción del túnel.

España no tiene la exclusiva de este problema. Durante la construcción del túnel hidráulico de Castanheira II, en el acueducto entre Castelo do Bode y Quinta da Marquesa, a 30 km. al Norte de Lisboa, sobrevino una entrada de agua de 400 l/s con un arrastre de sólidos de más de 100 m³ y un colapso del frente. La formación geológica no era caliza sino arenisca arcósica fracturada del Jurásico, con un nivel freático por encima de la cota del túnel. (Jeremias et al, 2008.)

Un caso especial de túneles bajo agua son los túneles bajo ríos. Es frecuente que las redes de Metro incluyan túneles bajo cauces de ríos (Besós en Barcelona, Manzanares en Madrid, Guadalquivir en Sevilla, cauce antiguo del Turia en Valencia) Se trata de problemas específicos con solución distinta en cada caso. Están también previstos túneles viales bajo el río en la circunvalación de Sevilla. Puesto que el punto más bajo de la traza está precisamente bajo el cauce resulta imperativo un sistema de drenaje y bombeo a prueba de incidencias.

10. Túneles urbanos

En los apartados anteriores se han citado algunos problemas de los túneles urbanos. Generalmente los túneles viales urbanos tiene gran tráfico y su trazado está totalmente condicionado por el tejido de la ciudad, por lo que las condiciones de drenaje longitudinal no pueden escogerse. Adicionalmente presentan algunas características peculiares: son muy superficiales y por lo tanto se desarrollan en sedimentos no consolidados y/o antrópicos; están expuestos a irrupciones súbitas de agua por roturas de las redes hidráulicas urbanas; como muchas ciudades están al borde del mar o de ríos los niveles freáticos regionales son someros; los acuíferos pueden estar contaminados.

Son circunstancias diferentes y variables: no pueden darse reglas generales sino extremar la precaución en los reconocimientos y tratar de cubrir, en el proyecto, todos los riesgos imaginables. Pero durante la construcción hay que estar especialmente alerta para la pronta detección de los posibles riesgos sobrevenidos.

Hay muchos ejemplos de problemas debidos al agua en túneles urbanos pero sólo vamos a mencionar tres casos peculiares y un poco sorprendivos.

En Barcelona, hace muchos años, se construía el metro por el borde interior del Parque de la Ciudadela. El sistema de construcción era por pantallas (quizá la primera utilización del método en España) y se bombeaba para deprimir el nivel freático provisionalmente durante la construcción. Súbitamente el sistema de achique em-

pezó a bombear gasoil y se produjo un incendio que duró 24 horas y dañó a la infraestructura ya construida (sin víctimas humanas por suerte). Se estaba drenando una bolsa de gasoil en el subsuelo debida a filtraciones de la época, muy anterior, en la que existía en la zona una fábrica de gas.

En Madrid, durante la construcción del ramal de metro al Aeropuerto de Barajas, se detectó, a tiempo, una seria contaminación del subsuelo, debida a infiltraciones de gasolina de aviación. El problema se resolvió instalando, con técnicas mineras, dispositivos anti-deflagración en la tuneladora y en el resto de la maquinaria. Además se realizó simultáneamente un tratamiento para eliminar los residuos del acuífero.

En Valencia la línea de ferrocarril Valencia-Barcelona discurre paralela a la costa y bordeando los poblados marítimos. Su soterramiento se construyó mediante pantallas y se confió a una solera pesada de hormigón la resistencia a la subpresión debida al nivel freático, que estaba algo profundo. Construido, y en servicio, el soterramiento, el Ayuntamiento de Valencia inició una operación de gran calado urbanístico. Se eliminaron o trasladaron numerosas fábricas instaladas entre el casco interior de Valencia y los poblados marítimos y se construyó una nueva gran Avenida: el Bulevar de la Serrería (llamado así en honor de las numerosas carpinterías instaladas antaño en la zona).

Pero las antiguas fábricas extraían su agua mediante pozos autónomos. Cuando las fábricas se cerraron se sellaron los pozos y el nivel freático dejó de estar deprimido por las extracciones de agua y, consecuentemente, se elevó inundando el túnel ferroviario soterrado. La circulación de trenes se dificultó mucho, llegando a establecerse una velocidad máxima de 10 km./hora. La Dirección General de Infraestructura del Ministerio de Obras Públicas (ahora Dirección General de Ferrocarriles del Ministerio de Fomento) intentó resolver el problema creando soleras más pesadas (realmente la subpresión era muy reducida: 2 o 3 metros como máximo) pero el método fracasó. Fue necesaria una larga y costosa campaña de inyecciones para restaurar las condiciones de servicio del túnel. Ello se hubiera evitado con un proyecto más previsor.

Un riesgo adicional, no para el túnel en sí, sino para su entorno es la aparición de asientos de subsidencia en superficie debidos al drenaje de los acuíferos por un túnel. Los asientos pueden aparecer aunque las filtraciones en el túnel sean normales. Se trata de un fenómeno conocido, que se ha alegado en numerosas ocasiones, sin que se haya llegado a una demostración exhaustiva.

Es un riesgo frecuente y conocido cuando sobre el túnel hay edificios cimentados sobre arcillas blandas y se produce aunque el túnel no esté excavado en esas arcillas blandas sino en un terreno inferior más competente.

En el metro de Estocolmo, excavado en granitos bajo arcillas de origen glaciario, se han documentado muchos casos, de forma que ahora se procede siempre a una inyección preventiva para impermeabilizar el terreno en torno al túnel. En Bilbao se produjo un caso demostrado, con daños, por subsidencia debida al drenaje del agua subterránea a través de una falla, por la excavación del túnel del metro, al Laboratorio de Potencia Eléctrica de LABEIN al borde de la ría. En Murcia, donde ya existe subsidencia por el descenso del nivel freático, cualquier túnel urbano correría el riesgo de agravar la situación.

11. Túneles con otros problemas debidos al agua

Tradicionalmente se relaciona al yeso y a las formaciones yesíferas con daños a las conducciones hidráulicas. El caso más citado es el de los túneles y acequias de la red de riegos del valle del Ebro. Los daños, que realmente se producen, no se deben a disolución del yeso porque el agua que transportan las acequias está sobresaturada en sulfato cálcico y ya no puede disolver más yeso. Es otro problema: el arrastre de los finos en los limos yesíferos aluviales a causa del agua que escapa de las conducciones por fisuras y grietas.

En el metro de Madrid se han constatado muchos casos de daños en el revestimiento de hormigón debidos al yeso, en presencia de agua. Ello obliga a frecuentes obras de reparación, en verano, con cierres temporales de las líneas afectadas. Pero prácticamente todos los casos se refieren a hormigones de baja calidad, contruidos antes de 1960.

Hay muchos túneles, contruidos en los últimos años y encajados en terrenos yesíferos en los que no se han observado daños: los túneles de Metrosur en el alfoz de Madrid; el túnel de las Hechiceras en el tramo de alta Velocidad Zaragoza-Lérida; varios túneles en el tramo de Alta Velocidad Barcelona-Zaragoza.

Pero hay un caso paradigmático: el del túnel de Lilla en las cercanías de Montblanc en el tramo de Alta Velocidad Tarragona. Allí se han producido en los años 2002-2003 enormes hinchamientos en la solera (figura 10) que han obligado al ADIF a construir un revestimiento circular interior muy resistente, con hormigón autocompactable de muy alta resistencia y con una armadura muy importante.

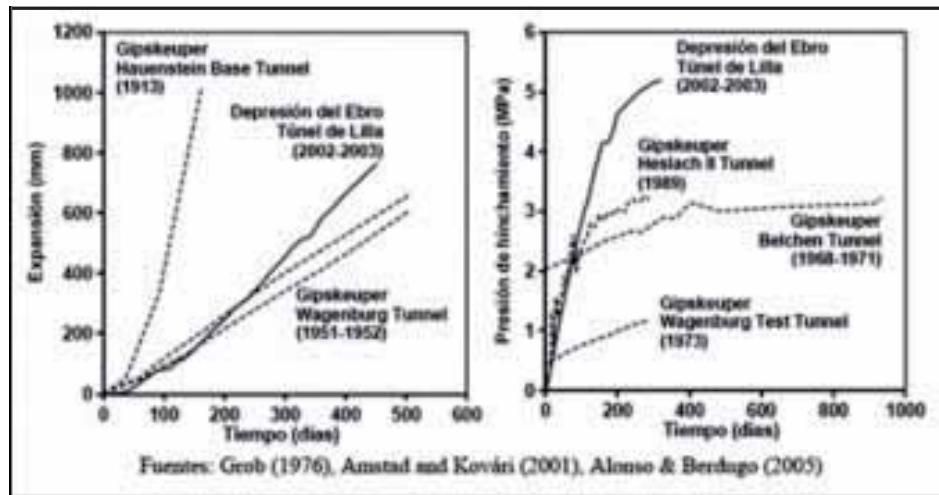


Figura 10.- Hinchamientos y presiones de hinchamiento en varios túneles

El proceso constructivo de la reparación está muy bien detallado en la página web del ADIF, con croquis y fotografías y no es oportuno comentarlo aquí. El estudio geotécnico de las causas del hinchamiento ha sido realizado por equipos del departamento de Ingeniería del Terreno de la Universidad Politécnica de Cataluña, dirigidos por el Profesor Eduardo Alonso. Se han hecho ensayos de laboratorio y cálculos numéricos que han ayudado a comprender el fenómeno cualitativa y cuantitativamente. Hay varias tesis doctorales y publicaciones al respecto y tampoco es oportuno comentarlo aquí.

Pero hay un aspecto menos estudiado, el de la hidrogeología de la ladera que sí encaja en esta ponencia. El perfil geológico esquemático del túnel se reproduce en la figura 11, y está compuesto por una serie de estratos, ondulados y replegados, de arcillas rojas con niveles de yesos (y que también contienen anhidrita) Sobre estas formaciones aparecen estratos alternados de calizas y calizas margosas.

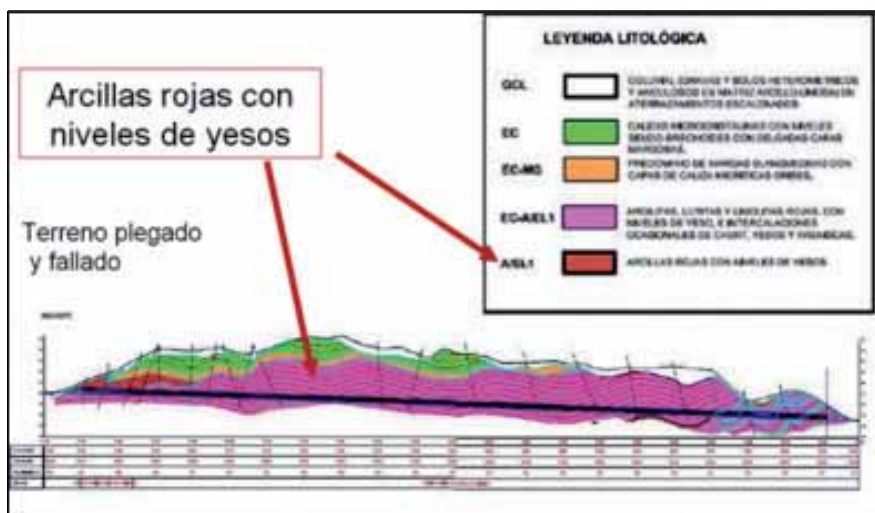


Figura 11.- Perfil geológico esquemático del túnel de Lilla

La figura 12 muestra una fotografía de la ladera, tomada en la boquilla Este del túnel, en la que pueden apreciarse bien los estratos calcáreos sobre el túnel. En la figura 13 se muestra una fotografía de detalle de uno de esos estratos calcáreos cuya morfología superficial corresponde a una zona cárstica.



*Figura 12.- Fotografía de la ladera en la boquilla Este del Túnel de Lilla.
Se aprecian bien las arcillas con yesos a cota de la vía y las calizas superiores.*



Figura 13.- Aspecto superficial de uno de los estratos de caliza situados sobre el Túnel de Lilla. La morfología en superficie es la de una formación cárstica.



Figura 14.- Eflorescencias en una junta de retracción del revestimiento del túnel de Lilla causadas por filtraciones a través de la bóveda

En el túnel sigue entrando agua por la clave y en la juntas de retracción, como se muestra en la figura 14 que corresponde al túnel en servicio. Se observan también eflorescencias. Probablemente el túnel esté estabilizado y tenga suficiente seguridad pero quizá valiera la pena profundizar en la hidrogeología de la ladera, cosa que no se hizo en el proyecto con el debido detalle. La combinación de agua, yeso y anhídrita tuvo efectos caros y peligrosos; el efecto del yeso y de la anhídrita se conoce pero el agua en la ladera fue clave para que se desencadenase el proceso de hinchamiento.

12. Referencias

- Adif (2008). “Instrucciones y recomendaciones para redacción de proyectos de plataforma. IGP 4 Instrucciones y recomendaciones sobre túneles. IGP 4.3 Recomendaciones para el proyecto de la excavación y sostenimientos. IGP 0.1.2.5 Anejo de Geología. IGP 0.1.2.13 Anejo de Túneles” No editado.
- Bayón Caja, Emilio (2005). “El drenaje de los túneles. Implicaciones constructivas y medioambientales”. Ingeo Túneles. Volumen 10. Capítulo. 5.

- Jeremias F.T., Pistone R., Oliveira R., Martins R. y Pereira J, (2008) “Construção de túneis em maciços areníticos. O caso del túnel de Castanheira II.” XI congresso nacional de Geotecnia, Coimbra, Portugal
- Public Roads Administration, Norway (1992). “Cladding in Road Tunnels. Recommended Tender Documents according to manual 163”
- Páginas web: www.adif.es; www.Jaeger.com; www.inocsa.es;