

Túneles en terrenos salinos

Tunnels in saline soils

José M^o Rodríguez Ortiz. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Catedrático de Mecánica del Suelo y Cimentaciones de la Universidad Politécnica de Madrid.
Madrid (España). info@gammageotecnica.e.telefonica.net
Jesús Rodríguez Jurado. Ldo. en Ciencias Geológicas.
Gamma Geotécnica S.L. Madrid (España). info@gammageotecnica.e.telefonica.net

Resumen: Se comentan los problemas típicos de los terrenos salinos con especial atención a los fenómenos de disolución, agresividad, expansividad, corrosión, etc. Se discuten las técnicas de reconocimiento de estos terrenos así como los aspectos hidrogeológicos específicos. Se analizan las ventajas e inconvenientes de diversos sistemas constructivos, tanto de tipo convencional como con empleo de tuneladoras, señalando las bases a tener en cuenta en el diseño. Se detalla la aplicación de estos criterios a algunos casos concretos, junto con los tratamientos preventivos y los aspectos específicos de la auscultación.

Palabras Clave: Túneles; Terrenos salinos; Métodos constructivos

Abstract: Consideration is given to the typical problems of saline soils, with particular reference to aspects of dissolution and leaching, concrete and steel attack, swelling, etc. An overview is given of specific techniques of site investigation and hydro-geological features and reference is made to advisable technical solutions and best construction practice, both in terms of conventional tunnelling as well as in mechanized boring by TBM. A description is given of the application of this design criteria to specific cases together with preventative measures or treatments and specific monitoring aspects.

Keywords: Tunnels; Saline soils; Construction methods

1. Introducción

Dejando aparte los túneles y galerías mineras que se desarrollan en todo tipo de sales, la mayoría de los túneles viarios e hidráulicos relacionados con terrenos salinos suelen encajarse en yesos y anhidritas, los cuales son típicos de formaciones miocenas y triásicas, fundamentalmente. No obstante también aparecen otros tipos de sales menos conocidas.

España tiene una larga tradición de túneles en yesos, generalmente asociados a obras hidráulicas, pero en los últimos años el gran desarrollo de las redes viarias ha conocido la ejecución de grandes túneles en estas formaciones.

Se puede citar el túnel de Fabares en el Keuper de la Cordillera Cantábrica, el túnel de Guardiola de Berguedà en el Keuper del manto inferior de Pedraforca (margen meridional de los Pirineos Orientales), el túnel de Lilla en el Oligoceno de la zona de enlace entre la Cuenca del Ebro y la Cordillera Prelitoral de las Cadenas Costeras Catalanas, los túneles de Mejorada (AVE Madrid-Zaragoza) y del Metro de Madrid en los yesos

miocénicos de la Cuenca de Madrid y el túnel de El Regajal (AVE Madrid-Valencia) en las formaciones evaporíticas del Mioceno inferior de la Cuenca del Tajo. Muy reciente es el túnel de Sorbas, el más largo de Andalucía, con 7,52 km, en los yesos marinos del Mesiniense (Mioceno Superior). En muchos túneles los terrenos salinos solo ocupan un corto trecho, como en Abdalajís (Línea Córdoba-Málaga), el Keuper del túnel de La Cabrera (zona de Buñol, Valencia) o las anhidritas de la boca Norte de los túneles de Isuzkitza (Autopista Vitoria-Eibar) y en el de Albertía (Alava), en la Y vasca, con anhidritas y yesos de las facies Weald del Cretácico inferior.

Los terrenos salinos deben considerarse como problemáticos y cabe esperar problemas del tipo siguiente:

- Disolución-karstificación → Pérdida de soporte periférico
- Corrosión de armaduras y elementos metálicos → Fallo estructural

- Agresividad a hormigones y gunitas
- Expansividad
- Presiones de fluencia a largo plazo

En el caso de las anhidritas la atención se ha centrado en sus características expansivas, mientras que en los yesos ha preocupado más su solubilidad y posible karstificación. Los problemas de corrosión se concentran en las halitas y otros cloruros. El tema de la expansividad se tratará aquí muy someramente ya que merece un tratamiento de considerable extensión.

En bastantes casos la situación no es grave al ir el túnel por encima del nivel freático y encontrar únicamente los problemas derivados de la existencia de un paleokarst más o menos desarrollado. La morfología subterránea suele ser de cavidades o pequeñas cavernas pero también es frecuente encontrar depósitos blandos de suelos yesíferos lixiviados.

En túneles muy superficiales puede existir el riesgo de activación del frente de lixiviación por la infiltración de aguas de lluvia.

En túneles profundos el material salino no suele estar saturado ya que se trata de terrenos de baja permeabilidad que mantienen los eventuales acuíferos por encima de su techo. Únicamente a través de fallas o fracturas importantes, el agua superficial puede alcanzar grandes profundidades. Sin embargo la excavación del túnel produce una descarga importante, con apertura de discontinuidades y aumento de la permeabilidad, lo cual puede dar resultados muy desfavorables si el propio túnel sirve de conducto para la entrada de agua fresca, no salinizada.

Con alguna frecuencia se dan casos de túneles convencionales que atraviesan, en un tramo más o menos largo, una formación salina, no habiéndose previsto en el proyecto una solución específica para dicho tramo. Al ser difícil improvisar una solución impermeable, distinta de las de proyecto, se mantienen estas mismas soluciones con la consecuencia de ejecutar un túnel drenante.

El drenaje favorece la disolución de las sales por la creación de gradientes que aportan agua fresca desde otras áreas, con lo que el sistema de drenaje se colmata y atasca por las sales depositadas y, al mismo tiempo, se van formando cavidades en el entorno del túnel que pueden llevar a distorsiones del mismo o incluso a su colapso, aunque estos fenómenos suelen ser lentos y da tiempo a acometer medidas de refuerzo

como el cerchado de la sección y las inyecciones periféricas para rellenar los posibles huecos.

Desde luego las peores condiciones se dan en los túneles hidráulicos ya que cualquier junta o defecto de hormigonado o las fisuras asociadas a deformaciones diferenciales pueden hacer que pase agua fresca al terreno con lo que se inicia un proceso irreversible de disolución que puede acabar con la ruina del túnel por fallo estructural. Evidentemente este tipo de túneles deben evitarse. Con caudales pequeños puede recurrirse a tuberías metálicas en galerías visitables, mientras que para grandes caudales habría que orientarse hacia secciones cerradas, muy armadas, capaces de puentear vanos apreciables y provistas de juntas con bandas water-stop.

En fase de construcción deben rellenarse con mortero todas las cavidades visibles o detectadas en las proximidades del túnel, empleando para esta detección, taladros, métodos geofísicos, etc.

Respecto a los vanos a puentear debe hacerse una evaluación estadística de las cavidades existentes en el terreno (se supone que determinadas a partir de sondeos) y un estudio geomecánico de las dimensiones de cavidad compatibles con la resistencia del macizo yesífero. En yesos de resistencia media puede contarse con vanos críticos de 3 a 5 m.

Existen otros diversos problemas asociados a estas formaciones como la presencia de tramos extremadamente débiles e incluso colapsables, sobre todo en el Trías, y desprendimiento de grandes lajas, tipo "techo plano" como consecuencia de la disposición destacadamente estratificada en la que alternan tramos de evaporita muy compacta, con niveles arcillosos de menor resistencia y frecuentemente con características expansivas. También se han dado casos de emanaciones sulfurosas e incluso de vapores de hidrocarburos, en determinadas condiciones ambientales.

2. Los terrenos salinos - yesíferos en España

Los materiales evaporíticos aparecen con mayor profusión en las cuencas terciarias del Ebro, Tajo y Duero. En el Mesozoico destaca su representación en el Tríasico, sobre todo en el Keuper, y en algunas facies del Jurásico y del Cretácico. La representación evaporítica es también importante y variada a lo largo de todo el registro geológico mesozoico y terciario en las Cordilleras Béticas.

En la fig. 1 se recoge la representación geográfica del Triásico superior en facies germánicas. En líneas generales, la facies Keuper presenta depósitos muy variados que suelen definirse como arcillas y margas de coloraciones rojizas a grises, a las que también se califica como versicolores, siendo muy frecuente que su denominación se acompañe también del adjetivo yesífero. La componente evaporítica que aparece en los niveles más superficiales de los terrenos de la facies Keuper es fundamentalmente yesífera, generalmente por hidratación de masas de anhidrita, siendo mucho menor la representación de la halita y otras especies cloruradas. En general, en España es prácticamente imposible encontrar afloramientos o masas anhidríticas próximas a la superficie debido a que el Keuper ha actuado como nivel de despegue en la estructuración de las principales cordilleras durante la orogenia alpina, estando completamente tectonizado e incluso exhumado desde emplazamientos originalmente mucho más profundos. El túnel de Fabares constituye uno de los escasos ejemplos, en el contexto ibérico, en los que se ha tenido acceso a masas de anhidritas sanas relativamente superficiales.

En la fig. 2 se muestra la localización de los materiales evaporíticos en la parte central de las grandes cuencas terciarias: Ebro, Tajo y Duero.

También existe representación evaporítica en el Sistema de las Cordilleras Béticas pero se circunscribe fundamentalmente al registro del Tortoniense, como en la cuencas de Granada, Lorca, Fortuna, etc., y del Messiniense, principalmente en la cuenca de Sorbas y del Bajo Segura.

F. Orfí (1) describe cómo en el Terciario continental peninsular de las grandes cuencas se reconocen fundamentalmente dos tipologías de formaciones evaporíticas, una de muy baja salinidad constituida únicamente por sulfato cálcico, y otra de alta salinidad en la que también aparecen sulfato sódico y/o cloruro sódico. Como puede apreciarse en el mapa que se incluye en la fig. 3, al primer tipo se adscriben las Cuencas del Duero, de Teruel, del Cabriel y el sector oriental de la Cuenca del Tajo o Depresión Intermedia. Por el contrario, al segundo pertenecen las Cuencas del Tajo y de Calatayud, en la que se define una única formación evaporítica central con un núcleo de unidad glauberítica, y la Cuenca del Ebro, en la que destaca la existencia de una gran diversidad de formaciones evaporíticas, muchas de las cuales incluyen unidades glauberíticas en sus núcleos.

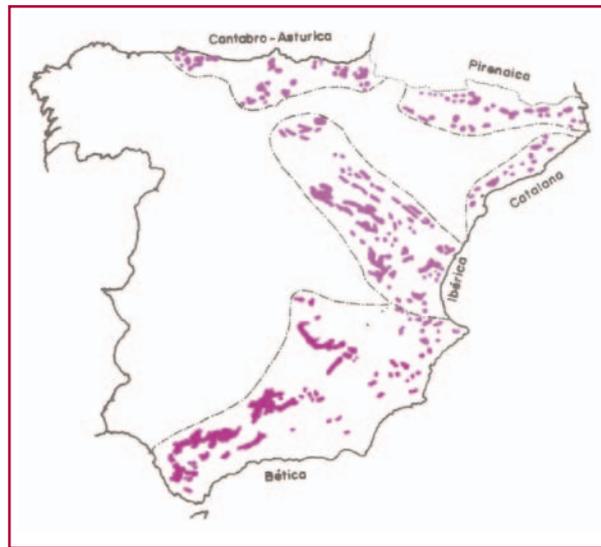


Fig. 1. Localización de los terrenos con litologías atribuibles al Triásico superior en facies germánicas (Keuper) en España.

La importancia de las formaciones evaporíticas en el contexto geológico español trasciende de los aspectos meramente sedimentológicos, estratigráficos o vinculados al campo de la Geología Económica, siendo los procesos de transformación que éstas han experimentado, tales como la disolución intraestratal, responsables del control de la propia sedimentación en algunas cuencas, del encajamiento de la red fluvial reciente, de la estructuración morfológica del relieve e incluso de inducir el desarrollo de ciertos

Fig. 2. Localización de las Cuencas Cenozoicas en el contexto estructural de la Península Ibérica.

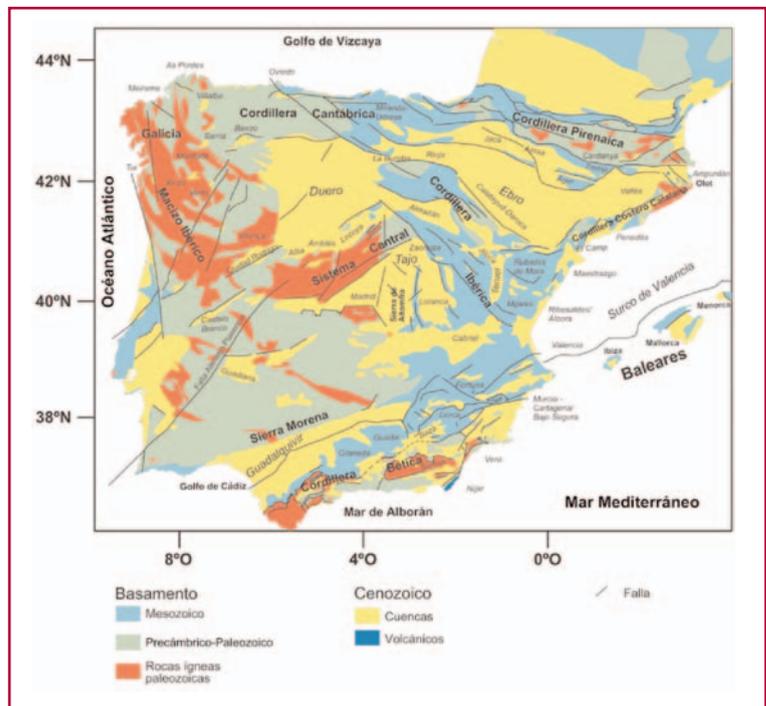
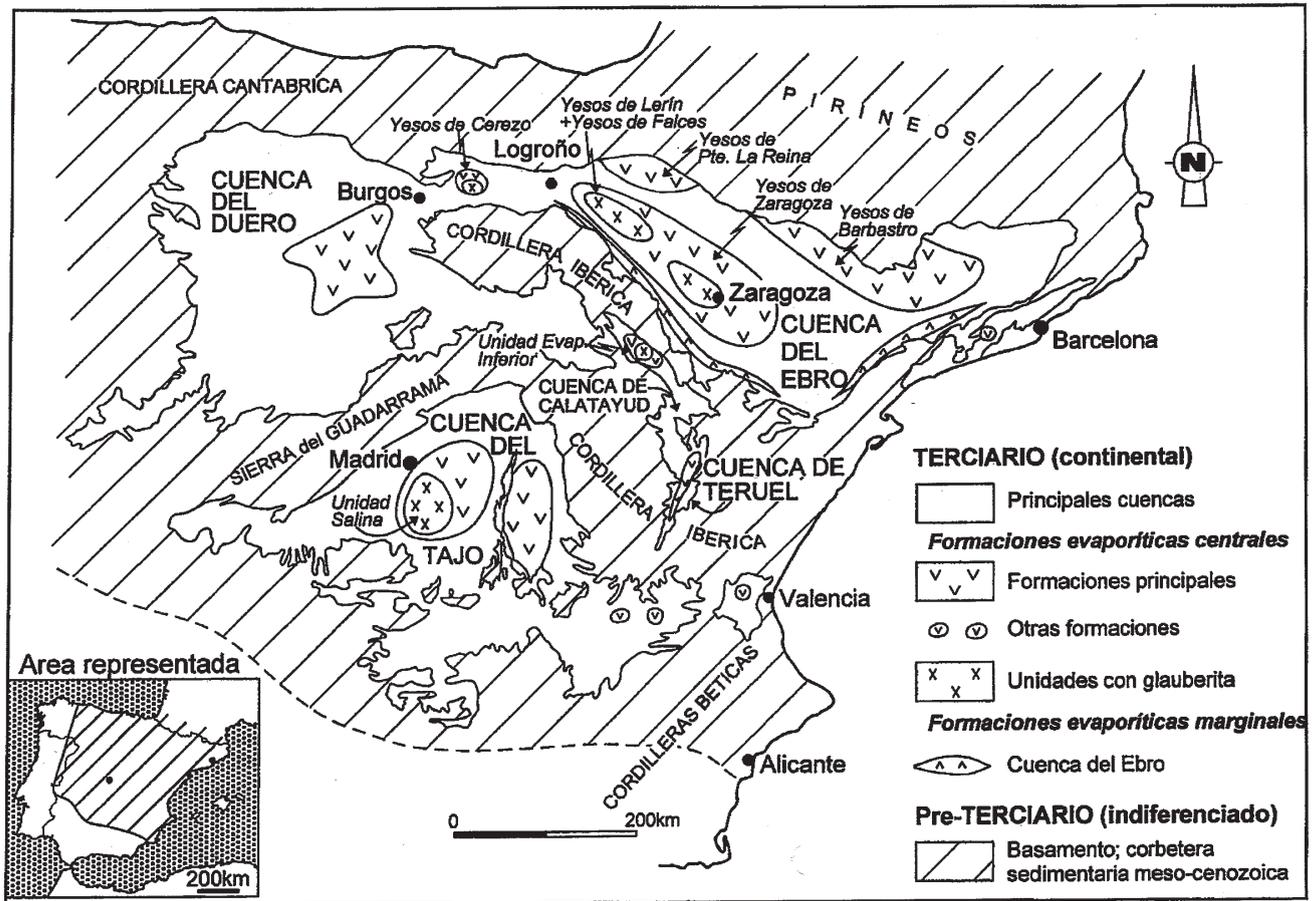


Fig. 3. Situación de las principales formaciones evaporíticas continentales en las grandes cuencas cenozoicas de la Península Ibérica (1).



fenómenos sísmicos de muy baja intensidad. La incidencia en el campo de los riesgos de índole geológica (dolinas, colapsos, subsidencia, etc.) es sobradamente conocida.

3. Las transformaciones de los terrenos salinos

Para interpretar correctamente los materiales que aparecen en la excavación de un túnel conviene conocer los procesos que han podido producirse en su historia geológica reciente.

Aunque son numerosos los procesos de transformación que pueden afectar a las formaciones evaporíticas, tales como la diagénesis, retrodiagénesis, diapirismo, etc., la mayor repercusión práctica suele concentrarse en dos grupos principales: las transformaciones de disolución y las de hidratación.

En general y dependiendo del contexto climático, la presencia de material evaporítico en el substrato aflorante suele ser muy frecuente en los do-

minios climatológicos semiáridos o secos, mientras que en los húmedos las masas de evaporitas suelen aparecer completamente lixiviadas o en profundo proceso de transformación hasta una profundidad importante; más adelante presentamos datos al respecto.

En todos los casos, siempre existe una banda superior que corresponde a terreno de génesis secundaria en el que, por lixiviación, pueden llegar a estar prácticamente ausente el material evaporítico, como sucede en los dominios climáticos húmedos, o bien completamente transformado a otra especie mineral de naturaleza hidratada, empastado en masas de arcilla, arcilla-limo, etc.

Por debajo de esta banda y siempre asociada a un manto freático que no tiene por qué seguir existiendo en la actualidad, aparece la banda de transformación del material evaporítico original, en la que éste puede estar sufriendo una hidratación, caso de la yesificación de la anhidrita, o bien una disolución a expensas de la cual se originan huecos, co-

mo ocurre en el caso de la halita o el yeso, o bien huecos y especies minerales de neoformación, como sucede en el caso de la glauberita. Esta banda suele definirse en toda la extensión en la que existe o ha existido manto freático, situándose su substrato impermeable precisamente hacia el techo del substrato evaporítico original. En este esquema, la aparición de la masa de roca salina original define el límite del avance del frente de disolución/hidratación desde la superficie. En el caso de que el sistema sea "abierto", con aportación de aguas subterráneas frescas, el proceso es susceptible de seguir evolucionando y avanzando en profundidad. Por el contrario, en los sistemas "cerrados" en los que la renovación de las aportaciones de agua subterránea puede considerarse nula, como es muy frecuente en muchos emplazamientos en dominios climáticos áridos o semiáridos, el proceso de disolución evoluciona hasta que se alcanza una situación crítica o de bloqueo en la que la sobresaturación del agua subterránea en el propio mineral evaporítico impide que ésta siga disolviendo o hidratando. En este caso la propia roca salina se constituye en substrato impermeable estable, impidiendo que el proceso avance en profundidad.

Esta conclusión es importante ya que supone que, de no facilitar entradas de agua fresca accidentales, no debe temerse la progresión en profundidad de la disolución cuando los aportes de lluvia son escasos, no hay cursos de agua en superficie o existe una montera considerable.

3.1. Transformaciones de disolución

Al abordar el estudio de las transformaciones de disolución, se distingue entre procesos congruentes e incongruentes. En la disolución congruente una masa de sal natural se disuelve en una solución con composición iónica similar a la del material original, originando una cavidad o hueco en la serie litológica en la que se encontraba encajada la formación salina original, quedando los iones incorporados a la solución en la que se transforma el agua inicial. En la disolución incongruente la formación evaporítica original experimenta progresivamente una transformación hacia una nueva sustancia o especie mineral generalmente amorfa, aunque suele heredar ciertos rasgos morfológicos y texturales de la especie original, cuya solubilidad es mucho menor que la

Tabla 1. Solubilidad de los minerales salinos más frecuentemente representados en el ámbito ibérico.

Mineral	Fórmula	Solubilidad a 25°C Gr/litro
Halita	ClNa	356,5
Glauberita	(SO ₄) ₂ Na ₂ Ca	118,7
Yeso	SO ₄ Ca·2H ₂ O	2,6
Anhidrita	SO ₄ Ca	3,1

que tenía la especie original; lógicamente parte de los iones se incorporan a la solución.

Desde que el agua alcanza la superficie freática más próxima hasta que sale al exterior en un río, manantial o captación, pueden transcurrir unos días o miles de años, y el recorrido puede ser de orden métrico o kilométrico. La evolución química del agua dependerá de los minerales con los que entre en contacto y de la duración de dicho contacto, que a su vez depende de la velocidad del flujo subterráneo.

La salinidad aumenta progresivamente con el tiempo de permanencia del agua en el terreno. El agua disuelve o altera los minerales que encuentra (si tiene tiempo suficiente para ello) hasta que se alcanza el tope marcado por la constante de equilibrio correspondiente. En estas circunstancias, ya no disolverá más ese mineral, continuará disolviendo otros minerales con una constante más elevada hasta que de nuevo se alcance el equilibrio, y así sucesivamente.

Los problemas de disolución varían notablemente de unas sales a otras, en función de su solubilidad (Tabla 1). Los valores indicados corresponden a agua pura. Lógicamente el agua va perdiendo capacidad disolvente al irse cargando de sales e ir pasando de unas formaciones a otras.

La solubilidad de los carbonatos es mucho más baja que la de los sulfatos, que, a su vez, son menos solubles que los cloruros. Por tanto, primero se alcanza el tope para los bicarbonatos, después (raramente) para los sulfatos, y finalmente (casi nunca: la solubilidad es muy elevada) para los cloruros. A pesar de que con respecto a los cloruros es difícil intuitivamente asumir que se pueda alcanzar una situación de saturación y equilibrio químico, se ha comprobado que éste ocurre y además de manera rápida si el

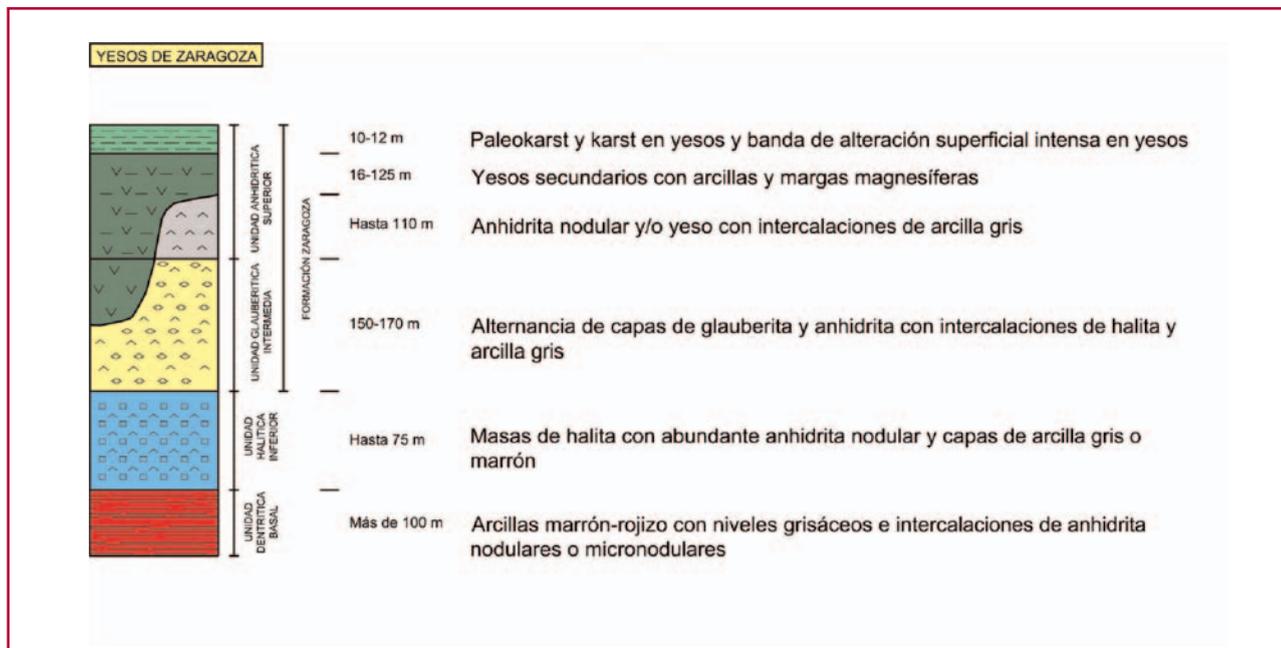


Fig. 4. Síntesis estratigráfica de la Formación Yesos de Zaragoza.

sistema es cerrado, es decir desconectado de aportes superficiales.

A título informativo se muestran en las figs. 4 a 6, diversos ejemplos de series estratigráficas de formaciones salinas que pueden encontrarse en distintas zonas españolas.

En la fig. 4 se incluye una síntesis estratigráfica de la Formación Yesos de Zaragoza, elaborada a partir de las publicaciones de J.M. Salvany. Es interesante la parte superior, en la que se desarrolla la mayor parte de las obras públicas, formada por una alternancia de capas de glauberita y anhidrita con intercalaciones de halita y arcilla gris en la parte más profunda y por anhidritas en la más superficial.

En la columna se han marcado, en color verde oscuro, los yesos secundarios, de distribución y profundidad muy irregulares. En unos casos proceden de la disolución incongruente de la glauberita y la halita (con formación de huecos) y, en otros, de la hidratación de la anhidrita.

En algunas zonas se ha observado el desarrollo de fenómenos kársticos y bandas de alteración superficial intensa sobre las masas de yeso, pero en ningún caso se aprecia la existencia de las bandas de lixiviado de yesos características de los dominios climáticos húmedos. Ello explica la posición relativamente superficial de las anhidritas.

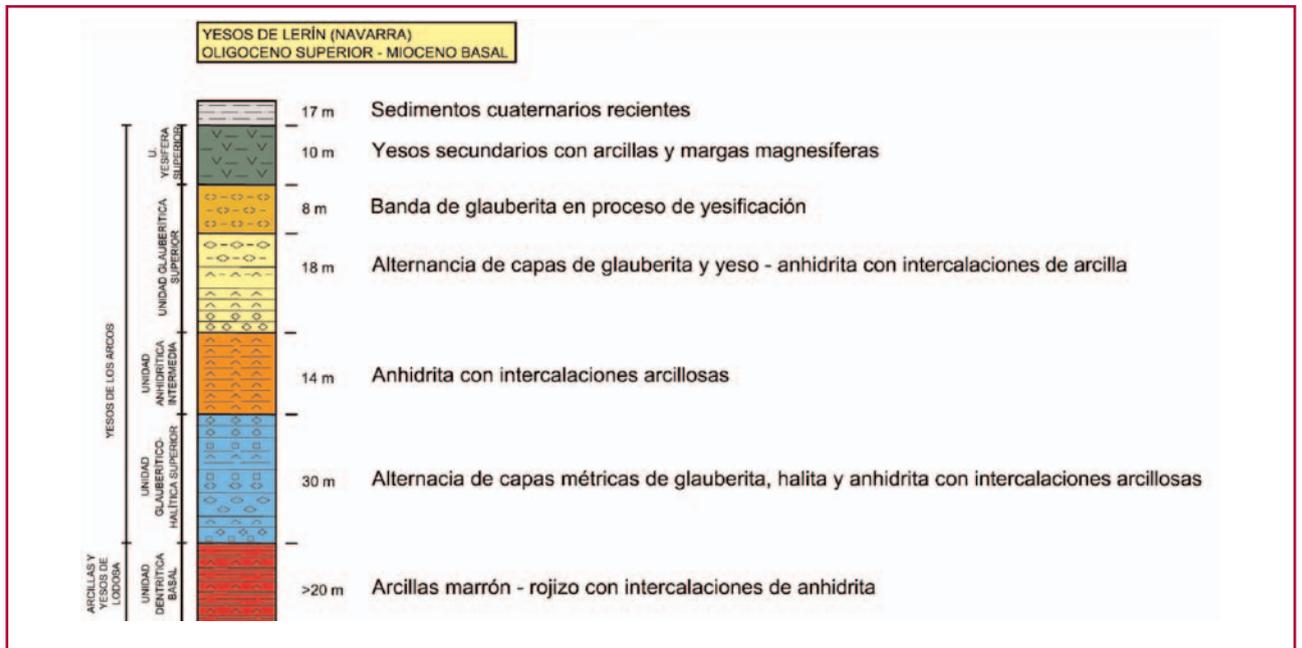
En la fig. 5 se incluye la síntesis estratigráfica de los Yesos de Lerín (Navarra), cuyo emplazamiento se

sitúa también en la Cuenca del Ebro. En este caso la serie presenta un tramo de halita algo menos potente que el que aparece en los Yesos de Zaragoza, presentando una importante presencia de glauberita y anhidrita; directamente suprayacente se dispone un paquete de masas de anhidrita con intercalaciones arcillosas que dan paso a una alternancia de capas de glauberita y anhidrita con intercalaciones de arcilla. Sobre la unidad glauberítica se establece una banda de glauberita en proceso de yesificación con una potencia de unos 8 m y por encima la banda de yesos secundarios con arcillas y margas magnesíferas. En esta banda superficial se aprecian numerosos recrecimientos de yeso fibroso como consecuencia de la concatenación de ciclos de infiltración de agua dulce, disolución parcial y recrecimiento yesífero por evaporación del agua infiltrada.

En el caso de la Cuenca de Madrid la secuencia habitual es la denominada Unidad Salina del Mioceno Inferior.

En la fig. 6 se representa la síntesis estratigráfica del sondeo del Valle de las Cuevas, próximo al Cerro de Batallones (entre Pinto y Torrejón de Velasco); el término basal corresponde a una alternancia de arcillas rojas y verdes, dando paso a un paquete de unos 130 m de potencia constituido por capas de halita con anhidrita y glauberita entre las que existen niveles de margas magnesíficas. Por encima aparecen unos 10 m de glauberita masiva, que dan

Fig. 5. Síntesis estratigráfica de la Formación Yesos de Lerín (Navarra).



paso a un paquete de unos 20 m constituido por masas de glauberita y anhidrita. Finalmente aparece una primera banda de unos 30 m de potencia en la que se está produciendo la yesificación de la glauberita por disolución incongruente y de la anhidrita por hidratación; la secuencia concluye con la montera de yesos secundarios en los que ya tan sólo pueden apreciarse esporádicos vestigios de la glauberita y anhidrita originales; su potencia alcanza los 60 m.

En la misma figura se ha incluido una columna similar, correspondiente al Sur del casco urbano de Madrid, en la cual las potencias de evaporitas son menores por tratarse del borde de la cuenca. En Madrid la mayor parte de los túneles urbanos se han desarrollado bajo rellenos o depósitos cuaternarios,

En la misma figura se ha incluido una columna similar, correspondiente al Sur del casco urbano de Madrid, en la cual las potencias de evaporitas son menores por tratarse del borde de la cuenca. En Madrid la mayor parte de los túneles urbanos se han desarrollado bajo rellenos o depósitos cuaternarios,

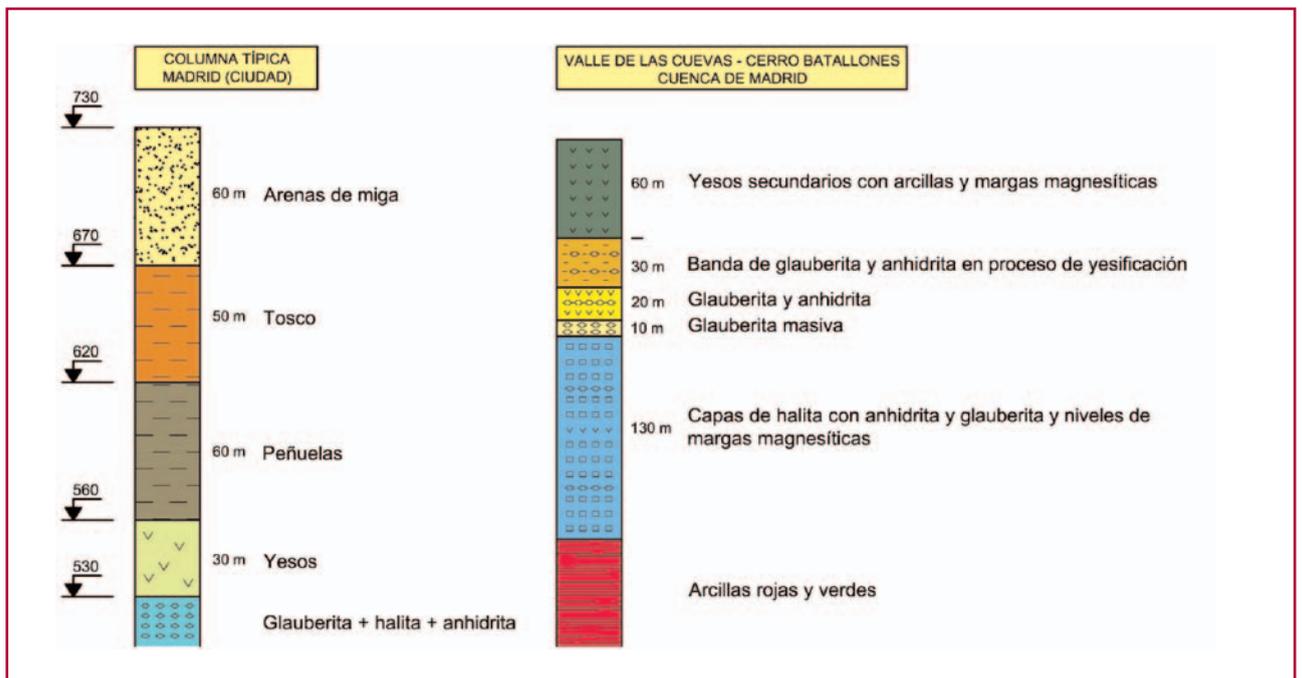


Fig. 6. Columnas típicas del Mioceno de Madrid

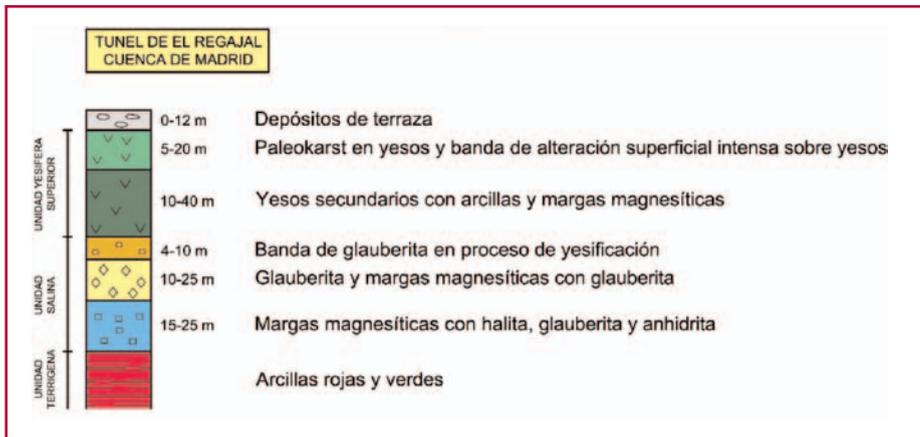


Fig. 7. Síntesis estratigráfica de los terrenos atravesados por el túnel de El Regajal (Madrid-Toledo).



Fig. 8. Glauberita masiva macrocristalina.

penetrando en los niveles arcillosos de toscos y peñuelas. En la base de las peñuelas existen niveles yesíferos, eventualmente con halita y glauberita, cada vez más potentes; al sur de la confluencia entre el arroyo de Abroñigal y el río Manzanares los tramos masivos de glauberita con halita aparecen por debajo de la cota 530 y esta secuencia también se ha reconocido inmediatamente al Sur de Villaverde.

Una secuencia similar se recoge en la fig.7, correspondiente al túnel de El Regajal (Aranjuez-Ontígola), parte de cuya construcción se ha excavado en glauberita (fig. 8) y halita (figs. 9 y 10). En este caso la yesificación de la glauberita (fig. 11) ha dejado muy reducida la potencia de esta sal. En la base de la banda yesificada existe un nivel acuífero cuyas aguas se encuentran extremadamente mineralizadas e incluso sobresaturadas en la propia glauberita. En la montera de yesos secundarios se ha observado una paleokarstificación, lo que indicaría que

se habría desarrollado un segundo frente de disolución en superficie que habría sido responsable de la alteración y lavado de parte de los yesos secundarios. Las condiciones de fuerte aridez de la zona son responsables de que los recrecimientos posteriores de numerosas masas de yeso fibroso enmascaren los resultados iniciales de dicho proceso.

Como puede apreciarse en el perfil geológico de este túnel que se incluye en la fig.12 existe un tramo inicial en el que la halita no aparece y ello es debido a que fue objeto de disolución intraestratal, preservándose el tramo de glauberita suprayacente. En otro tramo se observa cómo se rompe la continuidad de la serie y no aparecen ni la glauberita ni tampoco la halita; ello es consecuencia de la afectación de una falla de desgarre que propició no sólo la completa disolución congruente de la halita, sino también la incongruente de toda la masa de glauberita suprayacente que aparece transformada a masas de arcillas con yesos secundarios.



De izda. a dcha. Fig. 9. Cristales "chevron" de halita en muestra de testigo de sondeo. Fig. 10. Testigo de sondeo en el que aparece halita cementando agregados arrosetados de cristales anhédricos romboédricos de glauberita (parte derecha) y en forma masiva con cristales cúbicos y "chevron" (parte izquierda) y Fig. 11. Yesos secundarios con margas y arcillas. Se observa cómo sigue preservándose gran parte de la estructura original e incluso se aprecian pseudomorfos de glauberita yesificada.

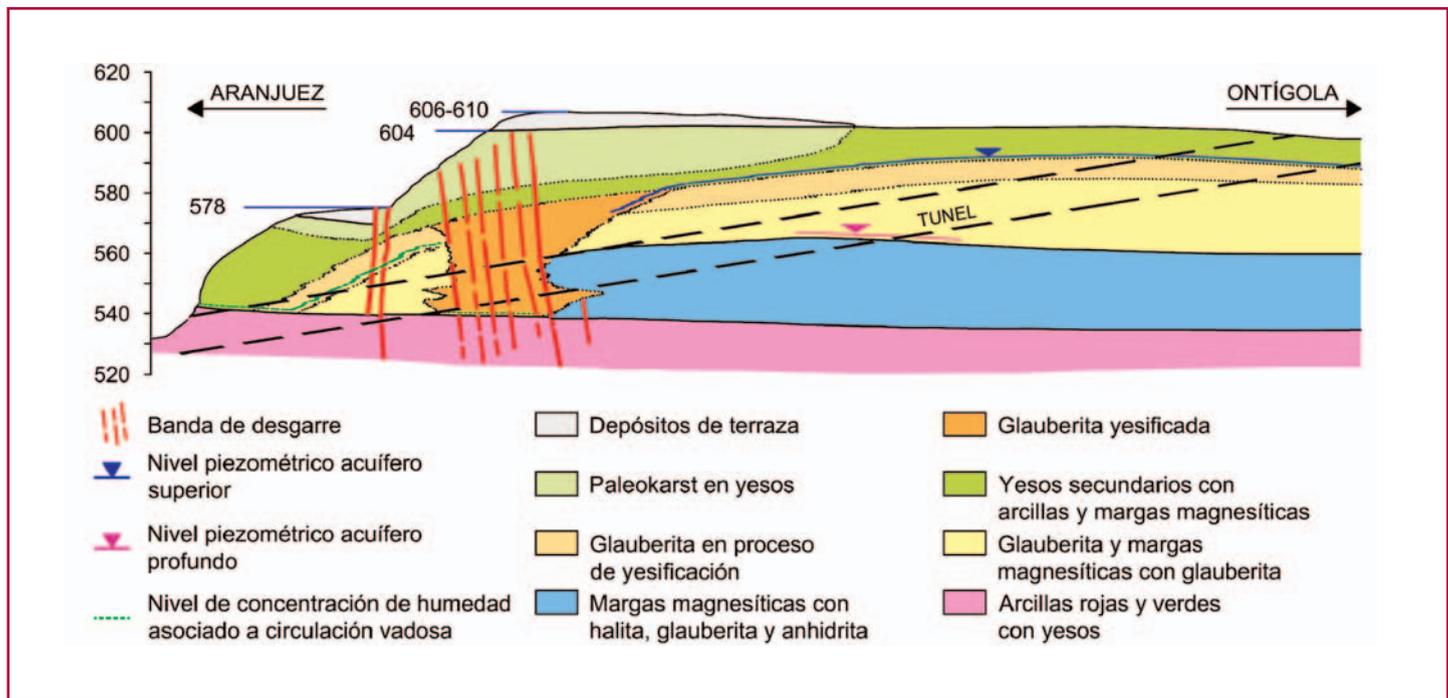
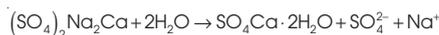


Fig. 12. Perfil geológico simplificado del túnel de El Regajal

La disolución de halita por la presencia de agua constituye el ejemplo por excelencia del proceso congruente, cuyo resultado es simplemente una disociación iónica que se traduce en un enriquecimiento en la misma de las fracciones de catión sodio e ión cloruro. Lo mismo ocurre con la anhidrita y con el yeso, salvo que la disolución se ve enriquecida en catión calcio y anión sulfato. La diferencia fundamental entre estas tres reacciones viene condicionada por la solubilidad de cada una de las especies minerales, dado que las especies sulfatadas son dos órdenes de magnitud menos solubles que la halita.

Por su parte, la transformación de la glauberita en yeso es un prototipo de reacción de disolución incongruente, cuyo resultado es la neoformación de yeso amorfo y el enriquecimiento del agua subterránea en anión sulfato y catión sodio según la reacción siguiente:



Glauberita + agua meteórica → Yeso + Solución sulfatado-sódica

Esta transformación conlleva una disminución de volumen del 27% y favorece la generación de huecos moderados en el subsuelo, generalmente a partir de diaclasas y fisuras preexistentes.

3.2. Transformaciones de hidratación: el ciclo de yeso primario-anhidrita-yeso secundario

La anhidrita (SO_4Ca , sistema rómbico) es probablemente la especie mineral sulfatada más abundante en profundidad; puede aparecer de forma masiva interstratificada con materiales arcillosos o bien en forma de nódulos y agregados cristalinos en el seno de capas de arcillas, yesos, halita, rocas potásicas, etc. También puede rellenar fisuras en rocas competentes. La anhidrita se origina fundamentalmente por la deshidratación del yeso primario ($\text{SO}_4\text{Ca} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) por diagénesis, a profundidades entre los 400 y los 600 m. Su aparición es muy esporádica en superficie y suele estar ligada a dominios climatológicos áridos y semiáridos, donde no progresa la lenta hidratación por infiltración de las precipitaciones.

En la fig. 13 se representa el perfil geológico del túnel de Freudenstein (Alemania) en el que puede apreciarse cómo aparece la anhidrita sana a bastante profundidad, definiéndose una banda intermedia de transformación de anhidrita a yeso, cuyo espesor es de unos 10 a 20 m, y otra superior en la que el yeso se encuentra lixiviado; lógicamente la posición de estas bandas corre pareja al perfil topográfico del terreno, produciéndose un mayor avance en la vertical de los frentes de lixiviado y yesificación en las zonas donde se encaja la red fluvial.

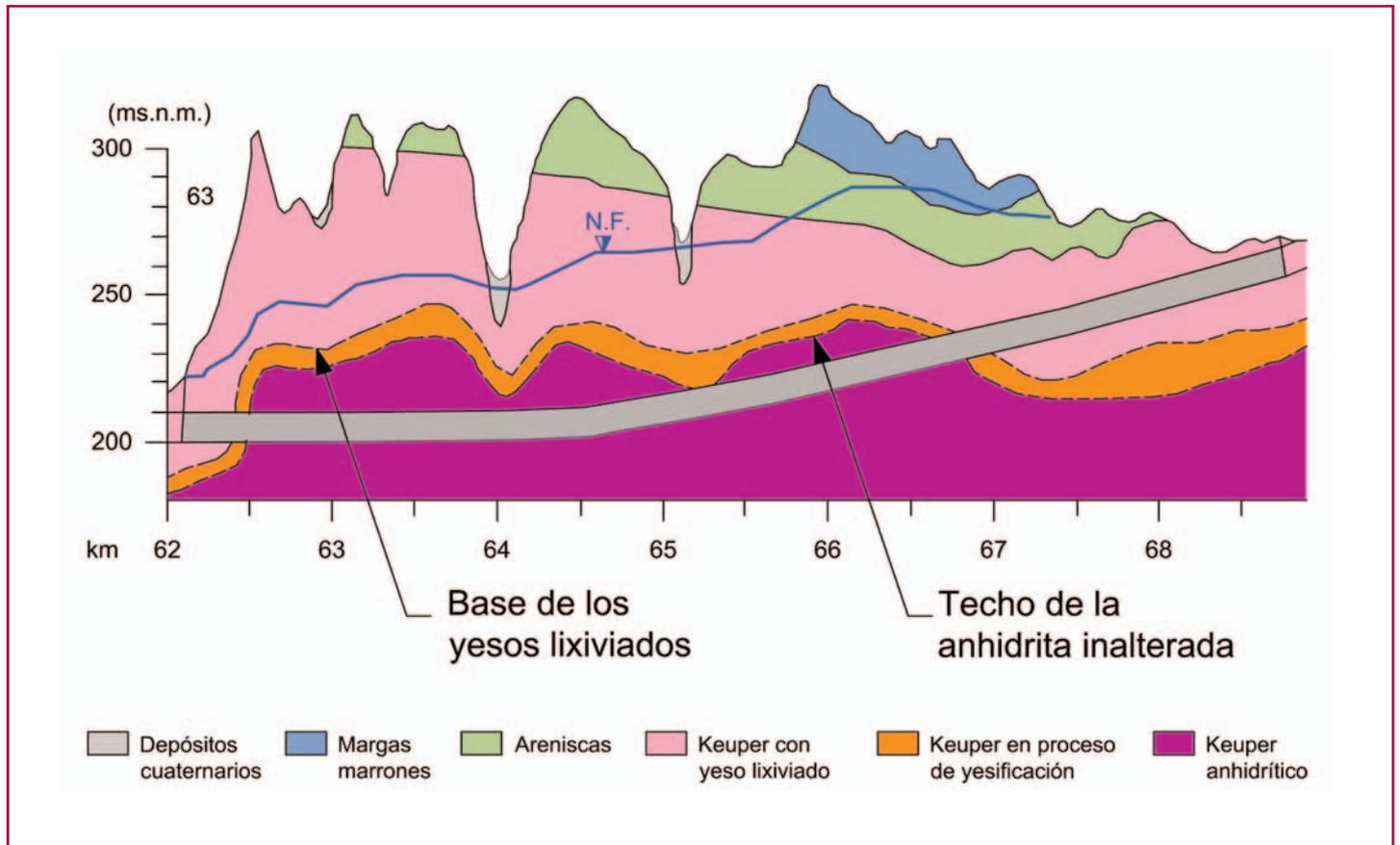


Fig. 13. Perfil geológico longitudinal del túnel de Freudenstein (2).

En la fig. 14 se representa el perfil geológico del túnel de Fabares (Autovía del Cantábrico), en el que se distinguen un tramo inicial excavado en el tramo superior del Keuper, con el yeso lixiviado y un segundo tramo en el que la anhidrita se encuentra transformada a yeso secundario. En el tercer tramo aparece una masa heterogénea algo extruida por despegue como consecuencia del plegamiento, que se encuentra constituida por argillitas rojas y negras con capas y nódulos de anhidrita y yeso. Probablemente una parte importante de las masas de yeso que aparecen se habrían originado por el acceso de las infiltraciones como consecuencia de la tectonización. En el último tramo en Keuper, el túnel discurre encajado en anhidrita y yesos laminados escasamente tectonizados.

En la fig. 15 se representa la serie estratigráfica original del Triásico en el túnel de Fabares y el perfil de hidratación sobre el Keuper. En este último se define la banda superior con yeso lavado cuya potencia alcanza los 80 m, mientras que el espesor del tramo de transformación de anhidrita a yeso secunda-

rio varía entre los 12 y los 50 m dependiendo de la potencia de la cobertera.

La experiencia adquirida en la construcción del túnel de Fabares evidencia que el mecanismo de expansión en la anhidrita sana (tramo de anhidrita y yesos laminados en el perfil de la fig. 14) es extraordinariamente lento e incluso puede que no llegue a producirse a lo largo de la vida útil del túnel, constatándose que su comportamiento es prácticamente impermeable. Sin embargo, en las zonas tectonizadas donde el terreno aparece desestructurado es mucho más fácil que se produzca la entrada y circulación de aguas subterráneas. Un efecto similar puede producirse por efecto de las voladuras. También varía el comportamiento cuando la anhidrita está mezclada con arcilla expansiva, como comentamos más adelante.

El tema de la profundidad a la que puede encontrarse anhidrita ha sido objeto de cierto debate, sobre todo en combinación con el criterio de huir de dicha formación en el proyecto de túneles.

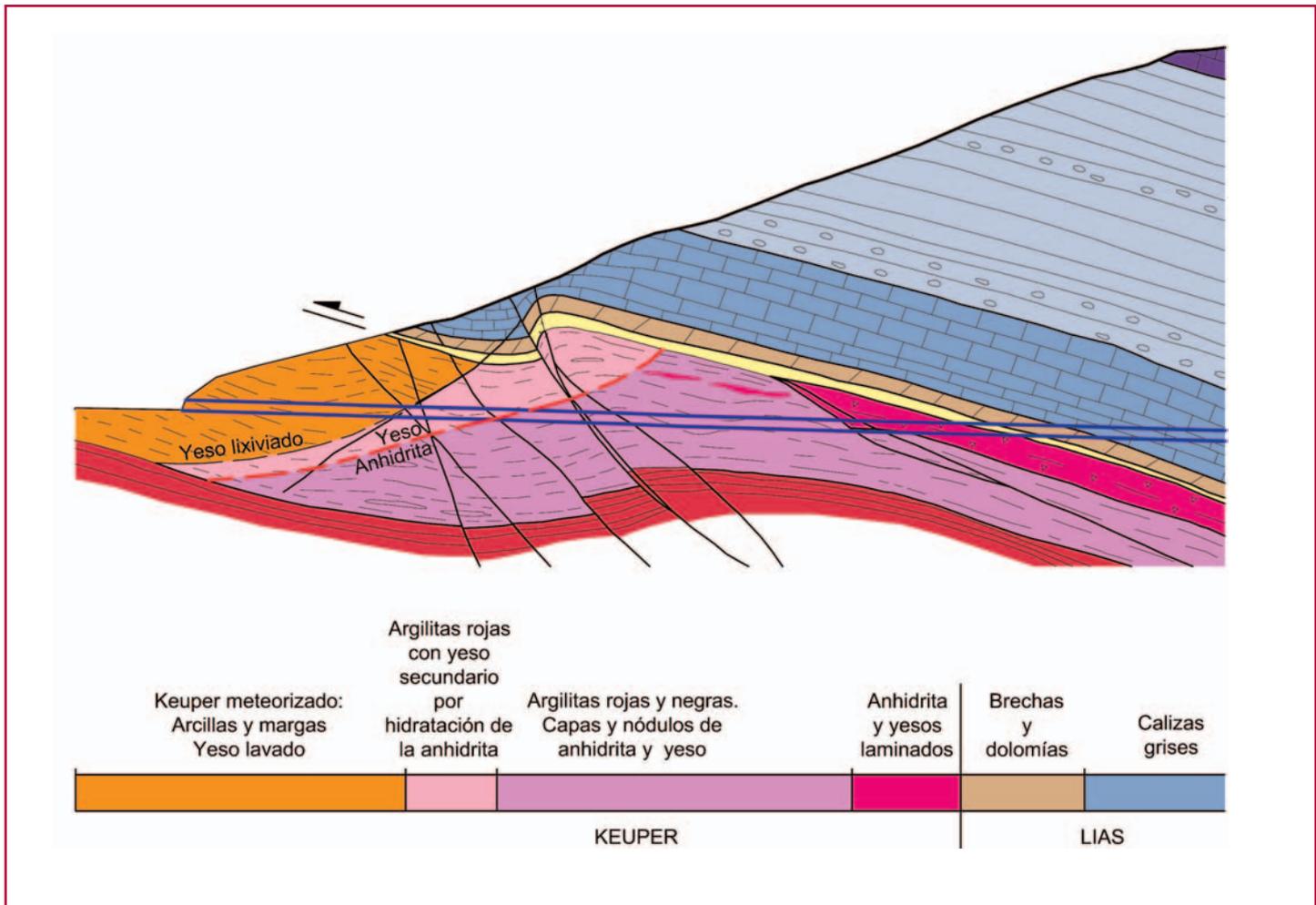


Fig. 14. Perfil geológico del tramo en Trías del túnel de Fabares (Asturias).

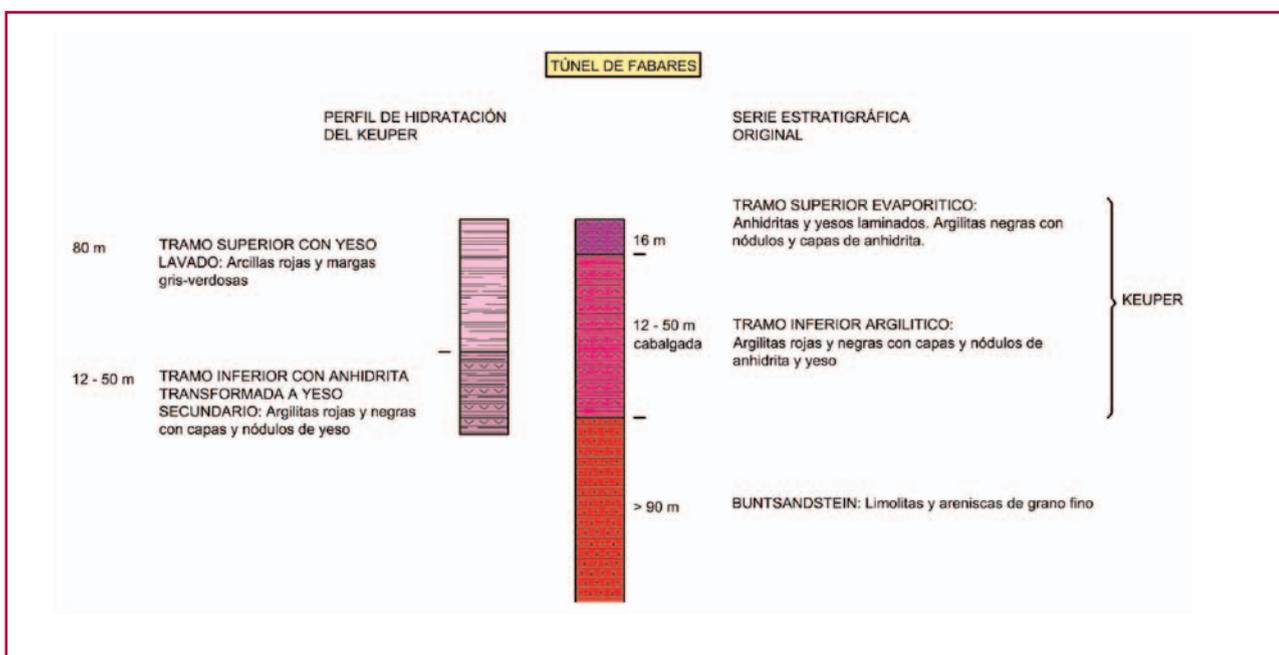


Fig. 15. Túnel de Fabares (Asturias): serie estratigráfica original y perfil de hidratación del Keuper.

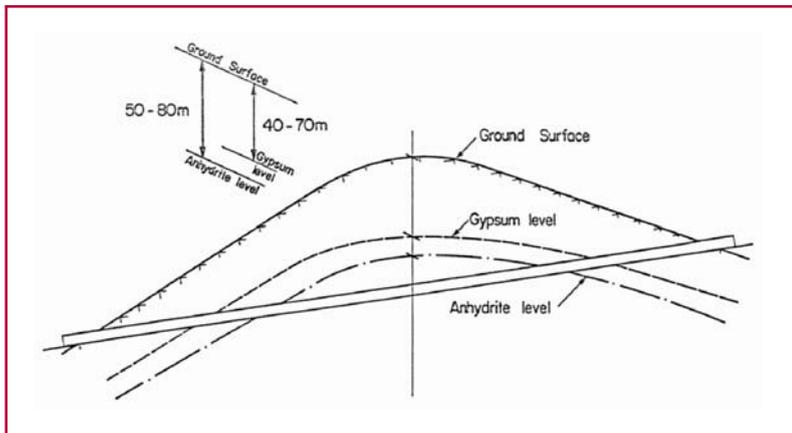


Fig. 16. Localización de la anhidrita en profundidad, según Steiner (3).

Después del trabajo pionero de Steiner (3) que explicaba la imposibilidad de encontrar anhidritas a profundidades inferiores a unos 50 m (fig. 16) se han realizado numerosos túneles en los que se ha podido precisar la profundidad del techo de la anhidrita.

Steiner plantea una hipótesis mecánica según la cual las tensiones geostáticas de confinamiento impedirían la transformación de la anhidrita en yeso a partir de una cierta profundidad. Toma como referencia la tensión normal octahédrica ($\sigma_v = 1/3 (\sigma'_v + 2 K_0 \sigma'_h)$) y deduce el valor de K_0 compatible con la resistencia pasiva del terreno frente a tensiones efectivas horizontales (Rankine) en la profundidad considerada. En tales condiciones y para una profundidad de unos 50 m, obtiene una tensión media en la anhidrita de 2-2,8 MPa que parece correspon-

der con las presiones de hinchamiento medidas en laboratorio en condiciones triaxiales.

Aunque tienen mucha influencia las acciones tectónicas y la accesibilidad de agua pura, la experiencia de diversos túneles parece apoyar las consideraciones de Steiner, a pesar de la excesiva simplificación del modelo planteado.

Amstad y Kovari (4) han propuesto un modelo esquemático de distribución de bandas de lixiviado y yesificación para los túneles centroeuropeos, asignando una potencia de unos 35-80 m para la primera y un espesor de 5-15 m para la segunda. Junto al espesor de la cobertera de material salino sobre la anhidrita, en la tabla 2 se recogen las potencias de las citadas bandas en distintos túneles centroeuropeos y en el de Fabares.

Por supuesto la excavación de un túnel altera notablemente el estado tensional del macizo, por liberación de las tensiones horizontales y la descarga producida en la base del mismo. Ello permite que progrese la hidratación de la anhidrita (si hay aporte o migración de agua a la misma) y el desarrollo de las correspondientes presiones de hinchamiento.

Algunos autores (1) plantean la transformación de anhidrita en yeso como un proceso isovolumétrico en el que la anhidrita se disuelve de manera progresiva y parcial a medida que precipita el yeso secundario, y que los excedentes de sulfato cálcico son transportados en solución acuosa o pueden precipitar en forma de cristales de yeso en las discontinuidades de la roca encajante (1).

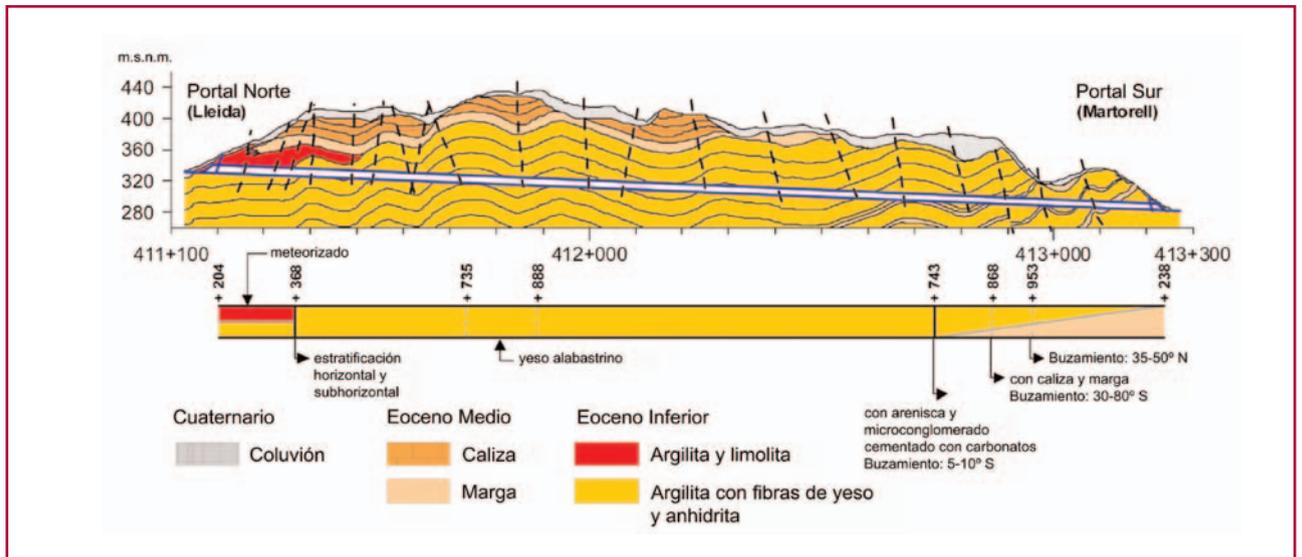
No obstante se acepta que en los sistemas "abiertos", como las obras civiles, el incremento volumétrico teórico resultante de la transformación de la totalidad de la anhidrita en yeso sería del orden del 60 al 63%, siempre y cuando se suponga que aquella carece de confinamiento, tenga porosidad nula y exista libre aporte de agua pura. Por el contrario, en sistemas "cerrados" saturados, pueden formarse cristales de yeso con ligeras reducciones de volumen en el conjunto.

En general, el proceso de hidratación de la anhidrita se describe como lento y progresivo pero el proceso puede acelerarse cuando la anhidrita aparece interstratificada o dispersa en arcillas preconsolidadas expansivas, con lisos o fisuras. En estas condiciones es más fácil que se desarrolle la expansividad de las arcillas con mayores presiones y cambios volumétricos que la de las anhidritas.

Tabla 2. Profundidad de la anhidrita y espesores de las bandas de transición al yeso lixiviado, en diversos túneles.

Túnel	Espesor máximo de cobertera sobre la anhidrita	Espesor máximo de roca yesífera sobre la anhidrita	Espesor de la banda de yesificación de la anhidrita
Fabares	75 m	75 m	25 m
Feuerbach	88 m	75 m	35 m
Filder	90 m	25 m	8 m
Freudenstein	90 m	75 m	10 m
S-Bah Stuttgart	74 m	55 m	8 m
Schanz	60 m	40 m	4 - 5 m
Wagenburg	40 m	30 m	5 m

Fig. 17. Perfil geológico longitudinal del Túnel de Lilla (5).



El proceso puede explicarse de la forma siguiente:

1. Hinchamiento de las arcillas por descarga y absorción de agua.
2. Este efecto se combinaría con la hidratación isovolumétrica de la anhidrita hasta la saturación en sulfato cálcico de la fracción acuosa.
3. La expansión del terreno se desarrollaría a favor de planos de debilidad y progresaría por la precipitación del yeso en forma de venas y fisuras, constituyendo grandes enrejados o bien transformando concéntricamente las masas de anhidrita original en forma de nodulizaciones alabastrinas. En ello influiría la evaporación de la fase acuosa y la temperatura.

Puede citarse el caso del Túnel de Lilla (Montblanc, Tarragona) perteneciente a la línea de ferroca-

rril de alta velocidad Madrid-Barcelona. El túnel está construido en materiales terciarios del Eoceno inferior-Oligoceno (fig. 17), pertenecientes a la depresión del Ebro, tiene una longitud de 3 kilómetros y la montera varía entre 32 y 120 m.

El terreno comprende capas de argilita fisurada con abundantes venas y fibras de yeso y anhidrita. Aunque suele proponerse como un ejemplo de túnel afectado por la expansividad de la anhidrita, la problemática acaecida es atribuible fundamentalmente al aumento de volumen de las arcillas, habiéndose desarrollado grandes levantamientos en solera y presiones de hinchamiento del orden de 6 MPa, muy superiores a las esperables en anhidritas.

Aparte de la descarga producida por la excavación ha contribuido a la expansión de las argilitas la infiltración localizada de las aguas freáticas drenadas por el túnel, bastante sulfatadas. La entrada de agua propició igualmente la hidratación de las vetas de anhidrita fibrosa y el crecimiento de cristales de yeso de neoformación, con el correspondiente aumento de volumen.

3.3. Transformaciones de recristalización e hidratación

Aparte de la conocida transformación de la anhidrita en yeso, existen otros diversos procesos con formación de cristales e importantes cambios volumétricos. Tal es el caso de la glauberita, con un importante papel en la génesis de las sales sulfáticas (fig. 18).

En la cristalización de una solución sulfatada sódica (como la producida por lixiviado de la glaube-

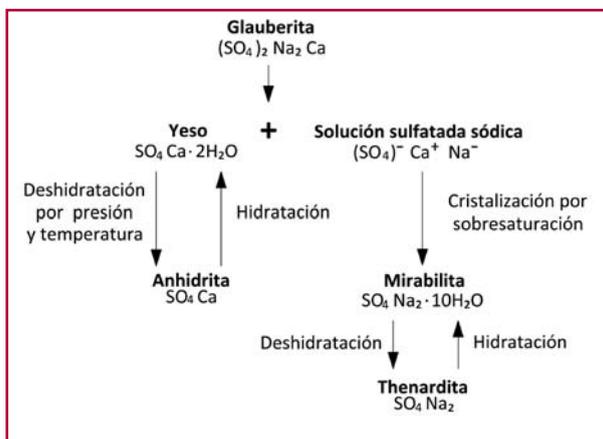
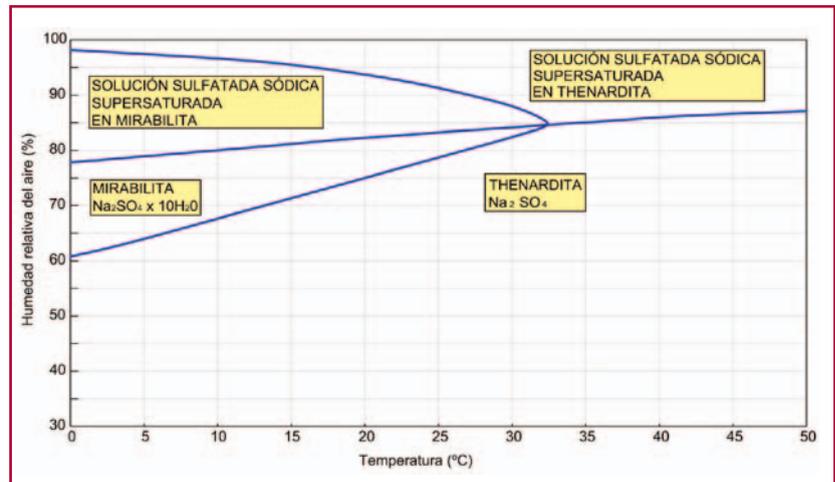


Fig. 18. Las transformaciones de la glauberita.



Fig. 19. Surgencia de agua cristalizada en mirabilita. A la derecha, Fig. 20. Diagrama de fases del sulfato sódico.



rita) concentrada suele originarse una especie mineral muy inestable, la mirabilita (ver fig. 19), con 10 moléculas de agua (SO₄Na·10H₂O). En el proceso de deshidratación la mirabilita se transforma a la especie mineral anhidra, denominada thenardita (SO₄Na). Estos procesos están regulados por las condiciones de temperatura y humedad.

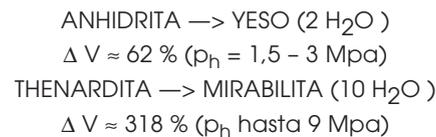
Como puede apreciarse en la gráfica que aparece en la fig. 20, por debajo de 32,2°C la solución cristaliza en thenardita para humedades relativas bajas. Si aumenta la humedad se produce el paso a mirabilita. Puede considerarse que la thenardita es la fase cristalina de verano y climas semiáridos, mientras que la mirabilita es típica de épocas frías y lluviosas (sal de invierno). En una excavación abierta se puede producir la transformación thenardita-mirabilita o la inversa según las condiciones ambientales a lo largo del año.

Conviene señalar que en los túneles pueden variar considerablemente las condiciones de temperatura y humedad. Por ejemplo en verano, en el Túnel de El Regajal y en un mismo día de agosto se llegaron a registrar máximas de 36-37° C y mínimas de 19-20°C, oscilando la humedad relativa ambiente entre 20 y 60%.

En la evaluación de temperaturas hay que tener en cuenta el importante calor de hidratación que desprende el hormigón proyectado y sobre todo los gruesos revestimientos de hormigón en masa o armados.

Este tipo de transformaciones se producen con importantes cambios de volumen o desarrollando fuertes presiones de hinchamiento si el terreno está

confinado; es sobradamente conocido el caso de la transformación de la anhidrita en yeso, sin embargo los estudios experimentales en laboratorio indican que las magnitudes del cambio de volumen o de la presión de hinchamiento en el caso de la cristalización de la mirabilita pueden ser mucho más elevadas:



En la fig. 21 se muestra una grieta formada por la presión vertical de la mirabilita.

Es evidente que los cambios de humedad y temperatura pueden ser mucho más marcados en tramos a cielo abierto, si afloran las formaciones salinas. Es el caso de una plataforma de glauberita so-



Fig. 21. Grieta de expansión al concentrarse el agua sobre una capa impermeable y transformar la thenardita en mirabilita.

metida a fuertes lluvias y a las bajas temperaturas invernales, produciéndose el paso a mirabilita con fuertes distorsiones en las rasantes.

4. Principios básicos de diseño

4.1. Caracterización del terreno

Dadas sus especiales características, para los túneles en terrenos salinos deben utilizarse métodos de investigación algo diferentes de los de los túneles convencionales en rocas o suelos. Señalaremos algunos de los aspectos más importantes a tener en cuenta.

a) Mineralogía

Es evidente la necesidad de conocer el tipo de sales en las que se va a realizar la obra. Este requerimiento puede parecer trivial pero hay una tendencia a guiarse por denominaciones genéricas que no precisan la composición real. De hecho casi nunca aparece un solo tipo de sal en una columna litológica, ni se mantienen los porcentajes relativos de las sales presentes en una determinada formación.

Es conocido el caso de las peñuelas de Madrid y los yesos subyacentes, de edad Miocena. En obras de ingeniería siempre se ha considerado que el yeso era el único componente salino y solo recientemente, al aparecer depósitos de disolución de naturaleza compleja y contenidos de sales en agua superiores a los de saturación en sulfato cálcico se ha descubierto la presencia de halita, glauberita y otras sales.

A título de ejemplo diremos que se han dado casos de errores de identificación por parte de personal no experimentado, confundiendo vetas de anhídrita con calcita. También es complicada la caracterización de los frentes de excavación.

b) Estructura geológica

Es muy importante la detección de fallas, karstificaciones, etc. que pueden constituir caminos preferenciales para la circulación de agua.

Por otra parte hay que intentar definir la naturaleza y estructura de las formaciones salinas. Así por ejemplo, en el caso de los yesos, pueden definirse:

- Yesos masivos, alabastrinos, cristalizados, amorfos, etc.
- Yesos estratificados, alternantes con niveles arcillosos. Puede utilizarse un índice que caracterice los porcentajes relativos de cada componente, sus espesores, etc. por unidad de longitud (generalmente 1 m). No es lo mismo una alternancia centimétrica de yesos y arcillas que decimétrica.
- Yesos nodulares dispersos
- Arcillas yesíferas, etc.

También hay que diferenciar los depósitos con la estratificación natural, subhorizontal, de aquellos plegados o distorsionados, de peores características mecánicas y mucho más sensibles a la disolución.

c) Aguas subterráneas

Lógicamente la prospección de tipo hidrogeológico es fundamental para analizar los posibles problemas de disolución. Sin embargo son frecuentes los casos por causas muy diversas:

- Ejecución de los sondeos con agua potable o no salina. El agua introducida puede producir disoluciones importantes y conducir el agua a capas inalteradas profundas. La preparación de salmueras *ad hoc* es muy problemática ya que la composición del material salino in situ puede variar con la profundidad.
- En este mismo sentido son muy peligrosas las pruebas de permeabilidad
- Es importante la datación del agua freática mediante isótopos (tritio) pero hay riesgo de mezclar acuíferos diferentes si no se toman las muestras de agua según se va avanzando. Es necesario ir tapando o ejecutar sondeos de diferente longitud para independizar las muestras de cada acuífero.
- Hay que establecer el grado de saturación en sales de cada nivel acuífero
- Hay que separar los tramos afectados por aguas de infiltración de aquellos que pueden contener aguas fósiles.

Es muy importante realizar estudios hidrogeológicos que definan las direcciones de flujo, los gradientes, etc. a cota de túnel, así como los puntos de alimentación o infiltración de aguas de lluvia, cursos de agua, etc.

Si el túnel atraviesa cubetas o zonas endorreicas cerradas es muy probable que las aguas estén saturadas en sales y no se produzcan nuevos fenómenos de disolución, pero el propio túnel puede generar flujos de drenaje que faciliten la entrada de agua fresca a las formaciones salinas que le rodean.

d) Frentes de disolución y su evolución

En los casos en que el nivel freático es de tipo "colgado" sobre una formación salina tiene considerable interés evaluar la velocidad de progresión vertical del frente de karstificación-disolución. Podrían darse las tres situaciones siguientes:

- Frente de disolución que no llegaría al túnel en la vida útil de éste
- Frente que puede llegar al túnel
- Los procesos de disolución pueden progresar en el entorno del túnel y bajo el mismo con riesgo de pérdida de apoyo circunferencial.

La primera hipótesis permitiría reducir mucho las medidas preventivas, si bien se tropieza con la dificultad de estimar la velocidad de descenso del frente. Esta velocidad puede ser mucho más elevada a través de fallas o fracturas, aunque existe la hipótesis de un autosellado al saturarse el agua y depositarse o cristalizar sales hidratadas (6).

Dejando aparte fugas accidentales de conducciones, la única vía de aporte de agua fresca para la disolución de las sales es la procedente de la lluvia y hay que tener en cuenta que solo una parte se infiltra, escapando el resto por escorrentía.

El agua infiltrada es retenida en la parte más superficial del suelo (capacidad de campo) cuando éste es poco permeable, por lo que no llega nunca a alcanzar el nivel freático. Únicamente en montañas muy permeables (como terrazas, glaciares o capas de grava cuaternarias) puede pensarse en una penetración eficaz hasta el nivel freático.

Dado que el agua freática, en condiciones de equilibrio, muestra un perfil creciente de saturación en sales con la profundidad, el agua fresca difícilmente puede alcanzar la base del estrato saturado por lo que es más probable un flujo estratificado de dirección subhorizontal hacia los posibles contornos drenantes. Este flujo puede estar acompañado de cierta dilución de la zona superior del nivel freático

por fenómenos de difusión y advección pero no parece probable que pueda alcanzar la base del acuífero, en cuanto éste tenga alguna entidad.

El fenómeno sería distinto si el acuífero llegara a secarse (o pasar a un estado de semisaturación) y fisurarse por desecación, ya que unas fuertes lluvias subsiguientes podrían penetrar hasta la base del mismo, con lo que existiría agua capaz de continuar el proceso de disolución descendente.

Todo parece indicar que los descensos significativos (de algunos metros) de los frentes de disolución exigen una escala de tiempos geológica, pero son impensables en un periodo de decenas de años, como supone la vida útil de una estructura, a no ser que se fuerce el drenaje, tanto verticalmente como en otras direcciones.

Es evidente que la peor situación se produciría cuando existiera un flujo vertical hacia una base drenante o un túnel permeable. El agua fresca iría disolviendo sales o arrastrando partículas sólidas y aumentando la permeabilidad del terreno hasta saturarse a una determinada profundidad. Esta profundidad (frente de disolución) iría aumentando progresivamente al continuar los aportes de agua fresca.

Diversos estudios han estimado la velocidad de descenso de dicho frente. Por ejemplo los autores rusos Verigin y Oradovskaya (citados por Petrukhin, (7)) proponen la fórmula siguiente:

$$\alpha = 1,45 \frac{(C_m - C_0)v}{\rho_g \zeta_0}$$

siendo α = velocidad de descenso del frente (cm/día); C_m concentración en sales para la que se produce la saturación (g/cm^3) = 0, 118 g/cm^3 para el caso de la glauberita y 0,002 g/cm^3 para el yeso; C_0 = concentración en sales del agua a su llegada al acuífero; ρ_g = densidad de las partículas salinas (g/cm^3) \approx 1,9 g/cm^3 y ζ_0 = volumen específico de sales en el terreno antes de producirse el lixiviado (en tanto por uno). Un valor típico sería 0,5, ya que el resto es arcilla o yeso de mucha menor solubilidad; v es la velocidad de filtración que, de acuerdo con la ley de Darcy y de forma aproximada puede suponerse igual a la permeabilidad ya que el gradiente en un flujo gravitatorio descendente es igual a la unidad $i = 1$.

Tabla 3. Parámetros geotécnicos de cálculo (Terreno inalterado y lixiviado)

Parámetro	Arcilla yesífera		Glauberita		Yesos		Halita - Anhidr.	
	I.	L.	I.	L.	I.	L.	I.	L.
Cohesión, kPa	60	10	400	30	300	50	400	40
A. rozamiento	34°	24°	34°	29°	33°	30°	30°	26°
Mód. Deformación, MPa	500	20	700	40	560	50	800	30
P. hincham. MPa	0,3	0	1	0	0	0	2-4	0,5

Con una permeabilidad de 10^{-5} cm/s = 0,86 cm/día para una glauberita medianamente fracturada o porosa y un agua con una concentración salina de $C_0 = 0,06$ g/cm³, se tendría:

$$\alpha = 0,076 \text{ cm/día}$$

Hay que tener en cuenta, sin embargo, que la permeabilidad considerada es muy alta para los terrenos salinos habituales y que es muy difícil que el agua llegue a la formación salina sin cargarse de sales al atravesar zonas parcialmente lixiviadas.

Por otra parte los aportes de agua fresca en campo abierto no son continuos sino que dependen de la pluviometría y de la escorrentía, siendo muy escaso el volumen de agua que llega a un nivel freático semiprofundo, sobre todo en climas con fuerte evapotranspiración.

Calculando con valores de permeabilidad y concentración inicial más realistas y extendiendo el proceso a los aguaceros de intensidad superior a un cierto umbral (pero de menor duración que el resto) se obtienen fácilmente valores inferiores a 0,1 mm/día de media. Esto equivale a un descenso de unos 3,6 m en 100 años, valor que todavía está por encima de las referencias geológicas.

Conviene señalar que, en los últimos años, se han desarrollado modelos (inspirados en la activación de pozos de petróleo mediante la introducción de ácidos) que sugieren el progreso de la disolución a través de pequeños canales tubulares (*wormholes*) que se ramifican de manera dendrítica. Aunque se trata de una hipótesis contrastada, en espesores apreciables el anastomamiento de los canales conduce a un medio quasi-homogéneo al que resultan aplicables leyes de flujo tipo Darcy (8).

Aunque los datos de progresión del frente de lixiviación en terreno homogéneo son bastante tranquilizadores, el problema radica en las zonas de alta permeabili-

dad, como fallas, tramos karstificados, etc. La velocidad de avance de la disolución es en estos casos muy rápida (superior a 1 cm/día) si la excavación o el túnel actúan como drenes y hay agua disponible. Afortunadamente pocas veces el agua tiene acceso directo a fallas o fracturas, salvo cuando estas coinciden con cursos de agua naturales.

Si la única fuente de aportación es la infiltración de agua fresca superficial el proceso es necesariamente muy lento ya que el agua fresca tiene que mezclarse con el agua freática, con un grado de saturación creciente con la profundidad, diluyendo parcialmente la concentración en sales de forma que pueda recuperar cierta capacidad de disolver el sustrato.

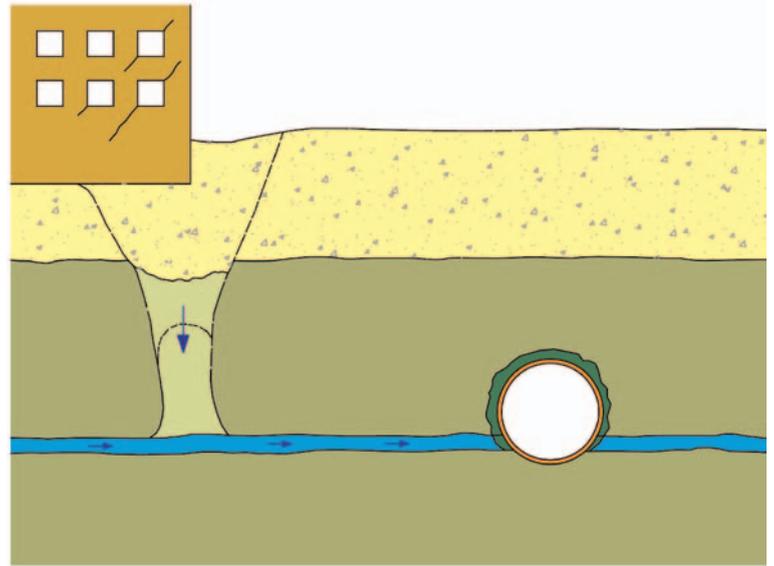
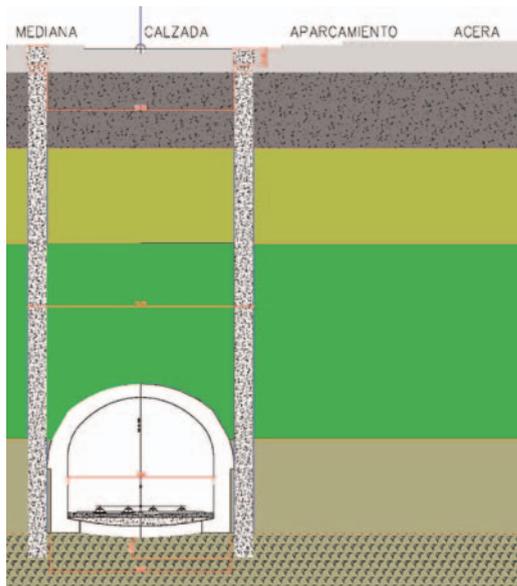
Aparte de los problemas hidrogeológicos, es evidente que el lixiviado produce una reducción de las características mecánicas de los terrenos salinos. Sin embargo, una vez pasado el frente de disolución el terreno puede "regenerarse", recobrando parte de la resistencia perdida. En la Tabla 3 se muestran valores de diversos parámetros en ambas situaciones (terreno inalterado I; terreno lixiviado L).

e) Erosión interna-karstificación

La disolución de las arcillas yesíferas deja un residuo muy blando y saturado que puede traducirse en asentamientos de los edificios situados sobre un túnel urbano. En un caso hubo que ejecutar unas pantallas de pilotes secantes a ambos lados de un túnel para cortar el flujo hacia el trasdós drenante del mismo (fig. 22).

La formación de huecos kársticos de cierta importancia requiere macizos salinos bastante competentes para que no colapsen las cavidades. En otros casos, sin embargo, puede haber escapes de material salino o del lixiviado hacia exutorios, activando redes de fracturas o paleokarsts hasta entonces estabilizados. En la fig. 23) se muestra el caso de una dolina formada

Fig. 22. Barreras de pilotes secantes para cortar el lixiviado de las arcillas yesíferas hacia el túnel. A la derecha, Fig. 23. Dolina creada por activación del drenaje en un sustrato con niveles karstificados, coincidiendo con la ejecución de un túnel.



bajo un recubrimiento aluvial al drenar el sustrato hacia un túnel, a favor de niveles preexistentes de alta permeabilidad.

4.2. Bases de diseño

Los problemas ya comentados, de disolución, agresividad, etc. tienen una clara influencia en el diseño del túnel y en los posibles métodos constructivos.

Pueden citarse al respecto las limitaciones siguientes:

- El túnel no puede ser drenante, ni hacia su interior ni longitudinalmente
- Los túneles hidráulicos deben ser absolutamente estancos.
- Los métodos de excavación deben excluir los aportes de agua
- Deben usarse cementos antisulfatos
- Debe limitarse la decompresión y drenaje asociados a la excavación Æ Ejecución rápida del revestimiento y evitar perforaciones que puedan favorecer la circulación de agua.
- Evitar voladuras que puedan fisurar la roca
- En el caso de existencia de cloruros no se pueden emplear elementos metálicos convencionales en el contacto con el terreno

En líneas generales debe garantizarse la durabilidad y estabilidad del túnel a largo plazo (vida útil, según el tipo de obra de 50 a 100 años).

El problema puede desglosarse en dos ámbitos:

- 1) La estabilidad y durabilidad del sostenimiento-revestimiento del túnel en el agresivo ambiente en que tiene que encajarse
- 2) La estabilidad del entorno del túnel en donde podrían desarrollarse fenómenos de disolución y karstificación

Por lo que se refiere al sostenimiento-revestimiento, éste debe cumplir las siguientes condiciones:

- No ser degradable por las sales ya que dejaría una zona de alta permeabilidad longitudinal que favorecería la disolución y karstificación de las formaciones salinas y la creación de huecos que podrían afectar a la estabilidad del túnel.
- No dar lugar a juntas o fisuras que puedan permitir el paso del agua freática y crear una renovación de agua que facilite la disolución de la roca salina encajante.
- No contener elementos metálicos susceptibles de corrosión por cloruros
- Los cementos empleados deben tener una elevada resistencia a los sulfatos.
- Dado que ningún cemento asegura una durabilidad suficiente el revestimiento debe permitir la introducción de una capa protectora de material sintético o no atacable por las sales.
- Ser capaz de resistir las presiones de hinchamiento que puedan desarrollarse

Es probable que el riesgo de crear un flujo longitudinal por el contorno del túnel y que éste actúe como un gran dren o alimentador de agua, sea el más importante a considerar.

Es difícil cuantificar este riesgo ya que depende de la calidad de los materiales en contacto con el terreno. Podría opinarse, no obstante, que este riesgo es corregible mediante diafragmas o coronas transversales, previsiblemente de inyecciones. También cabe pensar que, si hay poco movimiento de agua freática, ésta se mantendrá saturada y no progresará el ataque al sostenimiento.

El tema de los diafragmas de inyecciones no es tan sencillo ya que el terreno no es inyectable, salvo por "claquage", lo cual no es aconsejable en este contexto. Por otra parte es difícil garantizar la estanqueidad perfecta de estos diafragmas. De todos modos la solución de la corona de inyecciones sí sería recomendable en el cruce de fallas o grandes fracturas, buscando la máxima obturación de las mismas.

Una alternativa sería hacer "collares" de hormigón, sobreexcavando la sección con una profundidad del orden de 0,50 m y un ancho del mismo orden, relleno con un hormigón rico en cemento y vibrado. Es una solución similar a la empleada para cortar la filtración longitudinal en conductos a través de presas de tierra.

Recientemente hemos tenido conocimiento de que una solución de este tipo ya había sido empleada por el gran ingeniero D. Miguel Vidal Pardal en algunos túneles en yeso de los Canales del Taibilla (fig. 24), tal como consta en un artículo de la Revista de Obras Públicas de Agosto de 1944. Los tabiques anulares se colocaban en los extremos de los tramos en que se detectaban filtraciones.

El mismo ingeniero también tenía muy clara la necesidad de impermeabilizar el túnel tanto frente a las aguas exteriores como a las que transportaba el propio túnel hidráulico. Lo único que se podía hacer con los medios de la época era colocar una capa de arcilla apisonada contorneando el túnel. Para ello se ejecutaba una bóveda de medio pie de ladrillo soportada por cerchas de madera y se hormigonaba el revestimiento del túnel con el menor desfase posible (fig. 25).

Con la misma idea se realizaron anillos de intercepción circunferenciales en el sostenimiento del túnel de El Regajal (fig. 26). La excavación se realizaba con rozadora y el anillo se hormigonaba al mismo tiempo que el revestimiento.

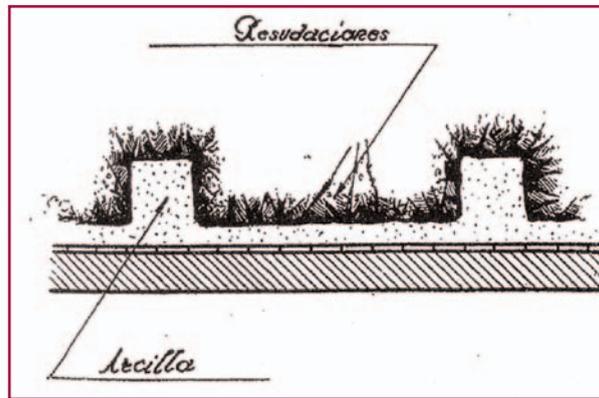


Fig. 24. Los anillos transversales ejecutados por Vidal Pardal en túneles en yesos (9).

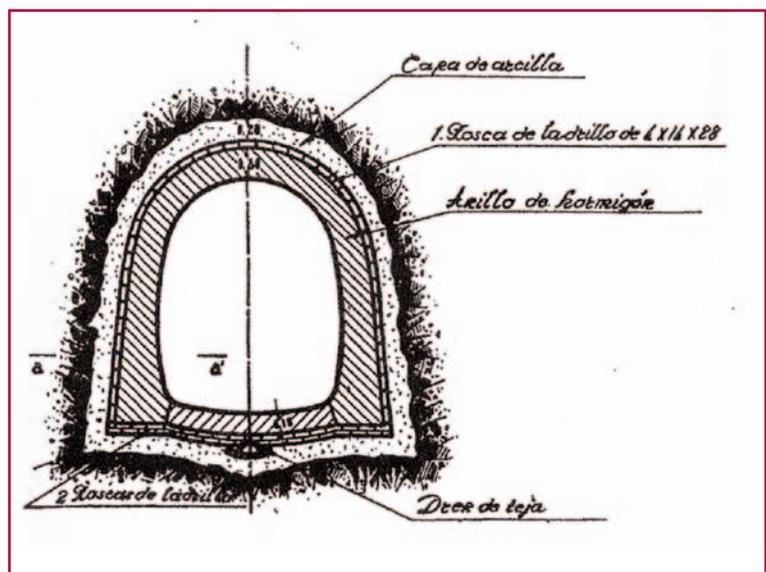


Fig. 25. Capa impermeabilizante de arcilla en un túnel en yesos (9).

Parece que también se colocaron anillos con función interceptora (Dammringe) en el túnel de Freudenstein.

Por lo que respecta a la **corrosión de armaduras y elementos metálicos** por los cloruros (halita) las soluciones son diversas.

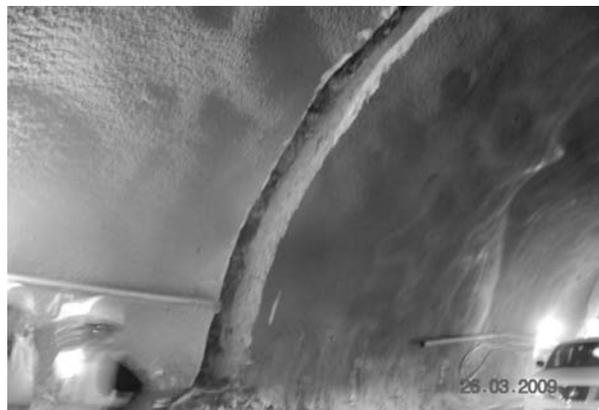


Fig. 26. Anillo de intercepción excavado en el túnel de El Regajal.

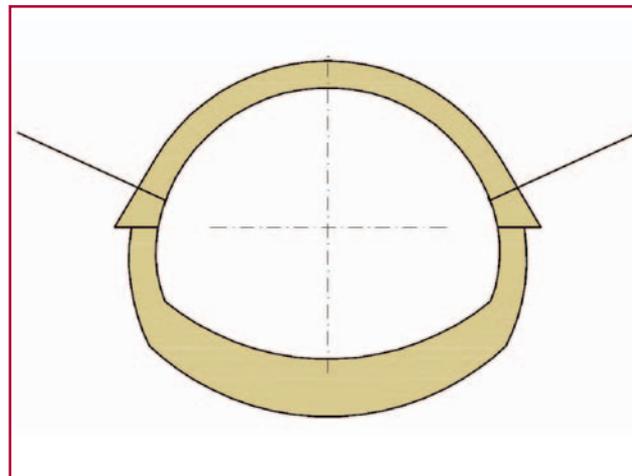
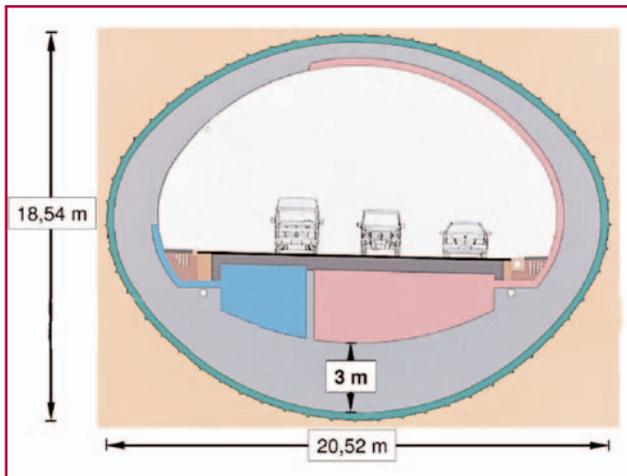


Fig. 27.- Sección de elevada resistencia adoptada en el túnel de base de Engelberg (tomada de Bacharach, (10)). A la derecha, fig. 28.- Sección propuesta para tramos expansivos del túnel de El Regajal.

La más obvia sería evitar la existencia de acero en sostenimientos y revestimientos. Evidentemente esto se puede conseguir con medidas diversas como:

- El empleo de fibras sintéticas en el hormigón proyectado
- Utilización de armaduras galvanizadas, de fibra de vidrio, de acero inoxidable, recubiertas con epoxy, etc.
- Colocación de una lámina protectora entre un sostenimiento provisional y la sección resistente
- Revestimientos robustos de hormigón en masa
- Empleo de recubrimientos importantes (70-90 mm), limitando la fisuración o colocando mallas epiteliales de tipo sintético.
- Protección catódica

Lógicamente no deben emplearse cerchas metálicas, aunque podría estudiarse el empleo de cerchas de celosía con revestimiento protector de epoxy o plástico.

El problema principal se plantearía en las secciones sometidas a expansividad del terreno (combinaciones de halita, arcilla expansiva y anhídrita) ya que los esfuerzos difícilmente se pueden absorber sin armar la sección.

Respecto a la agresividad sulfática, aparte de los cementos SR que propone la Instrucción para la Recepción de Cementos RC-08, las combinaciones de sales (sulfatos cálcico y sódico, magnesio, cloruros, etc.) pueden hacer aconsejable el empleo de otros cementos especiales. Pueden considerarse al respecto el supersulfatado, el que lleva aluminato cálcico, los fosfatados, con silicato alcalino o el de geopolímeros (11).

Es conocida la importancia de la compacidad en medios agresivos, por lo que cabe esperar un mejor comportamiento en hormigones ricos en cemento y bien curados (como es el caso de las dovelas) que en el habitual hormigón en masa, no vibrado, o en el poroso hormigón proyectado.

El empleo de hormigones muy ricos en cemento puede conducir, no obstante, a fisuras de retracción que agravarían el riesgo de infiltración de aguas salinas.

En los casos en que el fenómeno más previsible sea de **expansividad** la sección del túnel debe dimensionarse para fuertes presiones en su parte inferior (*resistance principle*). Debe irse a formas redondeadas, muy armadas, con espesores importantes (figs. 27 a 30). Esto lleva a métodos constructivos convencionales, a pesar de las dificultades de excavar y armar secciones casi circulares. Estos métodos también permiten variaciones de espesor más ajustados a las solicitaciones tensionales del revestimiento.

La parte más solicitada es la de contrabóveda, la cual puede ir anclada. (Fig. 31). La alternativa de dejar una cámara de expansión en la base del túnel, propugnada por Kovari (*yielding principle*), ha tenido poca utilización, principalmente por su dificultad constructiva (figs. 32 y 33). En algunos casos, como en el de Chienberg, se ha propuesto una sección con anclaje de la parte inferior de la cámara de expansión y apoyo del túnel sobre alineaciones de gatos bajo cada hastial. Se trata de una solución desmedida, poco recomendable.

La parte más solicitada es la de contrabóveda, la cual puede ir anclada. (Fig. 31). La alternativa de dejar una cámara de expansión en la base del túnel, propugnada por Kovari (*yielding principle*), ha tenido poca utilización, principalmente por su dificultad constructiva (figs. 32 y 33). En algunos casos, como en el de Chienberg, se ha propuesto una sección con anclaje de la parte inferior de la cámara de expansión y apoyo del túnel sobre alineaciones de gatos bajo cada hastial. Se trata de una solución desmedida, poco recomendable.

A la izquierda, fig. 29.- Sección armada en tramos expansivos del túnel de Fabares. A la derecha, fig. 30.- Sección reforzada del túnel de Lilla (5).

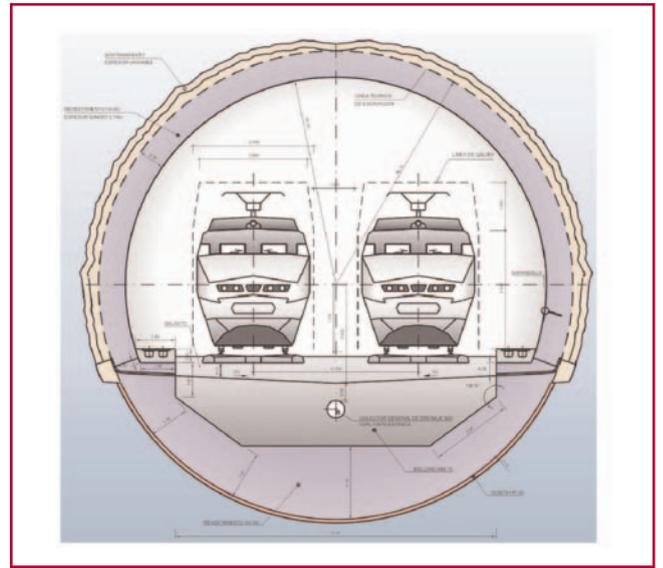
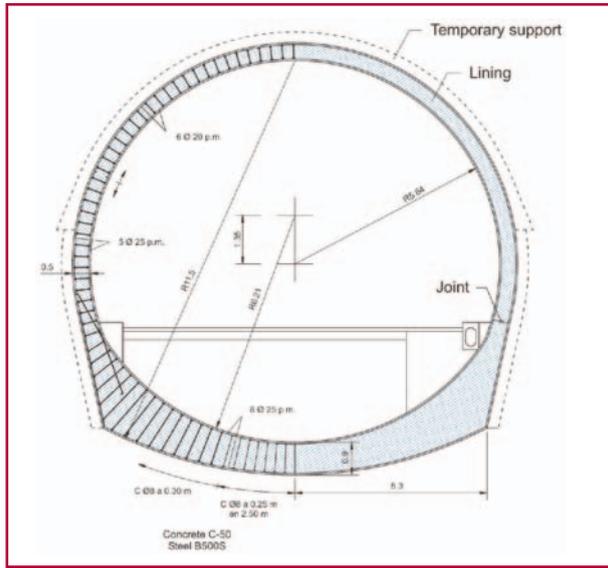


Fig. 31. Soluciones para contrabóvedas en terreno expansivo (12).

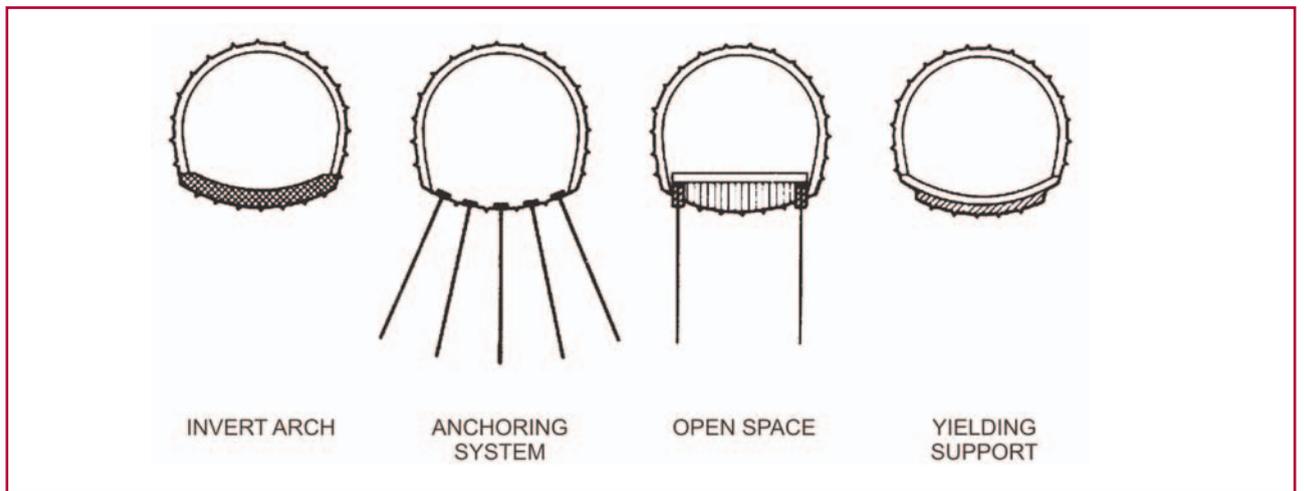


Fig. 32. Sección del túnel de Freudenstein en la línea de alta velocidad Mannheim-Stuttgart. A la derecha, fig. 33. Propuesta de cámara de expansión en el túnel de Fabares.

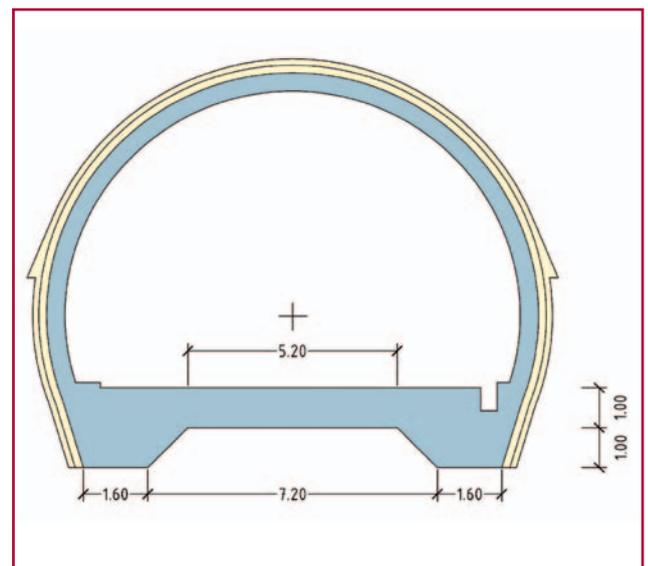
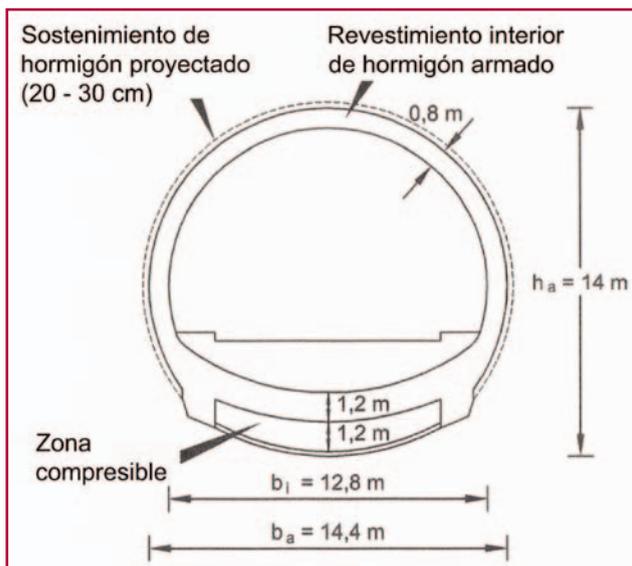


Tabla 4. Ensayos de hinchamiento libre a 4 años

Material	Hinchamiento libre
Anhidrita	8%
Arcilla roja con vetas de anhidrita	>15%
Argilita negra y anhidrita	>11%
Anhidrita remoldeada	>30%
Arcilla roja con vetas de anhidrita, remoldeada	>65%

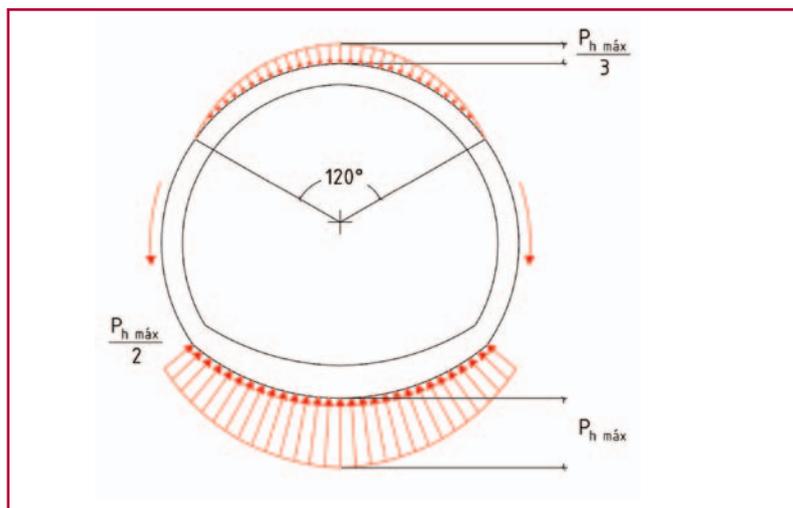
Tabla 5 . Presiones máximas de hinchamiento orientativas

Terreno	$P_{h,max}$ (MPa)
Arcillas expansivas	$(w_L - w_n)/100^*$
Argilitas expansivas	0,1 - 0,3
Argilitas con sulfatos	0,1 - 0,5
Argilitas con nódulos de yeso y anhidrita	1 - 3
Anhidritas y yesos con vetas o hiladas de arcilla	2 - 6
Anhidritas	1,5 - 3

* Límite líquido y humedad natural en %.

En los casos más críticos se han adoptado presiones en solera del orden de 6 MPa. En el túnel de Fabares de la Autovía del Cantábrico se calculó con 4 MPa y existen bastantes casos en que puede ser suficiente considerar presiones de 2 Mpa. En el túnel de Lilla se dimensionó el refuerzo para 5 MPa. Hay muchos túneles alemanes en anhidritas diseñados para presiones de hinchamiento de 1,5 a 3 MPa.

Fig. 34. Leyes simplificadas de presiones de hinchamiento.



Como ya se ha comentado, los túneles en anhidrita masiva tienen pocos problemas, a no ser que en su construcción o explotación se permita el paso de agua al terreno. Incluso en ese caso, la baja permeabilidad de las anhidritas y posiblemente el auto-sellado de juntas hace que los procesos de hinchamiento se diferan mucho en el tiempo. Mucho más peligrosas son las alternancias finas de yesos o anhidritas con margas arcillosas o los yesos dispersos en margas expansivas. Estas diferencias de comportamiento se manifiestan también en los hinchamientos libres. En la tabla 4 se muestran algunos resultados correspondientes al Túnel de Fabares.

A título orientativo pueden considerarse las presiones máximas de cálculo de la Tabla 5. El intervalo de variación corresponde a las condiciones de menor o mayor aporte de agua que puede darse en el terreno, en el entorno del túnel.

Son conocidos los ensayos de hinchamiento utilizados para caracterizar la expansividad de estos materiales y las posibles presiones de hinchamiento, siendo el más popular el de Huder-Amberg. Desgraciadamente las pruebas de laboratorio reproducen bastante mal las situaciones reales, aunque pueden encuadrar la gama de posibles parámetros, generalmente al alza.

Aunque existen modelos de suelos no saturados en los que se pueden simular procesos de hinchamiento en función de la succión o el grado de saturación, la difícil estimación de parámetros y las complejas condiciones de contorno limitan considerablemente su utilidad como herramientas de dimensionamiento. De aplicación más sencilla son los métodos que combinan los elementos o diferencias finitas convencionales con algunas leyes de comportamiento experimentales, como es el caso del método de Wittke (13) (ver Rodríguez-Ortiz et al. (14)). Por último puede obtenerse una primera aproximación al dimensionamiento estructural aplicando leyes de presiones deducidas de casos reales (fig. 34), en las que es necesario fijar la presión máxima esperable. Este método permite, de modo sencillo, considerar situaciones anormales de empuje, como las que pueden derivarse de heterogeneidades del terreno o saturaciones localizadas y/o accidentales del mismo.

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores podemos pasar al análisis de posibles soluciones constructivas.

5. Métodos constructivos

5.1. Métodos convencionales

Nos referimos a todos aquellos que no incluyen el empleo de tuneladoras. Estos métodos son más versátiles en el tratamiento de problemas puntuales, como los derivados de flujos concentrados o karstificación. Sin embargo son poco adecuados en terrenos expansivos ya que su lentitud hasta que está activo el sostenimiento de solera permite una notable expansión y degradación del sustrato. Por otra parte es mayor el tiempo de exposición a la humedad ambiente y se facilita la entrada al terreno del agua procedente del propio túnel o de las operaciones constructivas. Esta lentitud también es desfavorable en terrenos muy solubles ya que durante el tiempo en que el túnel está abierto, no solo por el frente sino inferior o lateralmente, se permite un flujo de agua que inevitablemente puede crear huecos de disolución importantes en torno al túnel. Lógicamente este problema se minimiza con el avance a sección completa, cuando sea posible.

Por otra parte hay que tener en cuenta que, partiendo de la condición de que el túnel no drene, el sostenimiento debe ser capaz de resistir las presiones hidrostáticas, las cuales pueden resultar excesivas para sostenimientos ligeros, carentes de cerchas, o en las capas iniciales de los mismos. Posiblemente será necesario tolerar un cierto drenaje hasta poder cerrar estructuralmente la sección.

Por supuesto tanto los terrenos expansivos como los solubles tienen severas limitaciones respecto a la entrada de agua, por lo que deben descartarse las perforaciones con jumbo o barrenas refrigeradas con agua, siendo aconsejable el empleo de rozadoras y rippers. Además es necesario un control cuidadoso del agua drenada puntualmente o procedente de otros terrenos.

Estos métodos también plantean dificultades para conseguir secciones quasi-circulares que serían las más adecuadas para resistir presiones importantes, siendo poco aconsejables las secciones en herradura.

a) Nuevo Método Austriaco

Es muy utilizado y ya hemos comentado su empleo en casos diversos (figs. 27 a 30 y 32-33). En te-

rrenos salinos deben adoptarse precauciones especiales, como las siguientes:

1. Aplicación de una capa de sellado de hormigón proyectado con fibras sintéticas. Aunque la más utilizada es el polipropileno creemos que es más adecuado el PVA (alcohol de polivinilo). Aunque el hormigón proyectado se haga con cemento sulfuroresistente es dudosa la durabilidad a largo plazo, dada la porosidad del material. También pueden emplearse sellados de tipo bituminoso, aplicados en caliente o frío, pero resulta más práctico el recurso a la gunita de polímeros (*polymer shotcrete*). No contiene cemento y es una mezcla de un polisocianato y resinas que se aplica en capa delgada. Es compatible con geomallas o fibras sintéticas.
2. Bulonado mediante bulones de fibra de vidrio, siendo necesario que la perforación de los taladros se efectúe con aire comprimido, evitando la utilización de agua.
3. Ajuste de los pases para no tener que colocar cerchas.
4. Colocación de una lámina impermeable en todo el contorno de la excavación, incluida la solera o contrabóveda. La lámina no tendrá salida a ningún drenaje.
5. Hormigonado del revestimiento definitivo muy cerca del frente de excavación.

Evidentemente este método tiene el riesgo de la aparición de terrenos inestables como puede ser arcilla yesífera lixiviada, yeso sacaroideo saturado, techo finamente estratificado con rotura lajosa, etc. En tales casos puede ser necesario un sostenimiento adicional, bien en forma de cerchas o mediante empicuetados, paraguas, etc. En cada caso hay que evaluar debidamente los riesgos de corrosión.

b) Precorte

Aunque se trata de un método injustamente "proscrito" puede constituir una alternativa interesante ante la necesidad de un presostenimiento al avance. Podría utilizarse solo en el avance, para el sostenimiento de la bóveda. La solución comprendería las fases siguientes (fig. 35):

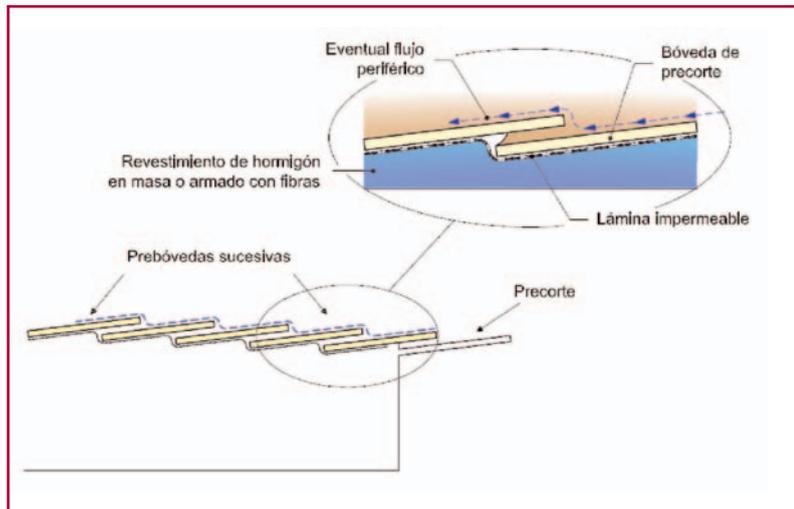


Fig. 35. Método de precorte.

1. Ejecución de las dovelas de hormigón proyectado
2. Excavación de los hastiales y contrabóveda y aplicación de una capa de sellado (ver el caso anterior).
3. Colocación de una lámina impermeable
4. Hormigonado in situ del revestimiento.

Este sistema tiene una ventaja no despreciable desde el punto de vista de los fenómenos de disolución. El hecho de las prebóvedas imbricadas hace imposible la creación de un flujo paralelo al eje del túnel, aumentando considerablemente el recorrido del agua epitelial y consiguiéndose en cada solape un efecto análogo al de los collares antes citados.

c) Otros métodos

Pueden considerarse otros posibles métodos como:

- El **Método Belga**. Tiene el inconveniente de que las longarinas, tablas, etc. crean una zona de alta permeabilidad en torno al túnel, incluso con una adecuada inyección de contacto. También da lugar a numerosas juntas entre pases que deberían ser selladas con una banda *water-stop*, con la consiguiente complicación de los trabajos.

Hay que señalar que en el Metro de Madrid se han realizado bastantes kilómetros de túnel por el Método Belga en peñuelas yesíferas y yesos sin que se hayan advertido problemas especiales

durante bastantes años. También es cierto que el espesor del revestimiento limita la entrada de agua por las juntas y, por otra parte, es difícil detectar el flujo longitudinal. Hay constancia, no obstante, de algunos casos en los que el drenaje asociado a la excavación del túnel ha producido en el entorno asientos por lixiviado de niveles yesíferos.

- El **Método Bernold**. Es interesante cuando no requiere presostenimiento pero tiene el inconveniente de la rugosidad de las chapas perdidas de encofrado. Aunque podrían recubrirse de gunita, no hay garantías de estabilidad frente a las ondas dinámicas de los trenes. También genera numerosas juntas entre pases y da lugar a problemas de corrosión.

Merece especial mención el método utilizado en el Túnel de El Regajal, de la L.A.V. Madrid-Valencia (15). Una descripción detallada del mismo ha sido publicada por V. González (16).

La idea era eliminar los inevitables huecos del Método Belga, cerrar la sección cuanto antes para evitar la decompresión del terreno y disponer secciones muy robustas, eventualmente armadas. Con avances cortos y en terrenos competentes es posible no entibar y hormigonar directamente contra el terreno, pero se trataba de una sección de excavación muy grande (180 m²) para avanzar y revestir a plena sección. Por ello se optó por un sostenimiento de hormigón proyectado (eventualmente armado y con cerchas cuando no existía halita) ejecutado en avance para la totalidad del túnel. En algún caso hubo que colocar una presolera y recalzar el sostenimiento mediante micropilotes.

A continuación se realizó la destroza, bajando el sostenimiento hasta solera y hormigonando la contrabóveda junto con los macizos de base de hastiales los cuales servían de apoyo al encofrado con el que se hormigonaba el resto del revestimiento. En bastantes casos hubo que colocar armaduras de acero galvanizado (fig. 36). El hormigonado se llevaba lo más cerca posible del frente de destroza.

Las diferentes condiciones del terreno a lo largo del túnel obligaron a plantear 4 secciones distintas, en función del mayor o menor riesgo de lixiviado y/o expansividad (ver V. González, (16))

Los mismos principios se han aplicado en casos en que se ha excavado con sección circular apli-



Fig. 36. Detalle de las armaduras en acero galvanizado colocadas en el túnel de El Regajal.

cando un sostenimiento de hormigón proyectado y colocando posteriormente un revestimiento de hormigón en masa o armado (figs. 37 y 38).

5.2. Métodos mecanizados - Tuneladoras

Los terrenos salinos litificados son bastante adecuados para la excavación con tuneladora y de hecho estas máquinas se han utilizado ampliamente en el Sur de Madrid. En este caso se trataba de tu-

neladoras tipo EPB ya que, además de los yesos, se cruzaban otros terrenos como rellenos, depósitos cuaternarios, arcillas, etc. Es posible, no obstante, el empleo de tuneladoras de roca, tipo TBM cuando la mayor parte del túnel discurre en formaciones salinas masivas.

Pueden presentarse, sin embargo, diversos problemas (18) como:

- La pegajosidad de las componentes arcillosas del terreno, lo cual exige el empleo de agua o espumas
- La deshidratación de los yesos por el calor de fricción en la cabeza de corte, con lo que pasan a anhidritas y la posterior hidratación-expansión de la misma al inyectar agua y espumas
- Las presiones de hinchamiento contra las dovelas al inyectar el gap con mortero.
- El fraguado del yeso hemihidrato dentro de la cámara
- La "elasticidad" de los yesos que impide una rotura frágil como se busca en las pistas entre cortadores de disco.

En general son preferibles los túneles de doble vía a los túneles gemelos de menor diámetro ya que no es aconsejable aumentar el área de la interfaz túnel-terreno problemático.

Si se considera la resistencia estructural frente a la expansividad no cabe duda de que la tuneladora

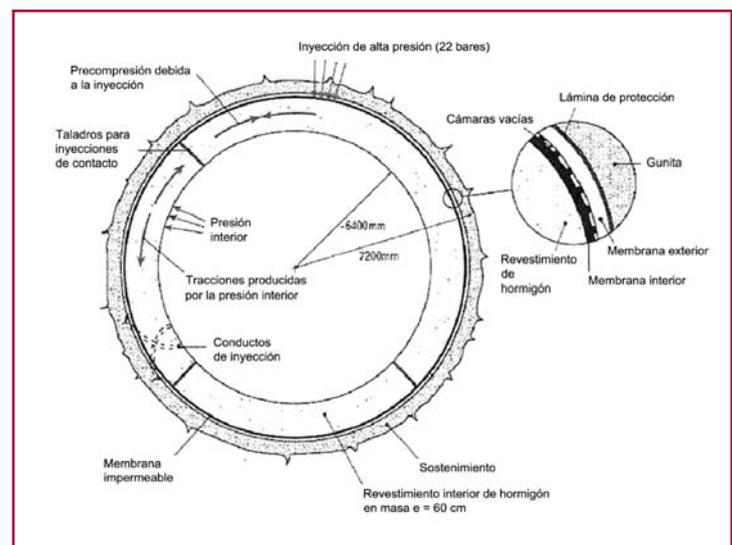
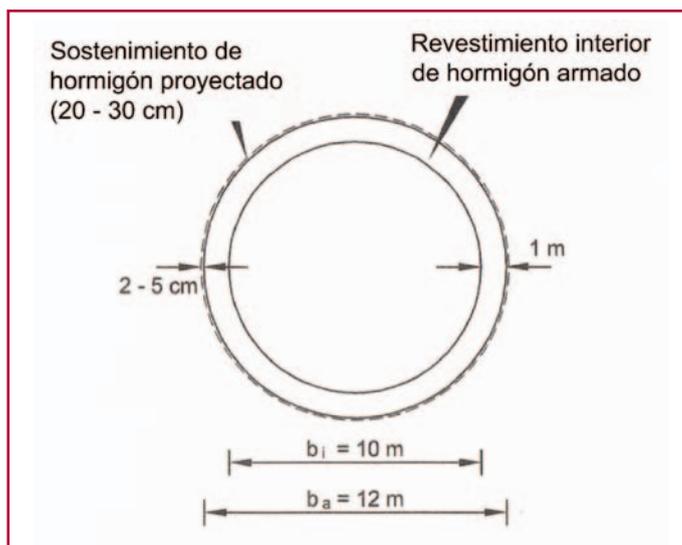


Fig. 37. Túnel del S-Bahn de Stuttgart, bajo el Hasenberg (90 m de cobertera). A la derecha, Fig. 38. Túnel de presión en Niagara Falls, con revestimiento de hormigón en masa precomprimido con inyecciones de lechada (17).

es la mejor solución para conseguir una sección circular pero los espesores prácticos de dovelas suelen ser insuficientes para las elevadas presiones de hinchamiento. Aunque es posible crear una sección complementaria de refuerzo en la zona de solera, bajo la plataforma de circulación, los esfuerzos pueden ser importantes algo por encima de dicha plataforma.

La ejecución con tuneladora tiene la gran ventaja de la rapidez frente al drenaje producido por la excavación, aunque la gran cantidad de agua y espumas que hay que inyectar en el frente para facilitar la excavación puede ser perjudicial en terrenos expansivos.

Desde el punto de vista de la agresividad está claro que con cementos especiales pueden conseguirse en planta dovelas de muy elevada resistencia al ataque químico. Sin embargo existen otros problemas a considerar:

- La dificultad de un sellado adecuado del “gap” y la elevada vulnerabilidad del mortero de inyección.
- La profusión de juntas en el revestimiento de dovelas. Este problema puede minimizarse con una atención especial a las bandas de sellado y estanqueidad.
- Las elevadas cuantías de acero en las dovelas

En el primer caso puede pensarse en productos de relleno de base no cementicia (se ha llegado hasta a inyectar silicona), aunque los rellenos “blandos” como el poliuretano, los compuestos de caucho o polímeros, etc. no proporcionan suficiente fijación a los anillos. Quizá fuera más fácil alternar longitudinalmente el mortero con anillos de bentonita u otros materiales no atacables por las sales.

La permeabilidad de las juntas no es un problema menor, aunque cada vez se consiguen mejores resultados. Puede recordarse el caso del túnel carretero de Ahmed Hamdi, de 1640 m de longitud, bajo el Canal de Suez. Este túnel se construyó en 1983 sin especiales precauciones, con dovelas de 0,60 m de espesor. Pocos años después de la construcción se observó una intensa corrosión de las armaduras y penetración de agua salada por las juntas, llegando a recogerse 80 kg de sal al día en el interior del túnel. En 1992 hubo que proceder a la reparación colocando una lámina impermeable de 2 mm de es-

pesor por el interior y ejecutando un nuevo revestimiento de hormigón armado.

En algunos túneles realizados en Madrid con EPB han aparecido diversos problemas de disolución tanto por flujo hacia pozos de ventilación o salidas de emergencia ejecutadas con pantallas discontinuas de pilotes, como por filtraciones de aguas salinas a través de las juntas de dovelas, generalmente asociadas a curvas o tramos con defectos en la colocación de las mismas o en el relleno del gap. El problema se agrava cuando el túnel comunica acuíferos de agua no salina, terrazas fluviales, etc., con las formaciones salinas subyacentes. En las figuras 39 y 40 se muestran algunas de las situaciones detectadas.

También puede citarse el caso de un colector de avenidas, de 7,66 m de diámetro de excavación y 4800 m de longitud, en el Sur de Madrid, encajado en yesos y peñuelas yesíferas. Del total de 3167 anillos, en el 12% había presencia de agua (desde manchas a goteos y chorros), pero solo en un 3,4% de anillos se daban aportes de agua apreciables. A base de inyecciones el caudal total aforado se redujo de 10.812 l/día a 7.070 l/día. Los análisis químicos indicaron contenidos en sulfatos próximos a los 3.600 mg/litro, con una proporción relativa de 52% - 45% entre los sulfatos cálcico y sódico en las peñuelas y de 74%-24% en los yesos.

En un principio se inyectó lechada de cemento y se aplicó en las juntas un mortero de sellado. Posteriormente se utilizó lechada de cemento y espumas de poliuretano (Geofoam). Fue imposible conseguir un sellado completo de las filtraciones ya que el agua migraba desde la junta tratada a las adyacentes, pero se consideró aceptable el caudal entrante, muy por debajo de los 3 l/seg/km señalados por alguna normativa para túneles de saneamiento. Para las pocas juntas con caudal más importante se ha propuesto un tratamiento interior de sellado a base de resinas.

Los problemas de agresividad y corrosión han merecido un tratamiento especial en túneles mecanizados. En el Metro de Copenhague, en una zona expuesta al agua del mar, se ha conseguido, con un hormigón especialmente dosificado (con humo de sílice y cenizas volantes) reducir el riesgo de penetración de cloruros hasta límites aceptables (19). También se han cuidado los recubrimientos óptimos, teniendo en cuenta que es más peligrosa la zona in-



A la izquierda, fig. 39. Concentración de sales en una junta. A la derecha, fig. 40.- Estalactitas salinas.

terior, donde puede evaporarse el agua y concentrarse o cristalizar los cloruros.

En el caso del Storebaelt, igualmente en ambiente marino, se recurrió a armaduras con protección epoxídica.

Es frecuente en la práctica alemana la solución del doble revestimiento en terrenos muy agresivos. Esta solución considera sacrificable el revestimiento exterior de dovelas, disponiendo por el interior del mismo una lámina sintética y hormigonando contra ella un revestimiento interior definitivo. Evidentemente se trata de una solución cara pero muy segura, si bien en nuestro caso no resolvería el problema de la permeabilización progresiva del contacto túnel-terreno, salvo que se aplicaran soluciones como las anteriormente mencionadas.

En la fig. 41 se muestran algunas de las soluciones comentadas.

Una alternativa que eliminaría los problemas del relleno sería la del revestimiento extruído (fig. 42). En este método, con una larga tradición en la URSS (20), Japón y Alemania (existe una interesante patente de la empresa Hochtief), va generando de manera continua un revestimiento de hormigón, comprimido contra el terreno. Este hormigón resulta de elevada compacidad y puede elaborarse con materiales resistentes al ataque salino o ser armado con fibras sintéticas. La solución se completa, en caso necesario, con una lámina impermeable y el hormigonado in situ de un revestimiento interior.

Se ha planteado el riesgo de fisuración del revestimiento por retracción, aunque el problema podría

resolverse dejando sobre el encofrado elementos formadores de junta, generalmente de hormigón de polímeros de alta resistencia.

Se conocen pocos casos de túneles ejecutados mediante tuneladoras en terrenos salinos o expansivos. Puede citarse el caso del 2º Túnel de Pfänder en pizarras arcillosas, con dovelas de 27 cm y un revestimiento interior de 30 cm. Para las dovelas se consideró una presión de hinchamiento en la parte inferior de 0,3 MPa. Lo habitual es disponer un revestimiento interior, hormigonado in situ y de espesor variable, para alcanzar la resistencia necesaria. La falta de un revestimiento interior en la galería piloto del

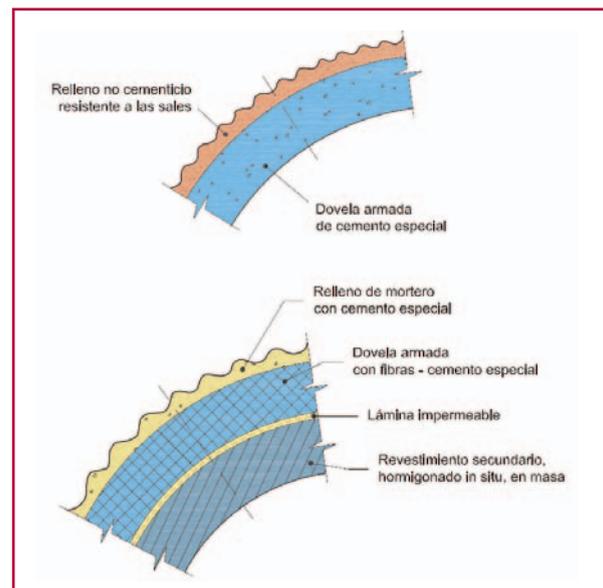


Fig. 41. Revestimientos para la solución de tuneladora.

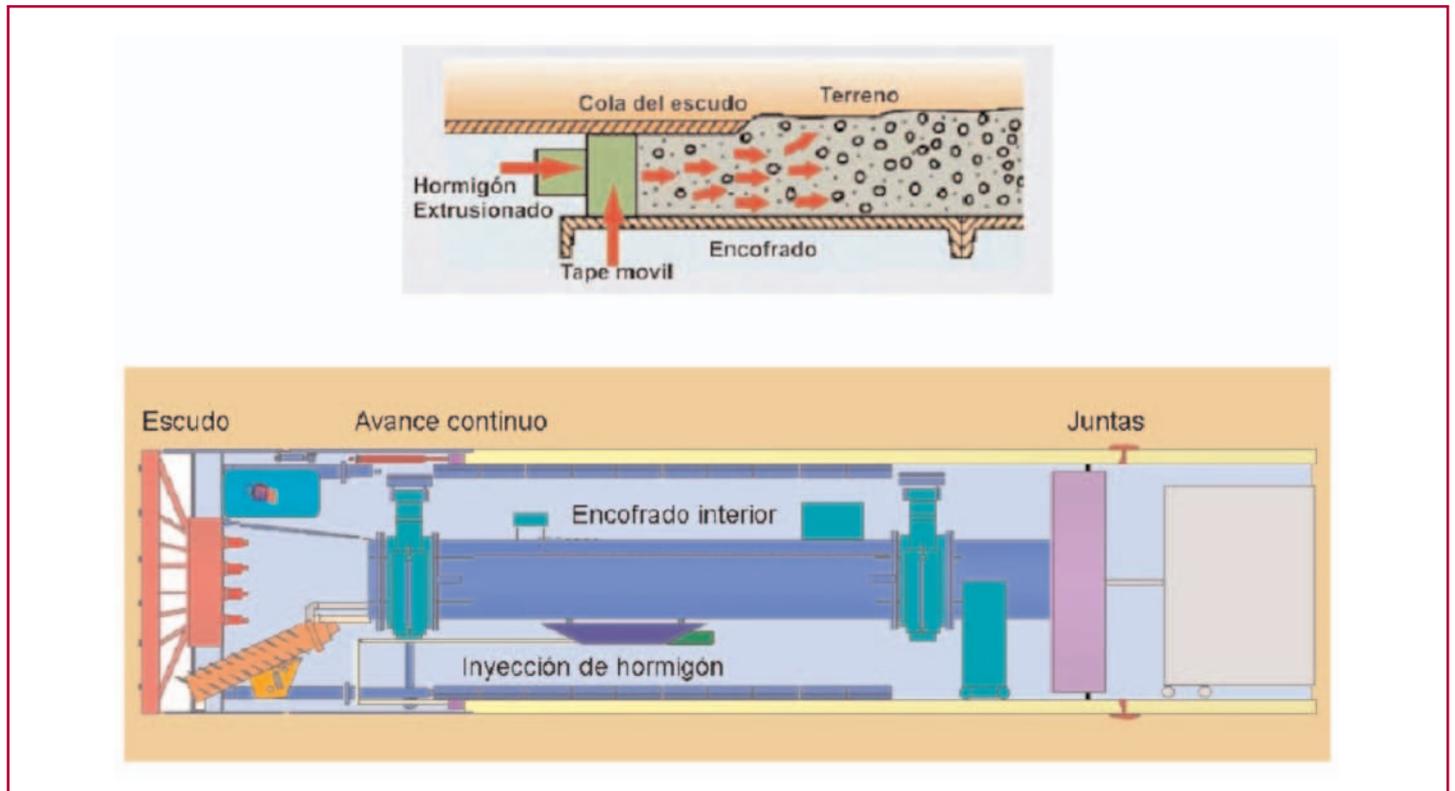


Fig. 42. Revestimiento de hormigón extruido.

túnel de Chienberg, de 3,50 m de diámetro, en arcillas del Keuper dio lugar a levantamientos de 16 cm de la solera en solo 6 meses.

La solución de revestimiento interior puede no ser viable si las presiones de hinchamiento se desarrollan con mucha rapidez. Hay que tener en cuenta que la excavación con tuneladora impide, generalmente, iniciar el tajo de hormigonado hasta que no se ha terminado el sostenimiento de dovelas en todo el túnel. La alternativa de colocar dovelas de gran espesor (0,60 a 1 m), con hormigón de alta resistencia (H-80 a H-100) y muy armadas no se ha probado todavía. Incluso sería posible alternar las dovelas de hormigón con anillos de dovelas metálicas.

En terrenos salinos el problema del flujo por el trasdós de las dovelas dista mucho de estar resuelto.

5.3. Soluciones frente a la karstificación del entorno

En principio la construcción de túneles en un karst yesífero activo es una situación a evitar ya que se trata de un karst mucho más peligroso que el calcáreo, muy difícil de reconocer mediante prospecciones y que puede evolucionar muy rápidamente. Lo más

aconsejable es cambiar el trazado y buscar zonas de mejores condiciones geológicas.

Cuando se trata de un karst fósil el riesgo viene definido por las dimensiones y número de huecos o cavernas, así como por la existencia de zonas residuales o lixiviadas de baja capacidad portante. La solución es puentear dichas zonas, mejorar los rellenos flojos o cimentar el túnel mediante pilotes u otros elementos apoyados en terreno firme.

En formaciones salinas masivas debe contemplarse el riesgo de que en determinadas zonas de alta solubilidad, bien por una evolución natural del macizo o por la alteración del flujo subterráneo creada por el túnel, se formen huecos importantes o masas de terreno lixiviado que puedan afectar al apoyo del túnel o a los esfuerzos sobre el revestimiento del mismo.

Los estudios hidrogeológicos y los modelos 3-D de flujo combinado con disolución pueden servir de orientación cualitativa pero casi nunca la información disponible es suficientemente concluyente. Aunque los flujos subterráneos y sus características hidroquímicas son muy difíciles de definir, al menos debe intentarse localizar las zonas de posible alimentación de agua fresca al sustrato salino como fallas, vaguadas, terrazas potentes, etc.

Las fallas pueden tratarse mediante inyecciones desde superficie o desde el propio túnel, procurando reducir su permeabilidad o formar barreras al flujo vertical. Las zonas de infiltración pueden sellarse mediante membranas impermeables, soleras de hormigón, losas enterradas formadas por medio de inyecciones o jet-grouting, etc.

El proyecto debe incluir soluciones o dispositivos para eliminar el flujo longitudinal por el trasdós del túnel, desconfiando de rellenos o inyecciones de contacto.

Debe intentarse una tramificación del futuro túnel respecto a los riesgos de disolución, agresividad o hinchamiento a partir de la información geológica e hidrogeológica. En función de dichos riesgos, y de manera conservadora, deben diseñarse las secciones estructurales correspondientes. En este sentido es necesario o conveniente:

- Asegurar el buen comportamiento de la sección estructural aunque se pierda la reacción del terreno en un porcentaje importante del contorno. Evidentemente siempre es posible construir un revestimiento suficientemente grueso y armado para esta situación.
- Calcular la sección para la hipótesis de lixiviado descendente.
- Ante el riesgo de un karst próximo, no detectado, o una degradación del terreno bajo el túnel, diseñar el revestimiento como un conjunto de tramos articulados, de longitud suficiente para puentear las zonas débiles. Esto exige una estimación del posible vano, preferentemente a partir de datos estadísticos de huecos, anchos de fallas, etc. Desgraciadamente en muchos casos hay que actuar a ojo. Pueden considerarse razonables en yesos vanos de 3 a 10 m.
- En zonas débiles de gran extensión, cruce de dolinas, etc., garantizar el apoyo del túnel, mediante una cimentación profunda ejecutada desde la propia excavación (fig. 43). Puede recurrirse a pilotes encepados por la propia solera o contra-bóveda. La longitud de los pilotes debe ser tal que su zona resistente quede en una zona no afectable por la karstificación, con lo cual variará a lo largo del trazado. En la fig. 44 se muestra la armadura en fibra de vidrio de los pilotes colocados en el extremo lado Ontígola del Túnel de El Regajal.

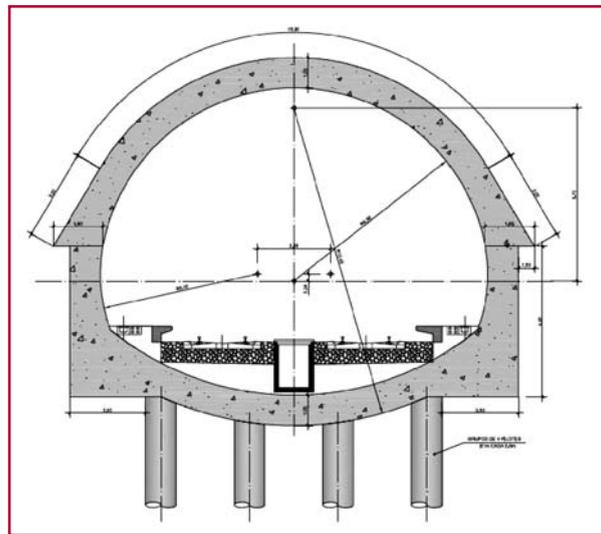


Fig. 43. Sección pilotada.



Fig. 44. Armaduras de fibra de vidrio para pilotes en El Regajal.

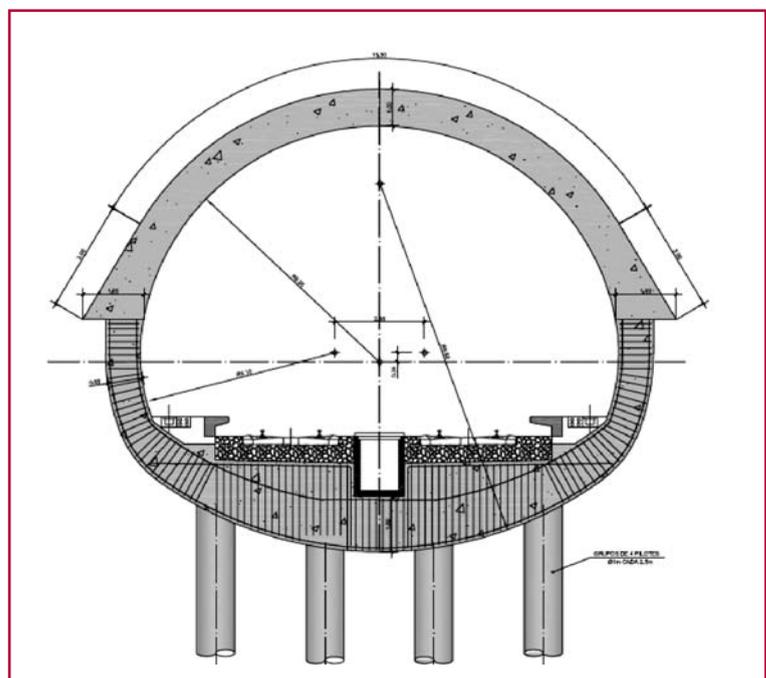


Fig. 45. Sección para riesgo de disolución o expansividad

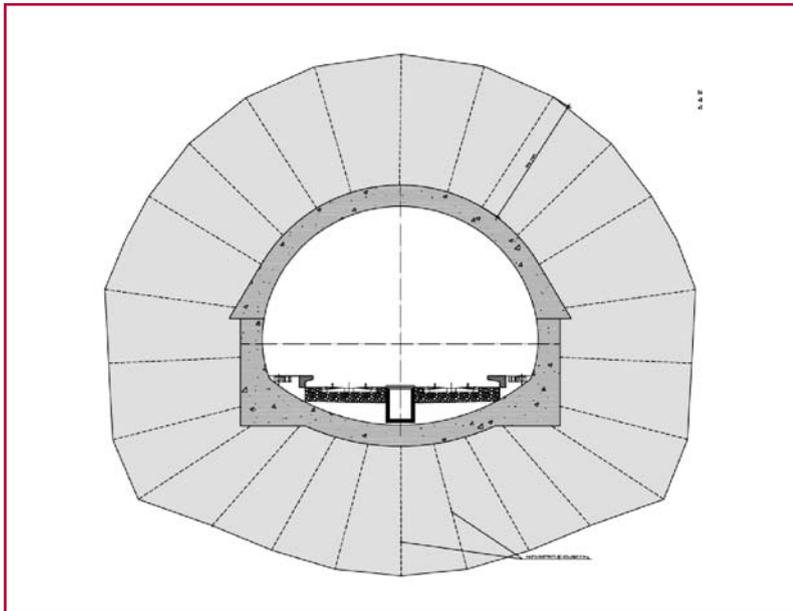


Fig. 46. Aureola de inyecciones para tratamiento de zonas permeables.

— En algunos casos la presencia de halita y anhídrita hace posibles fenómenos de disolución y de expansión por lo que deben preverse secciones pilotadas para el primer fenómeno y una sección estructural muy robusta frente al segundo (fig. 45). Lógicamente los pilotes deben empotrar por debajo de la eventual “zona activa” de cambios de volumen.

6. Tratamientos y soluciones especiales

a) Inyecciones

Es frecuente la realización de inyecciones para sellar zonas de falla o de alta permeabilidad para cortar el eventual flujo vertical de agua fresca que podía disolver sales en profundidad. Con poca cobertera es preferible inyectar desde superficie antes del paso del túnel. En caso contrario hay que recurrir a inyecciones radiales desde el propio túnel (fig. 46).

El principal problema es la elección del producto a inyectar ya que quedan excluidas las lechadas acuosas aunque pueden utilizarse morteros de cemento para el relleno de cavidades. Se han probado diversos productos como

- Resinas acrílicas
- Resinas de poliuretano
- Sílice coloidal

En principio parecen más idóneas las resinas acrílicas en razón de su mejor penetración (baja viscosidad) y menores pérdidas por dilución frente a las burbujas que deja el poliuretano que pueden servir de camino al agua o la dilución y sinéresis del gel de sílice.

Existe alguna referencia del empleo de inyecciones asfálticas en caliente para sellados de trasdós y rellenos de fisuras abiertas.

b) Intercepción de flujos

Ya hemos comentado (Apdo. 4.2) los anillos o collarines interceptores del flujo longitudinal.

En los casos de no poder garantizar la estanqueidad del propio revestimiento es necesario recurrir a un segundo revestimiento, hormigonado interiormente, colocando entre ambos una lámina impermeable, sin salida drenante. (fig.47).

c) Inyecciones de recalce o de compensación de asientos

Constituye una medida preventiva, a largo plazo, para el caso de que se detecten asientos indicativos de algún fenómeno de disolución en el entorno del túnel.

Para poder corregir tales asientos pueden realizarse, a través de la contrabóveda y base de hastiales unas perforaciones registrables que llegan hasta el te-

Fig. 47. Lámina de impermeabilización entre el sostenimiento y el revestimiento.



rreno de apoyo (fig. 48). A través de estos traladros pueden inyectarse productos no acuosos con las presiones adecuadas para producir un efecto nivelador.

d) Desvío del frente de lixiviación

Dado el interés por evitar que el frente de lixiviado alcance la base del túnel cabe pensar un dispositivo de deflectores o "aleros" laterales para alejar la disolución de los hastiales y mantener un anillo protector de terreno original inalterado (fig. 49).

La ejecución de dichos alerones puede hacerse con un sistema de serrado semejante al que se emplea en el sistema Premill para sostenimientos al avance. Sin embargo esta solución presupone un flujo predominantemente vertical.

7. Auscultación

Cuando se utilizan métodos convencionales suele seguirse la práctica habitual de medida de convergencias pero este control es poco indicativo cuando se construye un revestimiento robusto definitivo.

También son interesantes los extensómetros de varillas para evaluar la amplitud de la zona decomprimida o plastificada en torno al túnel y los piezómetros de cuerda vibrante (PZ) para evaluar la evolución de las tensiones intersticiales. Normalmente los extensómetros de solera no pueden colocarse hasta la fase definitiva.

Una vez colocado el revestimiento es interesante la posible generación de presiones de hinchamiento en la base de la contrabóveda y arranque de hastiales, lo cual puede controlarse mediante células de presión total (CP).

Para detectar la zona que puede sufrir hinchamientos o levantamientos en la base del túnel pueden colocarse extensómetros o micrómetros deslizantes (MD). En esta fase es conveniente controlar los desplazamientos verticales del revestimiento mediante puntos de nivelación en clave y hastiales.

Frecuentemente se disponen numerosos densímetros o extensímetros (ECV) adheridos a armaduras, los cuales suelen dar resultados poco fiables.

En la fig. 50 se muestra una sección típica de auscultación intensiva.

En terrenos salinos es muy interesante controlar los eventuales progresos de los fenómenos de disolu-

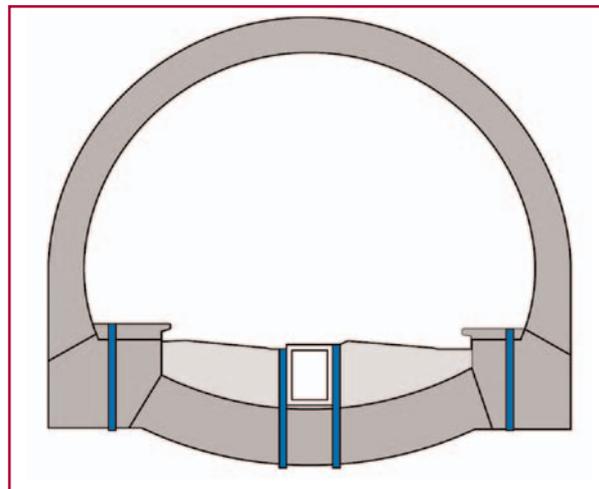


Fig. 48. Taladros para eventuales inyecciones bajo contrabóveda.

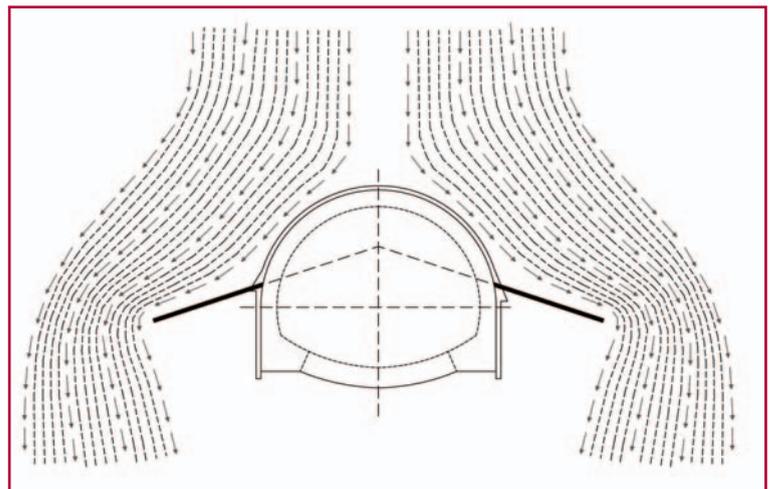


Fig. 49. Alerones para desviar el flujo descendente.

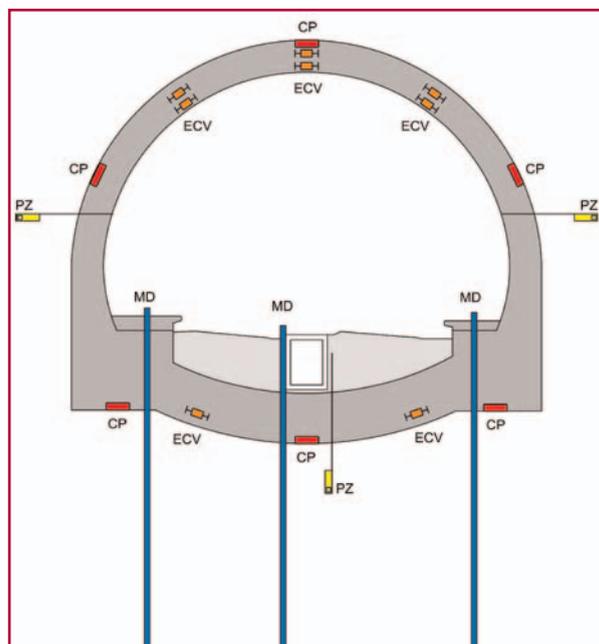
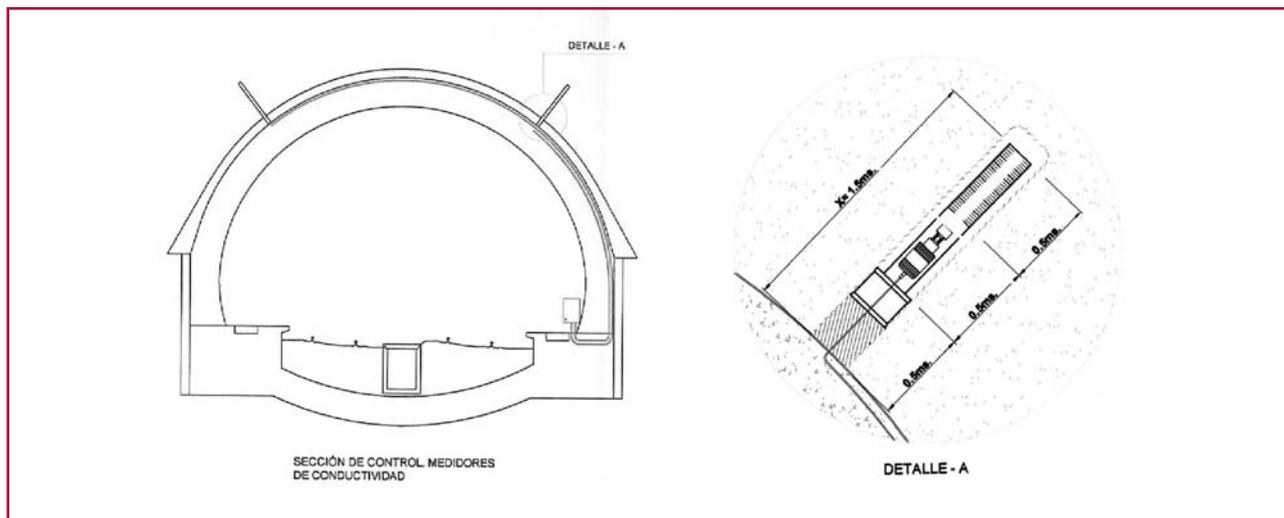


Fig. 50. Sección de auscultación intensiva.

Fig. 51.
Medidores
inductivos de
resistividad.



ción a largo plazo, lo cual puede conseguirse con medidores de conductividad (fig. 50) de tipo inductivo, con durabilidad asegurada. El seguimiento de estos aparatos puede permitir la adopción de medidas correctoras y preventivas, las cuales deben estar definidas en un Plan de Seguimiento y Auscultación.

8. Agradecimiento

Los autores agradecen a la Dirección de la Línea de Alta Velocidad de Levante (ADIF) y a la Directora de Obra del Túnel de El Regajal, D^a Violeta González Aleñar, la autorización para utilizar documentación relacionada con dicha obra. ♦

Referencias:

- (1) ORTÍ CABO, F. "Sur les conditions de dépôt, la diagènese et la structure des évaporites dans l'Est de l'Espagne". *Sciences de la Terre*, 1982-83, vol. 25, n^o 2, p. 179-199.
- (2) KIRSCHKE, D.; KOVARI, K.; PROMMERSBERGER, G. "Bemessungsgrundlagen und Konstruktion der Sohle des Freudensteintunnels". *Ingenieurbauwerke, DB Neubaustrecke Mannheim-Stuttgart*, 1991, n^o 7 (12/91).
- (3) STEINER, W. "Swelling rock in tunnels: rock characterisation, effect of horizontal stresses and construction procedures". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1993, vol. 30, n^o 4, p. 361-380.
- (4) AMSTAD, C.; KOVÁRI, K. *Untertagbau in quellfähigem Fels*. Zürich: Eidgenössisches Department für Umwelt Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK) & Bundesamt für Strassen (ASTRA), 2001.
- (5) ALONSO, E.; BERDUGO, I.R. "Degradation and swelling of sulphate-bearing claystones". *Proc. VI Congreso Sur Americano de Mecánica de Rocas*. 2006, Cartagena de Indias. (Montero & Colmenares eds.), p. 211-248.
- (6) WITTKÉ, M. *Begrenzung der Quelldrücke durch Selbstabdichtung beim Tunnelbau im anhydritführenden Gebirge*. Essen: Verlag Glückauf GmbH, 2003. 112 p. (Geotechnik in Forschung und Praxis WBI-Print 13). (ISBN: 3-7739-1313-3).
- (7) PETRUKHIN, V.P. *Construction of structures on saline soils*. Rotterdam: A.A. Balkema, 1993. 255

- p. (Russian Translation Series, 101). (ISBN: 9789054102137).
- (8) GOLFFIER, F. (et al.) "On the ability of a Darcyscale model to capture wormhole formation during the dissolution of a porous medium". *The Journal of Fluid Mechanics*, 2002, vol. 457, p. 213-254.
- (9) VIDAL PARDAL, M. "Revestimiento de túnel para canal en terrenos de yesos". *Revista de Obras Públicas*, 1944, vol. 92, n^o 2752, p. 422-424.
- (10) BACHARACH, W. "Tunnelabschnitte im anhydritführenden Gipskeuper - vorgesehene Ausbauprinzipien im Project Stuttgart 21". *Geotechnik*, 2007, n^o 4, p. 231-239.
- (11) SKALNY, J.; MARCHAND, J.; ODLER, I. *Sulfate attack on concrete*. London: Spon Press, 2002. 217 p. (Modern Concrete Technology, 10). (ISBN: 0-419-24550-2).
- (12) KOVARI, K.; AMSTAD, CH.; ANAGNOSTOU, G. "Tunneling in swelling rocks". *Key Questions in Rock Mechanics: Proceedings of the 29th US Symposium on Rock Mechanics, June 13-15, 1988*, Minneapolis, MN (Eds. Cundall, P. A.; Starfield, A. M.; Sterling, R. L.). Rotterdam; Brookfield: A.A. Balkema, 1988. p. 17-32. (ISBN: 9061918359).
- (13) WITTKÉ, W. (ed.) *Stability analysis for tunnels, Fundamentals*. Essen: Verlag Glückauf GmbH, 1999. 415 p. (Geotechnik in Forschung und Praxis WBI-Print 4). (ISBN: 3-7739-1324-9).
- (14) RODRÍGUEZ ORTIZ, J. M^o; VARONA, P.; VELASCO, P. "Modelling of anhydrite swelling with FLAC". *FLAC and Numerical Modeling in Geomechanics 2003: Proceedings of the 3rd Interna-*

- tional FLAC Symposium, Sudbury, Ontario, Canada, October 2003*. Lisse: Balkema, 2003, p. 55-62. (ISBN: 9789058095817).
- (15) ADIF. *Proyecto de construcción de plataforma del Nuevo Acceso Ferroviario de Alta Velocidad de Levante. Madrid-Castilla La Mancha-Comunidad Valenciana-Región de Murcia. Tramo: Aranjuez-Ontígola*. Madrid: SENER, 2007.
- (16) GONZÁLEZ ALEÑAR, V. "El túnel del Regajal. Procedimientos constructivos aplicados". *Revista de Obras Públicas*, 2011, junio, vol. 3,522, p. 55-74.
- (17) HUGHES, M.; BONAPACE, P.; RIGBEY, S.; CHARALAMBU, H. "An innovative approach to tunnelling in the swelling Queenston formation of Southern Ontario". *Rapid Excavation and Tunneling Conference*, 2007, p. 901-912. (ISBN: 978-0-87335-256-7).
- (18) TRABADA, J. *Diseño y nuevos desarrollos a incorporar en la fabricación de tuneladoras de gran diámetro para excavaciones urbanas en suelos blandos con yesos y yesos masivos*. Tesis doctoral. Madrid: Univ. Politécnica de Madrid, 2003.
- (19) JOHNSON, M. "Copenhagen Metro, segmental tunnel lining durability strategy and the supervision thereof". (Re)claiming the underground space: *Proceedings of the ITA World Tunneling Congress, 12-17 April 2003, Amsterdam*. (Edited by J. Saveur). Lisse: A.A. Balkema, 2003. p. 1097-1102. (ISBN: 90-5809-542-8).
- (20) MARENJI, YA.I. *Tunnels with in-situ pressed concrete lining*. Rotterdam: A.A. Balkema, 1993. 242 p. (Serie Geotechnika n^o 9.) (ISBN: 90-5410-141-5).