



Universidad de Oviedo

Máster en Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica

TRABAJO FIN DE MÁSTER



**PROBLEMAS GEOTÉCNICOS EN PERFORACIÓN DE TÚNELES
DERIVADOS DE LA PRESENCIA DE ANHIDRITA**

Alberto García Pérez

Julio de 2017

Agradecimientos:

Me gustaría agradecer a mi tutor de Trabajo de Fin de Master, Carlos López Fernández, su disponibilidad inmediata tanto a la hora de resolver dudas como para realizar correcciones. A pesar de tener que realizar este trabajo a distancia, me he sentido apoyado y guiado por él en todo momento.

Asimismo, quiero mostrar mi agradecimiento a las autoras Carmen Ródenas de Miguel (Directora de obras de INECO), Luisa Peña Fernández (Directora de obra de ADIF), por enviarme información sobre el Túnel de Albertia, y a Violeta Gonzalez Aleñar (Directora de Obras. Jefa de infraestructuras L.A.V. Centro) por el Túnel de Regajal

Finalmente, quiero agradecer a Alberto Gracia, Miguel Ángel Pérez, y Jesús Miguel Rico, de Consultores Técnicos Asociados S.A., la confianza que están depositando en mí, dándome la oportunidad de trabajar, formarme como geólogo, y de seguir aprendiendo a su lado.

Muchas gracias a todos.

Índice:

Resumen/Abstract:	4
1. Introducción;	6
1.1 Excavaciones subterráneas en anhidritas.	9
1.2 Túneles excavados en anhidritas en España.....	12
2. Metodología:	14
3. Estudio de túneles:	15
3.1. Túnel de Lilla	15
3.2. Túnel de Regajal.....	24
3.3. Túnel de Fabares.....	35
3.4 Túnel de Albertia	40
4. Problemática geotécnica derivada de la presencia de anhidrita:.....	50
5. Soluciones técnicas ante la presencia de anhidrita:.....	52
5.1. Sistemas de excavación.....	52
5.2. Impermeabilización del túnel	52
5.3. Sostenimiento-revestimiento	53
6. Protocolo de estudio geológico-geotécnico de un túnel con anhidrita:	56
6.1. Mineralogía	56
6.2. Agua subterránea	57
6.3 Bases de diseño y construcción.	58
6.4 Auscultación.....	59
7. Conclusiones:	62
8. Bibliografía:	64

Resumen:

La anhidrita es un mineral anhidro que puede aumentar su volumen hasta un 62 % en contacto con el agua. La presencia de minerales expansivos como la anhidrita, pueden generar graves daños en las estructuras de los túneles, que pueden manifestarse durante la perforación o evidenciarse al cabo de años, cuando la infraestructura está en servicio. Las soluciones técnicas necesarias para resolver los citados daños estructurales suelen acarrear importantes costes económicos.

En este trabajo se analiza la problemática relacionada con la ejecución de excavaciones subterráneas en este tipo de materiales en España, donde este mineral aflora en buena parte del territorio. Para ello, se ha abordado el análisis de varios túneles y elaborado una síntesis que recoge todos los aspectos fundamentales de los sistemas de excavación, la problemática derivada de la presencia de anhidrita, las soluciones técnicas adoptadas, etc. A partir de éste, se ha desarrollado un protocolo de estudio que incluye, asimismo, las soluciones técnicas a adoptar y los sistemas de auscultación más idóneos para las diferentes fases de la obra.

Los resultados obtenidos confirman la importancia de realizar una exhaustiva campaña de investigación geológica e hidrogeológica, apoyada en estudios químicos y mineralógicos, tanto del terreno como de las aguas subterráneas. Entre las soluciones constructivas más efectivas destaca la realización de secciones circulares de excavación y el empleo de sistemas de sostenimiento/revestimiento rígidos y altamente impermeabilizados.

Abstract:

Anhydrite is an anhydrous mineral that can increase its volume up to 62% on contact with water. The presence of expansive minerals can generate serious damage to tunnel structures, which may manifest during excavation or become apparent over time, when the infrastructure is in service.

This paper analyses the problems related to the execution of underground excavations in this type of materials in Spain, where this mineral appears in much of the territory. To this end, several tunnels have been analysed and a synthesis has been elaborated. This synthesis includes all the fundamental aspects of the excavation systems, problems derived from the presence of anhydrite, the technical solutions adopted, etc. From this one, a study protocol has been developed, which includes the technical solutions to be adopted and the best auscultation systems for the different phases of the work.

The results confirm the importance of doing an exhaustive geological and hydrogeological research campaign, supported by chemical and mineralogical studies, both on the ground and in the groundwater. Among the most effective constructive solutions is the realization of circular excavation and the use of rigid and highly waterproofed support systems.

1. Introducción.

Este manuscrito representa el Trabajo Fin de Máster de Alberto García Pérez dentro del Máster Universitario Oficial en Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica de la Universidad de Oviedo. En el mismo se analizan distintos casos de túneles en España que han presentado problemas geotécnicos provocados por la presencia de anhidrita. A partir de esta valoración, este trabajo se ha planteado como objetivo la elaboración de un protocolo de estudio geológico – geotécnico específico para excavaciones subterráneas realizadas en presencia de este mineral, y la propuesta de las recomendaciones técnicas estándar a adoptar en este tipo de excavaciones.

La anhidrita es un mineral cuya composición química es sulfato cálcico anhidro (CaSO_4) que, en presencia de agua, puede transformarse en yeso ($\text{CaSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$). Este proceso implica una disolución y una cristalización posterior (Rauh et al., 2006), que conlleva un importante incremento de volumen (Fig. 1.1). Este hecho puede provocar en excavaciones subterráneas un incremento de la presión ejercida por el terreno sobre el sostenimiento de las perforaciones.

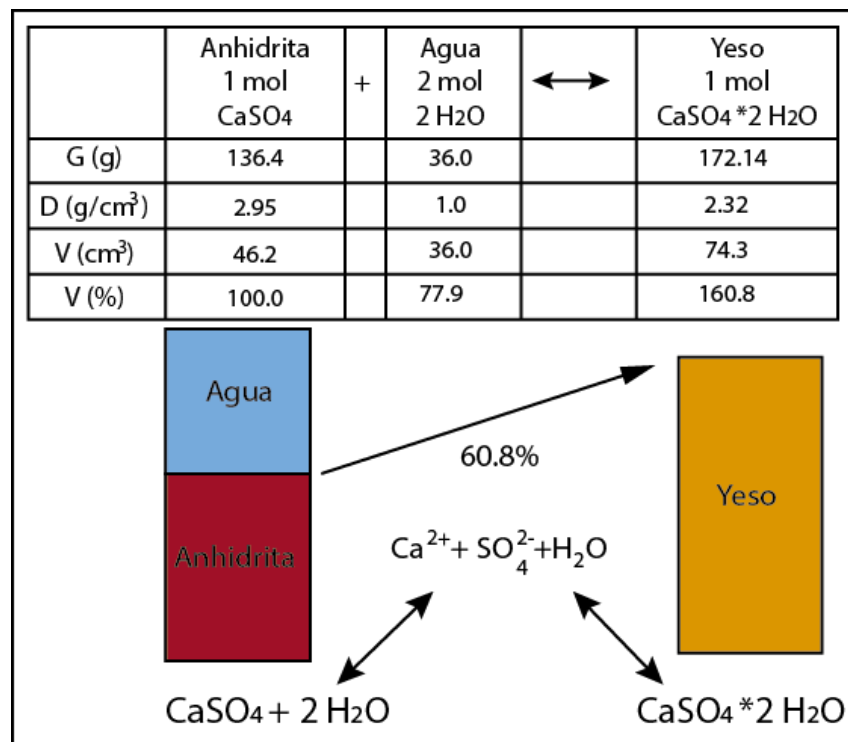


Figura 1.1. Cambios químicos ocasionados por la transformación de anhidrita en yeso.

Tomado de Campo et al. (2012).

La anhidrita se presenta principalmente en rocas sedimentarias, ya sea en agregados cristalinos, en forma de nódulos en el seno de capas de arcillas, yesos o halitas, o bien, en forma de capas masivas interestratificadas, normalmente entre materiales arcillosos (Campo et al.,2012). Además, puede aparecer en forma de relleno de fisuras en rocas más competentes, representando un volumen muy pequeño del macizo rocoso.

Según se ha podido constatar en estudios de campo y de laboratorio por diversos autores, el proceso de hidratación de la anhidrita puede llegar a prolongarse durante varios años, por lo que sus consecuencias en las excavaciones subterráneas pueden evidenciarse a medio y largo plazo, a menudo cuando las obras están ya finalizadas o en servicio.

Actualmente son dos las interpretaciones más aceptadas para explicar la conversión de la anhidrita en yeso.

La interpretación clásica, defendida por autores como Einfalt (1975, 1979), Einfalt&Götz (1976), Esteban (1990), Steiner (1993), Amstad&Kovari (2001), entre otros, se fundamenta en el análisis de la transformación anhidrita - yeso como una reacción química reversible, principalmente condicionada por la temperatura, la presión de confinamiento, la concentración de sales en el agua y la naturaleza “abierta” o “cerrada” del medio. Según esta teoría, el incremento de volumen teórico tras la transformación sería del orden del 60 al 63 %, siempre y cuando la porosidad sea nula y el material se encuentre expuesto a agua pura. Otros autores (Madsen&Nüesch, 1990, 1991; Madsen et al.,1995; Nüesch et al., 1995 y Nüesch&Ko, 2000), a partir de ensayos de expansión de muestras, indican que para maximizar los efectos de expansión es necesario cierto contenido en arcillas.

La segunda interpretación, apoyada en estudios más recientes, sostiene que la incorporación directa de agua en la red cristalina de la anhidrita (red ortorómbica) para dar lugar a la del yeso (red monoclinica) no parece probable, dado que la magnitud de la deformación superaría la capacidad de distorsión elástica de la red ortorómbica (Deu Lozano, 2008). Orti (1977) considera que estos minerales crecen de forma isovolumétrica, disolviéndose la anhidrita a medida que precipita yeso secundario, transportándose los excedentes de sulfato cálcico (60-63%) como solución acuosa o precipitando en las posibles fracturas de la roca en forma de yeso fibroso. Asimismo, Pina et al. (2000) afirman que la anhidrita no puede generar cambios volumétricos cuando se expone a agua rica en sulfatos, dado que el yeso generaría una película que protegería la anhidrita. Por tanto, esta teoría

considera que el incremento del volumen del terreno se produce por la precipitación de este mineral en fisuras y huecos.

Alonso y Alcoverro (2004), a partir de las observaciones realizadas en laboratorio, destacan la importancia del estado de degradación en los procesos expansivos, que se define como la pérdida de resistencia, cambios de volumen, disminución de rigidez o pérdida de la continuidad de la masa que sufre el material ante ciertas condiciones atmosféricas o al entrar en contacto con el agua.

Berdugo (2007) y Alonso et al. (2007) apuntan a la existencia de varios mecanismos capaces de producir los aumentos de volumen detectados en las rocas arcillosas sulfatadas; el primero de ellos sería la precipitación de minerales sulfatados en las fisuras como consecuencia de cambios de temperatura en presencia de aguas ricas en sulfatos; otro mecanismo sería el crecimiento de minerales sulfatados en las fisuras debido a la evaporación de soluciones acuosas; y el último mecanismo serían los fenómenos osmóticos e intercambios catiónicos en la fracción arcillosa en presencia de aguas ricas en sulfatos.

La temperatura y humedad relativa existentes en la excavación y en la denominada zona activa (volumen finito de roca sujeto a condiciones variables de succión; Alonso et al., 2007) también influyen en los procesos de cambio de volumen. Deu Lozano (2008) apunta al papel fundamental del quimismo y flujo del agua en estos procesos. En la figura 1.2 se ilustra este hecho, tomando como caso de ejemplo el caso del túnel de Lilla.

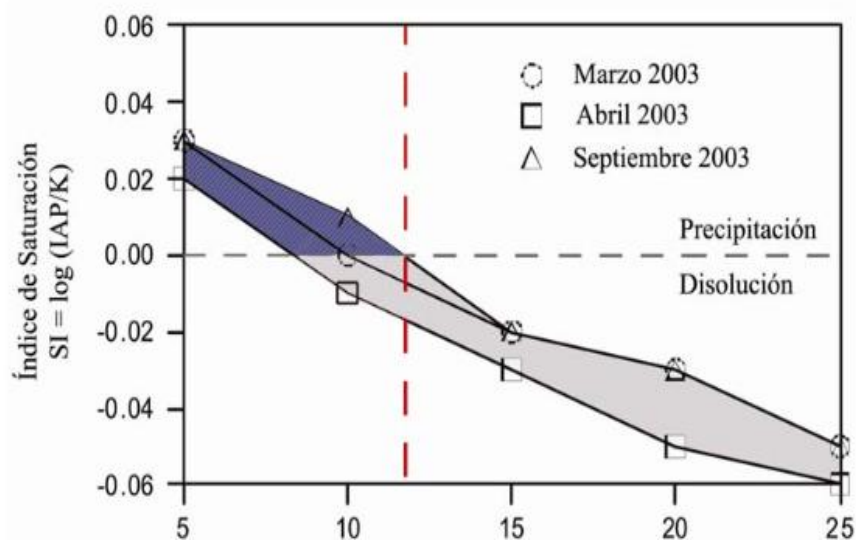


Figura 1.2. Condiciones de saturación de yeso en el túnel de Lilla en función de la temperatura. Tomado de Deu Lozano (2008).

Actualmente, el mejor sistema para modelizar el comportamiento de excavaciones en presencia de anhidrita requiere la realización de ensayos de campo y laboratorio que permitan reproducir las condiciones reales, revelándose la realización de galerías con secciones monitorizadas como la mejor técnica. En laboratorio son los ensayos de presión de hinchamiento y el de inundación bajo carga constante, mediante el método Huder-Amberg, los que mejor permiten cuantificar los cambios de volumen del terreno, si bien resulta complicado emular el factor tiempo (Deu Lozano, 2008).

Mediante estas técnicas, por ejemplo, se han llegado a medir presiones de hinchamiento muy elevadas, como es el caso del túnel de Chamoise (Francia), donde el ensayo de muestras en laboratorio permitió mediar una presión de 8 MPa.

Cabe recordar, además, que la presencia de anhidrita puede plantear otros problemas de índole geotécnica, si bien no son objeto de estudio de este trabajo: procesos de karstificación, fenómenos de colapsabilidad (frecuentes en suelos con matriz salina o yesífera), presencia de gases sulfhídricos y/o anhídricos (que se acumulan en zonas porosas y huecos kársticos), deshidratación de yesos en excavaciones mecanizadas (como consecuencia del calor generado en la excavación, dando lugar a la aparición de hemiedrita), desprendimiento de techos planos (habitual en rocas salinas estratificadas o laminadas), etc.

1.1 Excavaciones subterráneas en anhidritas.

En España son diversos los ejemplos de daños ocasionados en túneles perforados tanto en rocas triásicas como en materiales terciarios. Generalmente, los problemas consisten en el levantamiento de la solera de las excavaciones y en la aparición de importantes convergencias entre hastiales. A menudo, estos problemas han llegado a afectar al revestimiento del propio túnel. Asimismo, en el resto de Europa, son numerosos los ejemplos de túneles excavados en minerales sulfatados triásicos que han presentado problemas reseñables (Tabla 1.1 y Figura 1.3). Destaca el caso del túnel de Wagenburg, donde se han medido presiones contra el sostenimiento de hasta 5,5 MPa.

Tabla 1.1. Ejemplos de valores de hinchamiento medidos en algunos túneles ejecutados en rocas arcillosas sulfatadas. Tomado de Campo et al. (2012)

Túnel	Presión máxima de hinchamiento (MPa)
Wagenburg ST (Alemania)	5.5
Lilla (España)	5.0
Belchen (Alemania)	4.5
Heslach II (Alemania)	3.5
Hauenstein (Alemania)	2.5

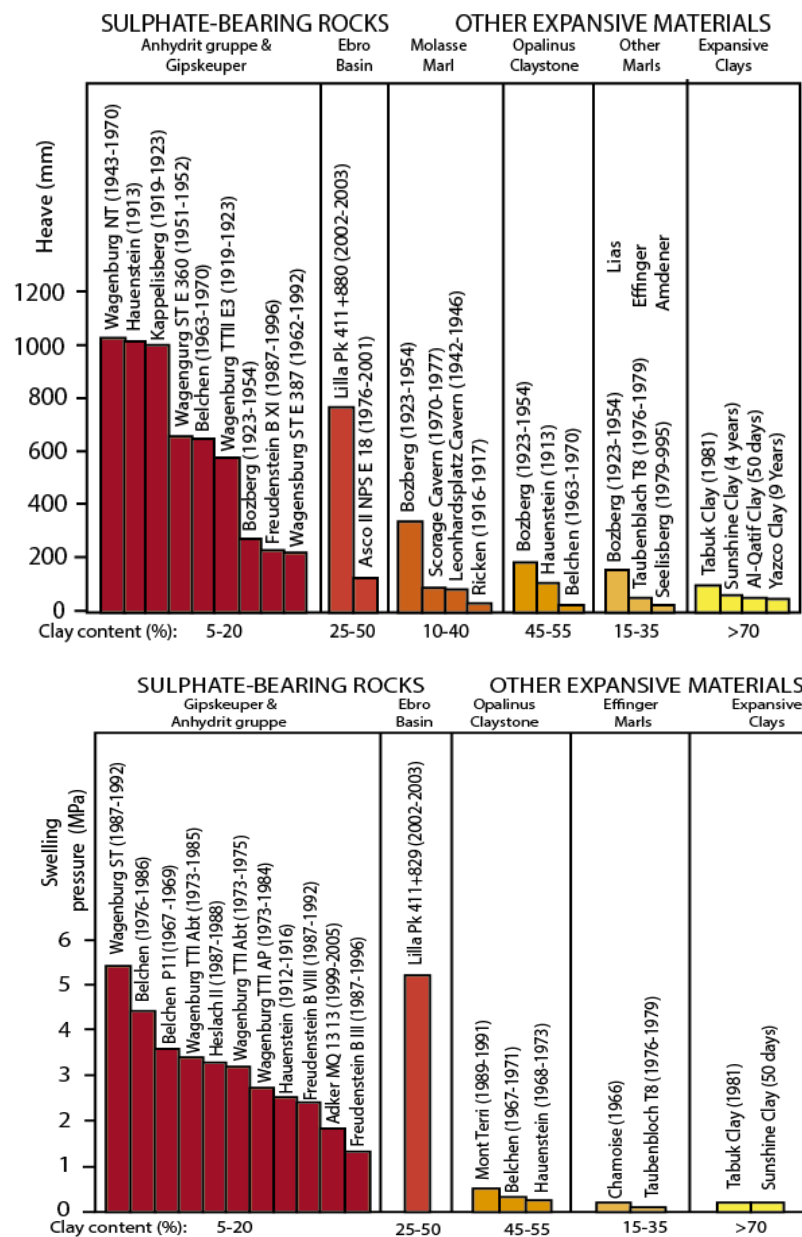


Figura 1.3. Ejemplos de levantamientos de túneles con fenómenos expansivos. Tomado de Alonso y Berdugo(2006).

En España las rocas salinas se localizan en tres dominios geológicos principales (Arlandi, 2011).

- Cuencas evaporíticas terciarias.
- Evaporitas en las Cordilleras Béticas.
- *Facies Keuper* del Triásico.

El primer dominio es el más relevante, manifestándose en gran parte del territorio español (Cuenca del Ebro, Cuenca del Tajo, Cuenca del Duero, Cuenca del Guadalquivir (Fig. 1.4). El origen de estas cuencas se sitúa principalmente en el Paleoceno, en relación a la Orogenia Alpina (García-Castellanos et al., 2003).

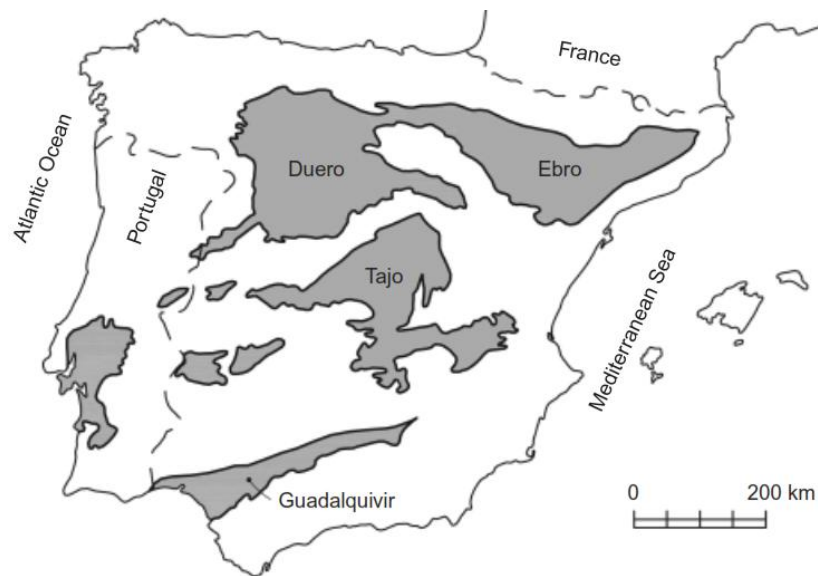


Figura 1.4. Localización de las cuencas terciarias con rocas salinas en la Península Ibérica. Tomado de Berdugo et al., (2007).

El principal sistema hidrográfico del norte de España es la Cuenca del Ebro. Se trata de una cuenca intraorogénica cuyo límite de cuenca se encuentra establecido por los Pirineos al Norte; la Cordillera Ibérica al Suroeste y la Cordillera Prelitoral al Sureste. De esta forma se generó una depresión entre relieves montañosos, desconectada del Mar Mediterráneo desde los inicios del Eoceno Superior, sometida a una intensa sedimentación marina por el noroeste hasta el Oligoceno, cuando queda desconectada también del Océano Atlántico y la sedimentación se convierte de tipo lacustre y régimen endorreico (Deu Lozano, 2008). Posteriormente, durante el Oligoceno y buena parte del Mioceno, se desarrollaron depósitos aluviales procedentes de la erosión de las laderas del Pirineo y la Cordillera Ibérica en los bordes de la cuenca; mientras que en la zona central se generaron lagunas someras

donde se depositaron calizas y margas en los periodos húmedos, y yesos y sales en los áridos (Anadón et al., 1989).

La Cuenca del Duero está limitada al Norte con la Cordillera Cantábrica, al Este con la Cordillera Ibérica y al Oeste y Sur con el Macizo Ibérico. Está formada por rocas terciarias de origen continental, con sedimentos fluviales en los bordes de la cuenca que pasan a lacustres hacia el interior.

Lo mismo sucede con la Cuenca del Tajo y del Guadalquivir, las cuales están divididas por parte del Macizo Ibérico (Sistema Central y Montes de Toledo) y por el Sistema Ibérico; y por el Macizo Ibérico al Norte, por la Cordillera Bética al Sur y al Oeste por el Golfo de Cádiz respectivamente.

Esta última cuenca ha estado invadida por el mar durante el Mioceno, Plioceno y parte del Cuaternario, de ahí que los sedimentos que la rellenan sean predominantemente marinos, margas y arcillas depositadas en un medio de aguas tranquilas. Por otra parte, también se encuentran materiales alóctonos, los cuales se han generado fuera de la cuenca, pero debido a movimientos tectónicos importantes, fueron emplazados dentro de ésta (Mayoral y Abad, 2008).

Por otro lado, los materiales evaporíticos de triásico (Keuper) suele aparecer en la geología española como nivel de despegue de los cabalgamientos que dan lugar a las cadenas montañosas de la península, como por ejemplo en la Zona Externa de las Cordillera Béticas.

1.2 Túneles excavados en anhidritas en España.

La ejecución de las diferentes vías de comunicación en España ha requerido la perforación de diferentes túneles en rocas salinas en los que se han documentado diversos problemas geotécnicos. En este trabajo han sido analizadas las siguientes excavaciones subterráneas (Fig. 1.2):

- Túnel de Lilla (Línea de Alta Velocidad ferroviaria Madrid-Barcelona, provincia de Lleida).
- Túnel de Regajal (Línea de Alta Velocidad ferroviaria Madrid-Valencia, provincia de Madrid).
- Túnel de Fabares (Autovía A-8, provincia de Asturias).
- Túnel de Albertia (Línea de Alta Velocidad ferroviaria Vitoria – Bilbao, provincia de Álava).



Figura 1.2 Localización de las zonas con mayor presencia de rocas salinas y situación de los túneles objeto de análisis en este trabajo. Modificado de Arlandi, (2011).

2. Metodología.

Este trabajo ha requerido una exhaustiva búsqueda bibliográfica relativa a las características de minerales que puedan sufrir un proceso de expansión al hidratarse, como es el caso de la anhidrita. Tras analizarlas distintas teorías de dichos procesos de expansión, seha procedido a analizar algunos de los túneles afectados por procesos de expansividad en relación a la presencia de este tipo deminerales, valorando en cada caso el sistema de excavación empleado, los problemas geotécnicos ocurridos y las soluciones técnicas adoptadas.

Este detallado análisis permitió elaborar una síntesis que recogiera todos los aspectos fundamentales de los sistemas de excavación, la problemática objeto de estudio, las soluciones técnicas, etc.

Por último, con toda la información, se elaboró un protocolo de estudio específico para excavaciones subterráneas en este tipo de materiales que incluye, asimismo, las soluciones técnicas estándar a adoptar.

3. Estudio de túneles.

3.1. Túnel de Lilla.

El túnel ferroviario de Lilla forma parte de la línea ferroviaria de alta velocidad que une Lleida con Barcelona, localizándose en la margen izquierda del río Francolí, al este de la localidad tarraconense de Vilaverd (Fig. 3.1). Esta perforación, cuya sección en forma de herradura, cuenta con un radio de bóveda de 6,76 m, alcanza una longitud de 2 km, con una pendiente máxima de 2,5 %. Ha sido excavado en materiales terciarios pertenecientes a la denominada Depresión del Ebro, situándose entre la Sierra de Miramar y el límite nor-oriental de la Sierra de Prades (Tauler et al., 2006).

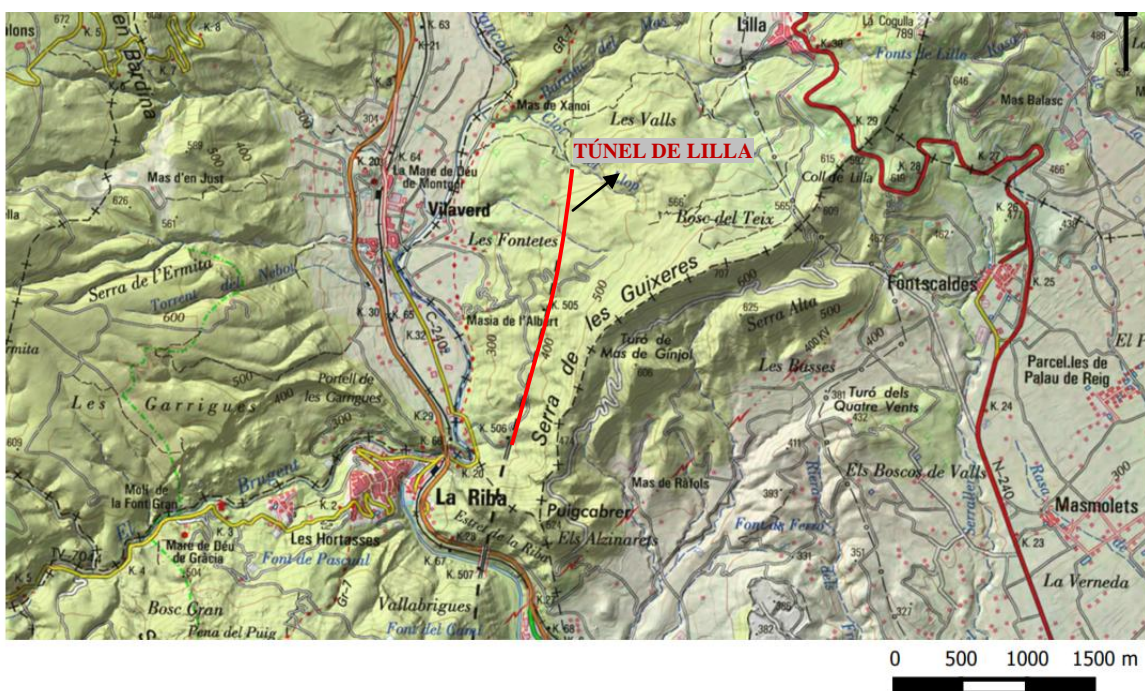


Figura 3.1. Situación geográfica del túnel de Lilla.

El túnel atraviesa el Complejo Ulldemolins (Fig. 3.2), que se caracteriza por una marcada heterogeneidad litológica. Principalmente perfora rocas arcillosas extremadamente compactas, dispuestas de forma subhorizontal, con pliegues muy laxos. Estos materiales contienen anhidrita, un sistema complejo de venas milimétricas y centimétricas de nódulos de yeso y yeso fibroso (Ramón y Alonso, 2008). A nivel local, el yeso alabastrino gris aparece en franjas subhorizontales en la roca matriz. Dicha matriz está formada por filosilicatos (illita y paligorskita), minerales ricos en calcio (anhidrita y dolomita) y, en menor medida, por cuarzo, tal y como se resume en la tabla 3.1. Las arcillas expansivas, como la esmectita, sólo se detectan en puntos aislados de la matriz (Alonso et al., 2007).

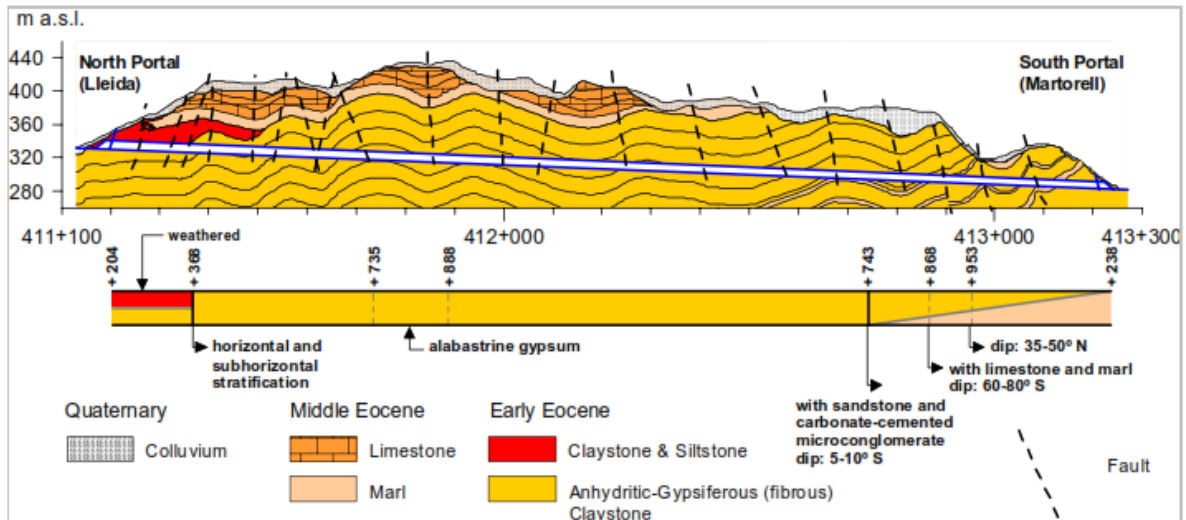


Figura 3.2. Perfil geológico del túnel de Lilla. Tomado de Plaza(2008).

Tabla 3.1 Composición y propiedades de la roca arcillosa de Lilla. Tomado de Alonso et al., (2004).

COMPOSICION MINERALÓGICA, CONTENIDORELATIVO	
Cuarzo	2 - 3
Dolina	11 - 13
Anhidrita	13 - 28
Yeso	0 - 7
Arcilla (Illita y Paligorskita)	51 - 67

PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS	
Gs. Peso específico sólidos (kg/m ³)	2,82 - 2,90
Contenido en agua (%)	0,50 – 4,50
Densidad total (Mg/m ³)	2,40 – 2,86
qu. Resistencia a la compresión simple	17,0 – 170,0

Posteriormente, algunos estudios revelaron que la humedad relativa impuesta por el agua del macizo era de entre 91 y el 93 % para el rango de temperaturas medidas en el agua (Alonso et al., 2006). Por otra parte, las mediciones de humedad relativa en el interior del túnel indicaban que ésta siempre era más reducida que la impuesta por el agua del macizo, por lo que el flujo de vapor de agua debía ser del terreno hacia el interior del túnel (Alonso et al., 2006).

3.1.1. Sistema de excavación.

El túnel se excavó mediante perforación y voladura desde ambos emboquilles, dividiendo la sección en avance y destroza. El sostenimiento primario consistió en hormigón proyectado y pernos de anclaje. En las zonas de menor calidad geomecánica se instalaron cerchas de acero (Alonso y Ramón, 2011).

El revestimiento se proyectó como una capa de hormigón en masa de 300 mm de espesor y 25 MPa de resistencia (Fig. 3.3). Finalizada la destroza se ejecutó una losa horizontal de hormigón en masa de 300 mm de espesor y 20 MPa de resistencia en la solera del túnel.

Presuponiendo una baja permeabilidad del macizo, la impermeabilización de la sección se restringió a los emboquilles, utilizando para ello una geomembrana sobre una lámina de PVC. En el resto del túnel, el agua filtrada era recogida por un colector de PVC de 500 mm de diámetro instalado a 1,4 m bajo la solera.

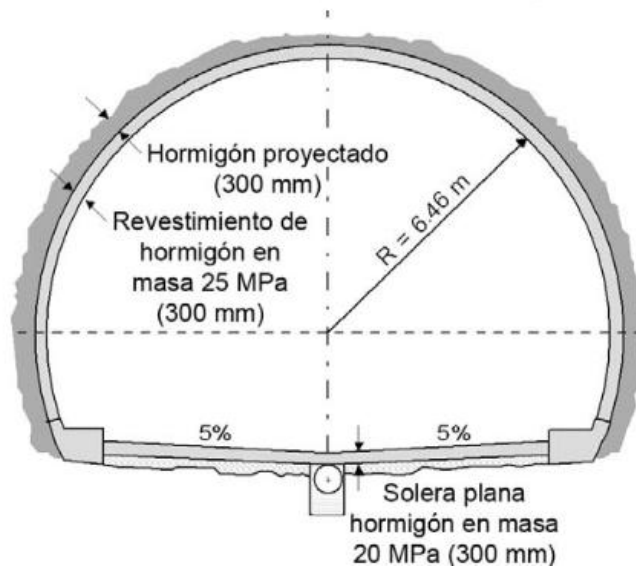


Figura 3.3. Sección tipo transversal original del túnel de Lilla. Tomado de Alonso y Ramón (2011).

3.1.2. Problemas geotécnicos.

En este túnel, poco después de su construcción, se detectaron levantamientos de la solera, que llegaron a alcanzar 80 cm, así como pequeñas deformaciones en la bóveda, que solamente se percibían en la zona sin revestir (Ramón y Alonso, 2004).

A partir de la observación de este fenómeno, se realizó una campaña de investigación *in situ* y de ensayos de laboratorio, entre diciembre de 2002 y junio de 2004, con el objetivo de determinar las posibles causas de las expansiones producidas y de acotar los valores de empuje que pudieran existir en el futuro.

A lo largo de esta campaña, mediante células de presión colocadas cada 25 metros, se midieron unas presiones de empuje del terreno de hasta 4,5 MPa en solera, y 2,5 MPa en la bóveda.

Además, las medidas de desplazamiento vertical, registradas por micrómetros deslizantes, indicaron que los hinchamientos se concentraban en un espesor de material de 4 a 5 m, denominada como “zona activa”. En todos los perfiles estudiados por Ramón y Alonso (2004), la zona activa se caracterizaba por la aparición de agujas de yeso neoformado en las superficies cizalladas abiertas al excavar el túnel y la presencia de agregados yesíferos neoformados en discontinuidades, relativamente confinadas.

Como se puede observar en la figura 3.4 los desplazamientos no fueron uniformes a lo largo del tiempo, ni a lo largo del túnel. Los mayores aumentos de volumen se produjeron en 2003, en un tramo de 800 m a partir del emboquille Norte, llegándose a medir un desplazamiento superior a 70 cm, con una velocidad vertical que oscilaba entre 1,2 y 2 mm/día (Ramón y Alonso, 2004), y observándose presiones radiales de hasta 4,5 MPa, a pesar de los desplazamientos producidos. Sin embargo en una longitud aproximada de 500 m, cercana al emboquille Sur no se observó ningún tipo de movimiento.

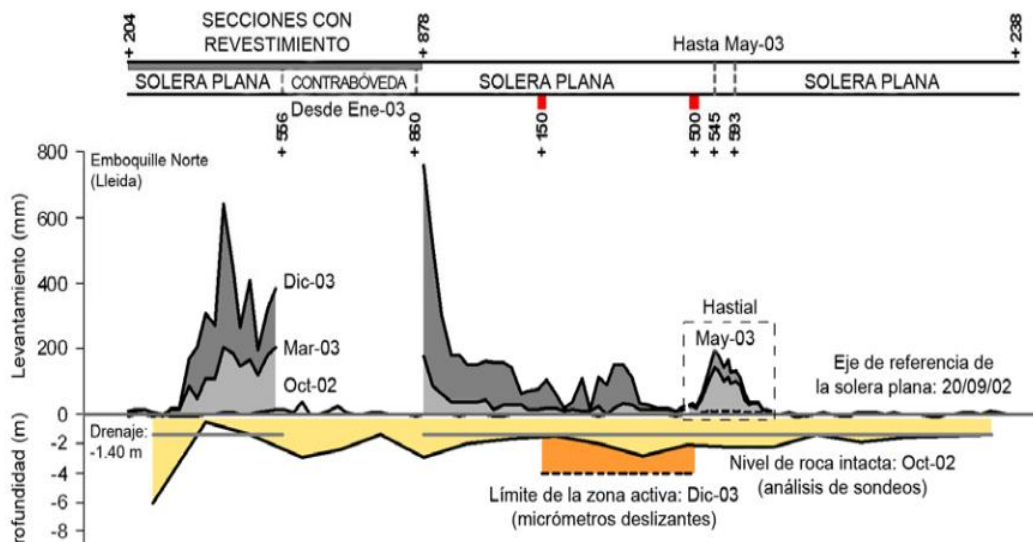


Figura 3.4. Medida del levantamiento de la losa, estimado longitudinalmente, entre octubre de 2002 y diciembre de 2003 y su relación con las condiciones de la roca en octubre de 2002 y la cota de la zona activa. Ramón y Alonso, (2004).

3.1.3. Soluciones técnicas adoptadas.

Tras la observación de estos fenómenos de hinchamiento, se decidió ejecutar la construcción de contrabóvedas en varias zonas del túnel y monitorizar su comportamiento.

A lo largo del túnel en general, el límite inferior de la zona activa en las secciones con solera plana estaba situado entre 3 y 4 m de profundidad, pudiendo variar incluso en una misma sección (Plaza, 2008)(Fig. 3.5).

Los datos obtenidos de los extensómetros colocados en las secciones con contrabóveda revelaron que el espesor verdaderamente activo era más reducido que el citado anteriormente y se situaba a profundidades de entre 2 y 4 m. La columna superior de terreno se comprimía bajo los esfuerzos de expansión generados a mayor profundidad a fin de mantener la condición vertical nula impuesta por la contrabóveda (Fig. 3.6).

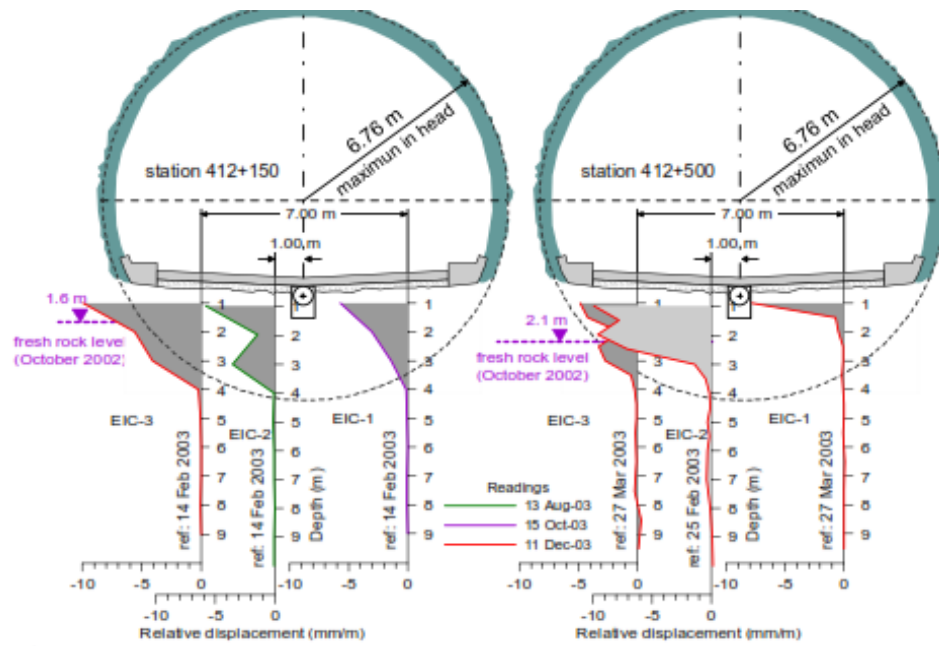


Figura 3.5. Perfiles verticales del levantamiento relativo en sección con solera plana. Tomado de Berdugo, (2007).

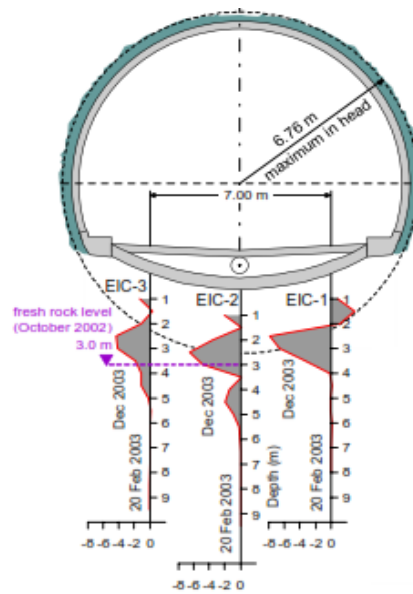


Figura 3.6. Perfiles verticales del levantamiento relativo en sección con sección de contrabóveda. Tomado de Berdugo, (2007).

A pesar de la mejora lograda en las secciones con contrabóveda, los hinchamientos continuaban siendo inasumibles para una línea ferroviaria de alta velocidad y el aumento de la presión radial tras el revestimiento no garantizaba la estabilidad estructural del túnel (Plaza, 2008). Por tanto, se decidió construir tres tipos de sección diferentes con geometría circular en distintos P.Ks. (P.K 412+545 - P.K 412+565; P.K 412+571 - P.K.412+581; P.K.412+583 - P.K.412+593) para analizar su comportamiento en el terreno y poder establecer la mejor solución.

El primer tramo se construyó con un sostenimiento rígido, el segundo con unsostenimiento flexible formado por “slots” (encajes flexibles entre bóveda y contrabóveda), y el tercero con un sostenimiento flexible a base de espuma de poliuretano (Fig. 3.7). Estas tres secciones se diseñaron para una presión radial de 3.0 MPa, correspondiente al máximo valor medido en el tramo con contrabóveda tras cuatro meses de observación (Berdugo, 2007).

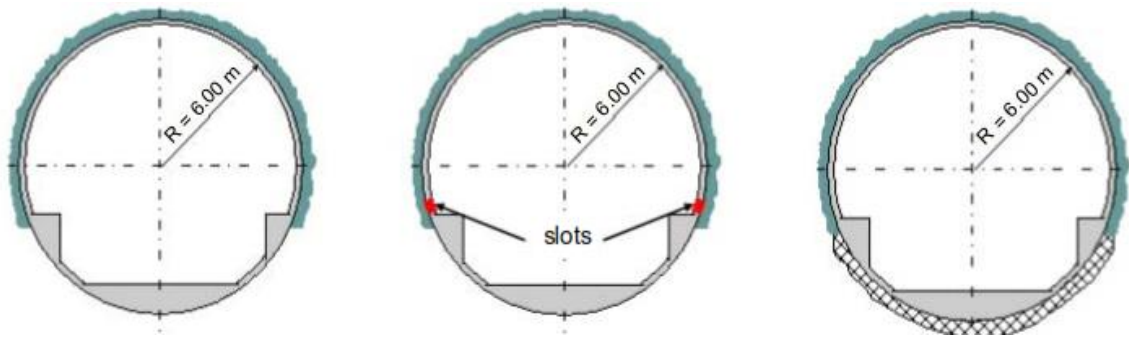


Figura 3.7. Tipos de sección circular utilizados en los tramos de prueba. Sección rígida(a); Sección con slots (b) y sección con espuma de poliuretano (c). Tomado de Berdugo (2007).

Estos tramos fueron equipados con diversos equipos de auscultación y, tras ser inundados, se observó como en el tramo con sostenimiento rígido las presiones radiales eran mucho mayores que en los tramos con sostenimiento flexible, mientras que la extensión de la zona activa en los tramos con sostenimiento flexible era mayor (Fig. 3.8).

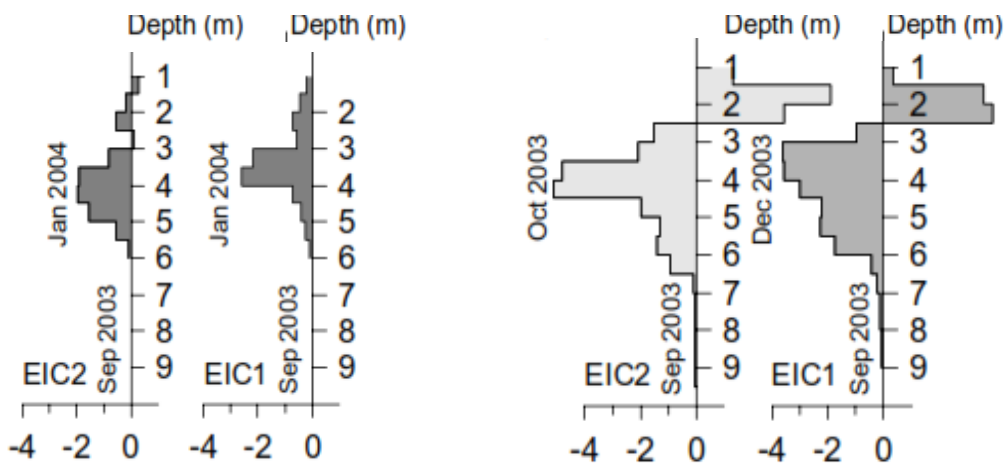


Figura 3.8. Perfiles de desplazamiento relativo en las secciones de prueba con sostenimiento rígido (a) y con sostenimiento flexible (b) del PK. 412+552. Tomado de Plaza (2008)

De los tres tramos de prueba con sección circular se estableció que la mejor opción era la de sostenimiento rígido, ya que, a pesar de haber registrado mayores tensiones radiales, la extensión de la zona activa era menor, lo que hizo suponer que a largo plazo los hinchamientos se atenuarían.

Para el dimensionamiento final del sostenimiento, debido a que se trataba de un túnel de ferrocarril de alta velocidad y a la magnitud e intensidad de los levantamientos y tensiones medidas, se optó por una solución conservadora, construyéndolo así para presiones de 4,5 MPa en la contrabóveda y 2,5 MPa en la bóveda (Marí y Pérez, 2003; Alonso y Berdugo, 2005).

La construcción de esta nueva sección (Fig. 3.9) se dividió en dos fases principales:

- La excavación y construcción de la contrabóveda.
- El revestimiento de la bóveda.

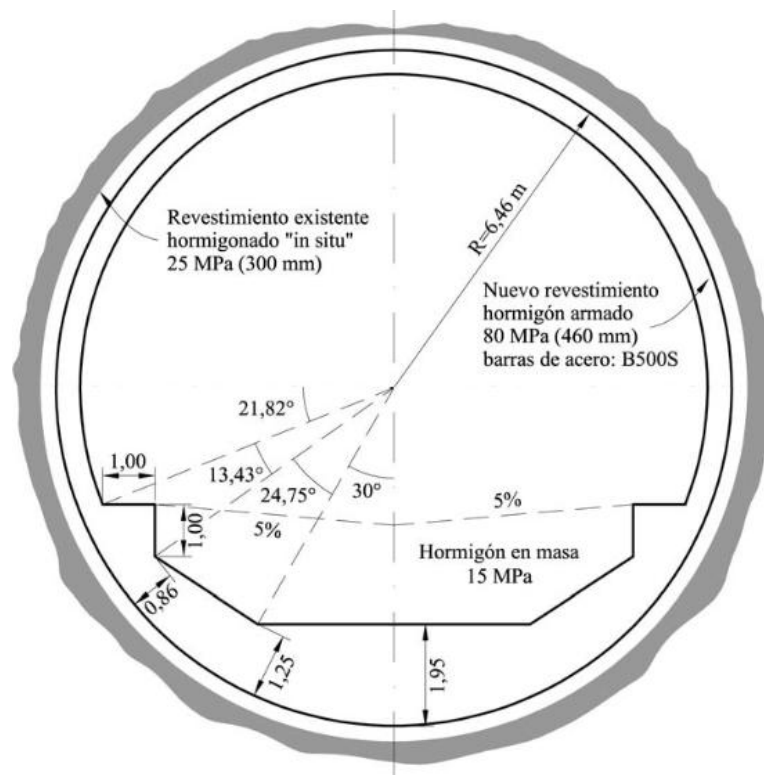


Figura 3.9. Sostenimiento rígido adoptado para el refuerzo del túnel de Lilla. Tomado de Mari y Pérez (2003).

Para la primera fase, debido a la existencia de la solera plana original a lo largo de gran parte del túnel, así como de tramos con secciones con contrabóvedas, fue necesario garantizar la estabilidad de los sostenimientos y revestimientos existentes, antes de demoler la solera del túnel, mediante la instalación de pernos en los hastiales. Una vez anclados los hastiales, se demolió la solera del túnel. Además, para minimizar el deterioro de la roca debido a la excavación, la sección circular se excavó mediante martillos neumáticos y rozadoras.

Durante la construcción de esta nueva geometría del túnel, también se realizaron secciones de instrumentación con el fin de controlar la evolución de las presiones del macizo y las tensiones sobre bóvedas y contrabóvedas.

Los sistemas de auscultación geotécnica en el proyecto final empleados finalmente fueron los siguientes (Berdugo, 2007) (Fig. 3.1.10).

- Células de Presión Total Radiales (CPTR) y Tangenciales (CPTT), con el objetivo de controlar la presión existente en el contacto sostenimiento-terreno.
- Extensómetros de Cuerda Vibrante (ECV) en el hormigón, en las caras sometidas a compresión y a tracción, para comprobar el estado tensional de las piezas armadas a partir de las deformaciones que éstas registran.
- Extensómetros incrementales (EIC) embutidos en perforaciones verticales, que para estimar la profundidad en que se producen los hinchamientos y un valor de las presiones del terreno más allá de la zona de contacto.

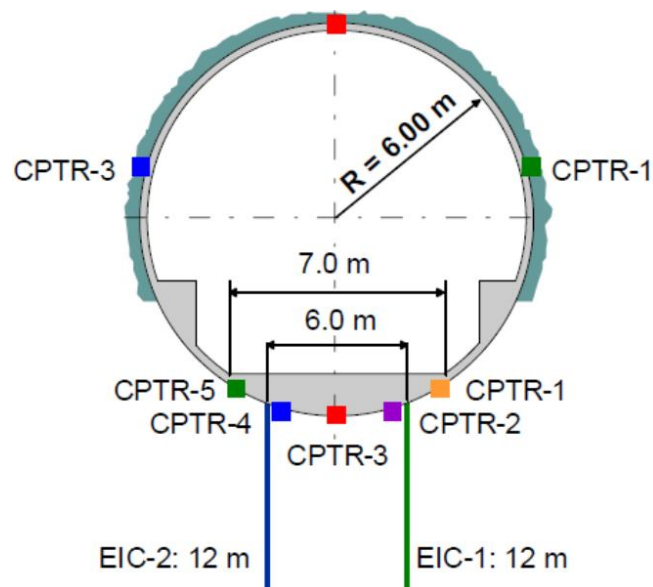


Figura 3.10. Elementos de instrumentación colocados en el túnel de Lilla. Tomado de Berdugo, (2007)

3.2. Túnel de Regajal.

El denominado Túnel de El Regajal (Fig. 3.11) forma parte del tramo “Aranjuez-Ocaña” de la línea ferroviaria de Alta Velocidad Madrid – Valencia, que está en servicio desde el año 2010. Se trata de un túnel de doble vía con un diámetro interior aproximado de 8,50 m, y una longitud total de 2.445 m, incluyendo sendos falsos túneles de emboquille (Rodríguez, 2011).

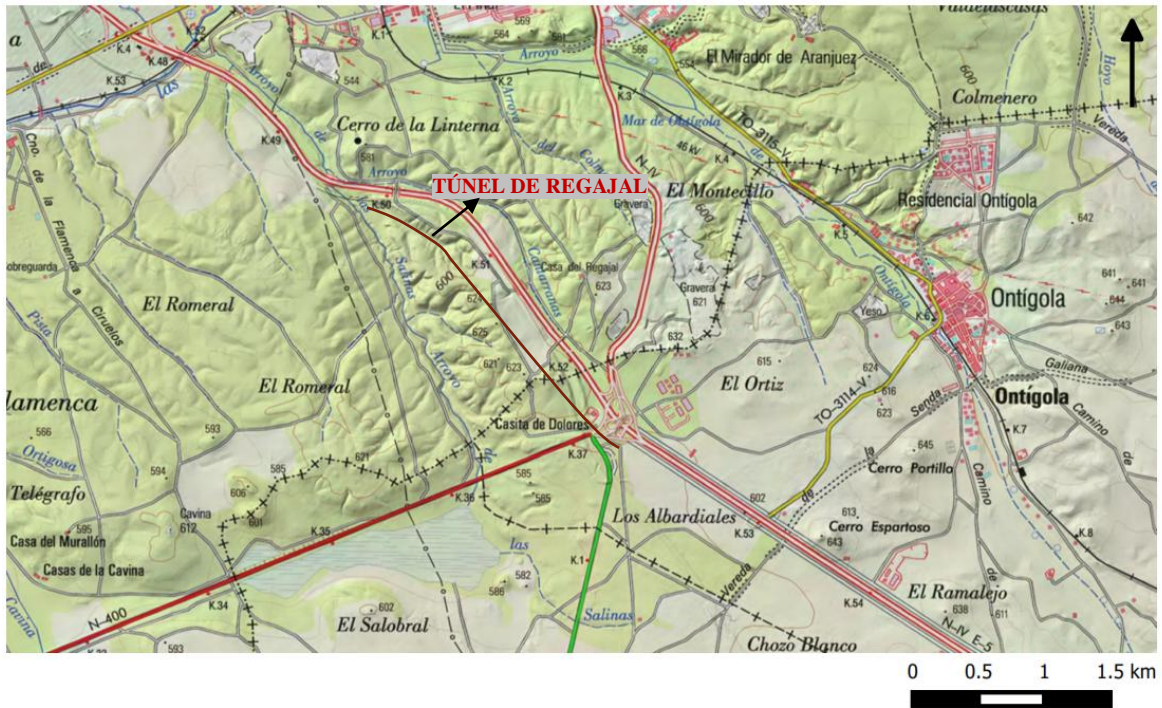


Figura 3.11. Plano de situación del túnel de Regajal.

La zona por la cual transcurre la vía se sitúa en el margen meridional de la Cuenca de Madrid. Estructuralmente dicha cuenca se formó durante la orogenia Alpina, y su relleno sigue el esquema clásico de una cuenca continental endorreica (Correas, 2015), apareciendo de base a techo materiales detríticos gruesos (facies de borde), materiales detríticos más finos (limos y arcillas) denominados “facies intermedias”, y sobre ellos materiales carbonatados, salinos o evaporíticos (facies centrales).

Los materiales que aparecen en la zona de estudio pertenecen al Mioceno y al Plioceno, además de los recubrimientos del Cuaternario, siendo los directamente afectados por el túnel de Regajal los materiales del Mioceno inferior (González, 2011)

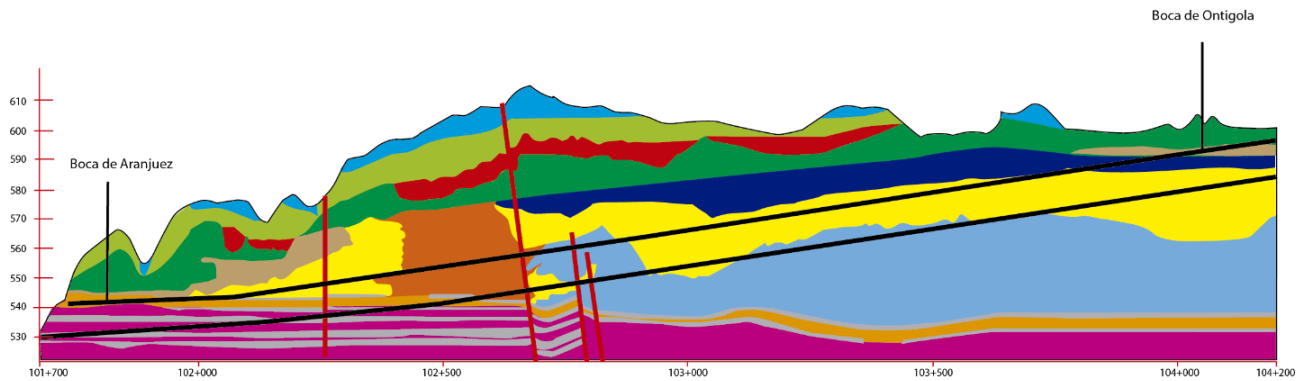
Esta denominada Unidad Inferior del Mioceno se sitúa entre el Ageniense y parte del Aragoniense medio (Gullón, 2016). Está constituida por sedimentos arcillosos masivos en su base, sobre los que aparecen depósitos evaporíticos, primero de carácter salino que hacia techo pasan a yesífero.

Sobre la unidad antes descrita se sitúa la Unidad Intermedia, que no se ve afectada por el trazado. Está formada por depósitos arcillosos en la base, que pasan a yesos hacia techo (Gullón, 2016).

Finalmente, los materiales del Cuaternario se encuentran relacionados con la actividad del río Tajo (Gullón, 2016), tratándose de arenas y conglomerados de cantos silíceos que, a techo, pasan a depósitos limosos.

Para caracterizar geológicamente la perforación se realizó una campaña de prospección exhaustiva, con el objeto de verificar y cuantificar de manera precisa la previsible presencia de minerales con riesgo de hinchamiento y disolución. Para ello se llevaron a cabo los siguientes estudios (Correas, 2015): petrografía microscópica sobre láminas delgadas, difracción de Rayos-X por el método del polvo, y difracción de Rayos-X mediante agregados orientados.

Mediante estos estudios se determinó una clara secuencia (Fig. 3.12), en la que aparece de muro a techo depósitos profundos de halita y anhidrita sobre las margas magnésicas miocenas; glauberita; glauberita en proceso de yesificación; yesos; y yesos karstificados (Rodríguez, 2011). Además, con estos estudios se observó un claro riesgo de expansividad, tanto por la presencia de anhidritas como por la naturaleza de las arcillas miocenas de la primera parte del trazado.



MIOCENO.

- Paleokarst en yesos.
- Acuífero superior y banda saturada.
- Masa de glauberitas.
- Arcillas y margas gris verdosas.
- Glauberita en proceso de yesificación.
- Interestratificado de arcillas.
- Arcillas limosas.
- Yesos secundarios con arcillas y margas.
- Arcillas limosas negras.
- Glauberita yesífera.
- Arcillas y margas gris verdosas.

CUATERNARIO.

- Materiales cuaternarios

Figura3.12. Esquema geológico del túnel de Regajal. Tomado de Rodríguez (2011)

Desde un punto de vista hidrogeológico, a lo largo de todo el túnel se apreció la existencia de un acuífero libre, situado en los niveles yesíferos superiores; y de un acuífero colgado en los yesos más profundos, sobre un nivel impermeable de glauberita, cuya existencia fue confirmada durante la excavación del túnel (Rodríguez, 2011).

Además, los sondeos permitieron observar la presencia de agua en algunas cubetas sobre el techo de la halita, lo cual podría indicar una penetración profunda de los frentes de disolución (Rodríguez, 2011). Estas aguas fueron estudiadas, a partir de ensayos de contenido en tritio y diagrama de estabilidad del sistema $\text{Na-Ca-SO}_4\text{-H}_2\text{O}$, para conocer su antigüedad y su capacidad de reacción al entrar en contacto con minerales solubles o expansivos.

Los resultados obtenidos indicaban que se trataban de aguas muy antiguas (Rodríguez, 2011), y con poca capacidad de reacción, por lo que se interpretaba que a lo largo de la vida útil del túnel no se produciría la llegada de aguas nuevas al ámbito circundante del túnel, manteniendo así una situación de equilibrio hidroquímico.

3.2.1. Sistema de excavación.

La excavación de este túnel se basó en la realización de unas secciones robustas, impidiendo la descompresión del macizo rocoso, y evitando todos los aportes de agua posibles, tanto desde la propia ejecución de la excavación, (que se realizó con el menor aporte de agua posible) como impidiendo todo tipo de flujo de agua hacia el túnel.

Para ello, la excavación se ejecutó fundamentalmente por fases (avance, destroza por bataches y contrabóveda) mediante rozadora en los terrenos salinos y martillos hidráulicos en terrenos arcillosos (González, 2011). El revestimiento se planteó a sección completa, muy próxima al frente (Fig. 3.2.3) para conseguir un cierre rápido de la sección (Rodríguez, 2011) y así limitar las convergencias y descompresiones que favorecerían la posible apertura de fisuras o fallas con carga de agua.



Figura 3.13. Avance de la contrabóveda muy próxima al frente de la destroza. Tomado de Rodríguez (2011).

Además, para limitar la circulación de fluidos o la creación de nuevas vías de flujo, que pudieran causar hinchamientos, se descartó la colocación de elementos de sostenimientos como bulones en elementos salinos (González, 2011) y se consideró importante el hormigonado del revestimiento directamente contra el terreno con objeto de evitar huecos.

En la fase de proyecto se plantearon una serie de secciones tipo, que en fase de obra fueron simplificadas a 4 diseños muy similares (Fig. 3.14), únicamente variando el espesor de la contrabóveda y del armado. Estas secciones se diferencian para la perforación de arcillas y margas arcillosas (I-M1); para el tramo de glauberitas, halitas, etc. en terreno sin agua (I-RN); para el tramo rico en anhidritas y materiales expansivos (IMEXP) y para tramos potencialmente lixibibles (I-MPIL) (Rodríguez, 2011).

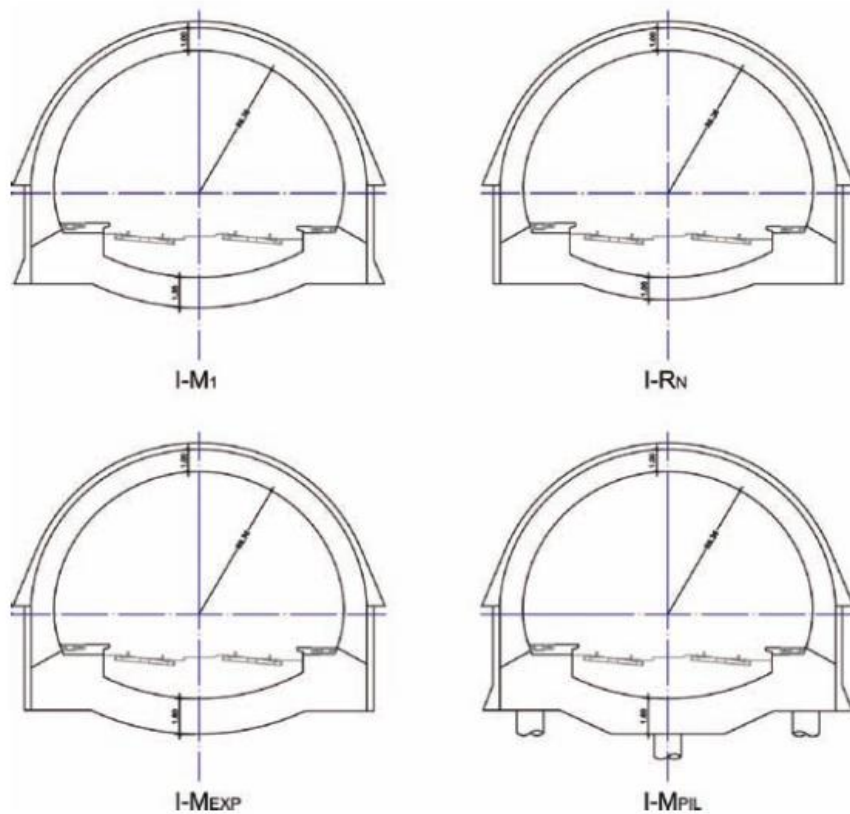


Figura 3.14. Diseños de las secciones tipo del túnel de Regajal. Tomado de González (2011).

Como sistemas de auscultación para las soluciones técnicas empleadas se utilizaron las siguientes (Rodríguez, 2011) (Fig. 3.15):

- Extensómetros de varillas (ECV) para evaluar la amplitud de la zona descomprimida en torno al túnel y con esa base fijar las longitudes de los bulones de refuerzo.
- 124 células de presión (CP) en 18 secciones, colocando generalmente 3 células en bóveda y 5 en contrabóveda.

- Micrómetros deslizantes (MD) para detectar la zona que podría sufrir hinchamientos en la base del túnel. Se instrumentaron 17 secciones con 2 o 3 micrómetros
- Medidores de conductividad en arranques de bóveda de tipo inductivo (Observar en detalle de la figura 3.15).

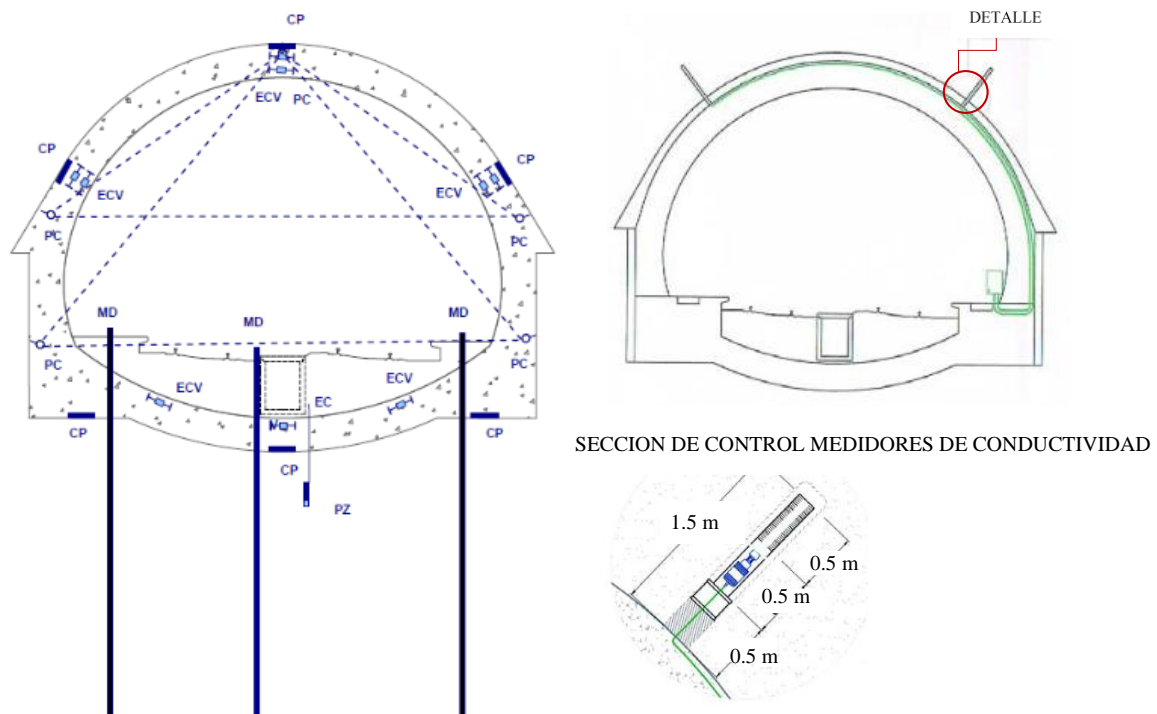


Figura 3.15. Sección intensiva de auscultación y medidores inductivos de resistividad. Tomado de González (2011).

3.2.2. Problemas geotécnicos.

Desde el proyecto constructivo ya se observó que la naturaleza salina del terreno podía plantear serios problemas, tanto durante la etapa de construcción, como a largo plazo (Rodríguez, 2011).

Los análisis mineralógicos indicaban la presencia de materiales de elevada solubilidad, así como su alto potencial de expansividad (anhidritas y arcillas expansivas).

A estos problemas se les sumaban los de corrosión, aparición de zonas lixiviadas muy blandas, la presencia de fallas o fracturas, etc. El diseño en los tramos donde se producía la acumulación de estas dificultades resultaba muy complicado (Gonzalez, 2011), por lo que se intentaba evaluar el riesgo más crítico y adoptar algunas precauciones adicionales respecto a los otros riesgos.

En un principio, los principales problemas previstos (expansión y disolución) parecieron no plantear mayores incidencias, ya que *a priori* el estudio hidrogeológico indicaba que el agua aledaña al túnel presentaba un equilibrio hidroquímico (Rodríguez, 2011). Durante la excavación, en la sección de avance aparecieron diversas humedades en solera y en el revestimiento de hormigón proyectado que no se observaron en fase de excavación.

Estas humedades podían indicar la aparición de filtraciones conectadas con el nivel freático superior, el cuál sí presentaba un riesgo directo. No obstante, a partir de diversos estudios, se descartó la hipótesis inicial de filtraciones, otorgando a estas filtraciones una explicación geoquímica (Rodríguez, 2011). La hidratación genera la transformación de unos productos salinos en otros (Fig. 3.16).

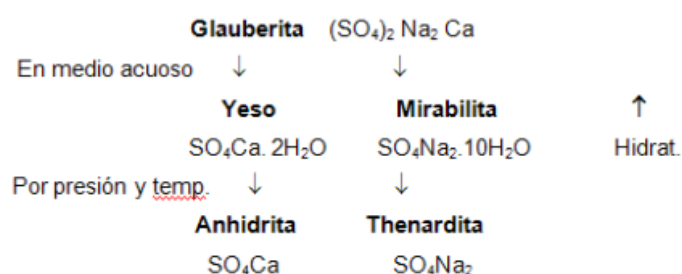
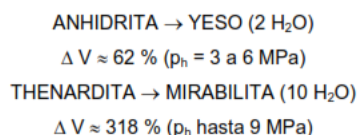


Figura 3.16. Evolución de los compuestos salinos. Tomado de González (2011).

En particular, el aumento de temperatura (Fig. 3.17) favorece la transformación de la mirabilita en thenardita + agua. Es precisamente esta liberación de agua la que podía confundirse con una filtración de agua desde el terreno.

Estas transformaciones se producen con importantes cambios de volumen o desarrollando fuertes presiones de hinchamiento si el terreno está confinado, pudiendo generar presiones entre 3 y 9 MPa:



Cabe destacar que, en tramos a cielo abierto adyacentes al túnel, se manifestaron, en época invernal, con fuertes descensos de temperatura y penetración de agua de deshielo, generando importantes hinchamientos por la transformación de thenardita en mirabilita.

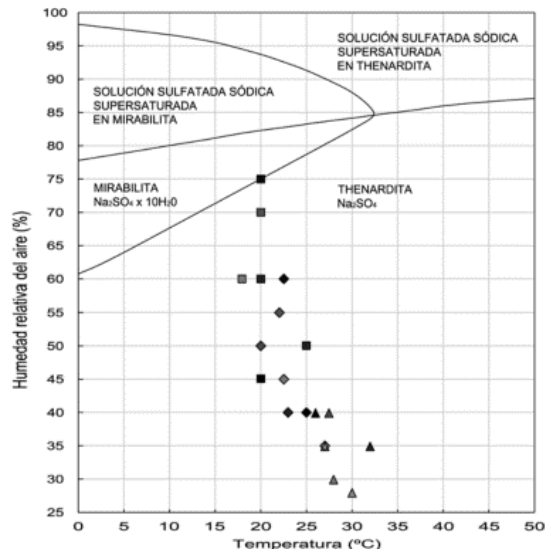


Figura 3.17. Variación de los compuestos salinos en función de la humedad relativa del aire y de la temperatura. Tomado de González (2011).

3.2.3. Soluciones técnicas adoptadas.

Como ya se ha comentado anteriormente, en el túnel de Regajal había diferentes dificultades geotécnicas y, por tanto, se emplearon distintas soluciones técnicas.

Para evitar problemas de filtraciones, una vez excavado el túnel, se decidió colocar una lámina de impermeabilización (Rodríguez, 2011) para impedir que las eventuales filtraciones encontraran salida hacia el túnel (Fig. 3.2.8).



Figura 3.18. Lámina de impermeabilización entre el sostenimiento y el revestimiento. Tomado de Rodríguez (2011).

No obstante, existía el riesgo de circulación longitudinal de agua por el trasdós del sostenimiento-revestimiento o por la degradación del propio sostenimiento, favorecida por la pendiente del túnel, llevando agua desde las zonas de infiltración a otras de elevada solubilidad (Rodríguez, 2011). Para evitarlo se realizaron una serie de anillos, contorneando todo el túnel y penetrando en el terreno (Figura. 3.19).



Figura 3.19. Anillo de intercepción de flujos longitudinales. Tomado de Rodríguez (2011).

A pesar de las medidas tomadas para evitar las filtraciones de agua, se produjeron presiones de hinchamiento en algunos tramos, como por ejemplo en los afectados por glauberitas yesificadas, de hasta 4 MPa, con convergencias entre 4 y 20 mm. Por tanto, a pesar de los fuertes espesores empleados en el revestimiento, hubo que realizar armados importantes, sobre todo en la parte de la contrabóveda y mitad inferior de los laterales (Rodríguez, 2011). En los tramos con halita el acero corrugado iba galvanizado, por el riesgo de corrosión.

Además, en algunos casos hubo que colocar bulones de hasta 12 m de longitud en base de hastiales, eventualmente combinados con una presolera o con el micropilotaje del sostenimiento (Fig. 3.20).

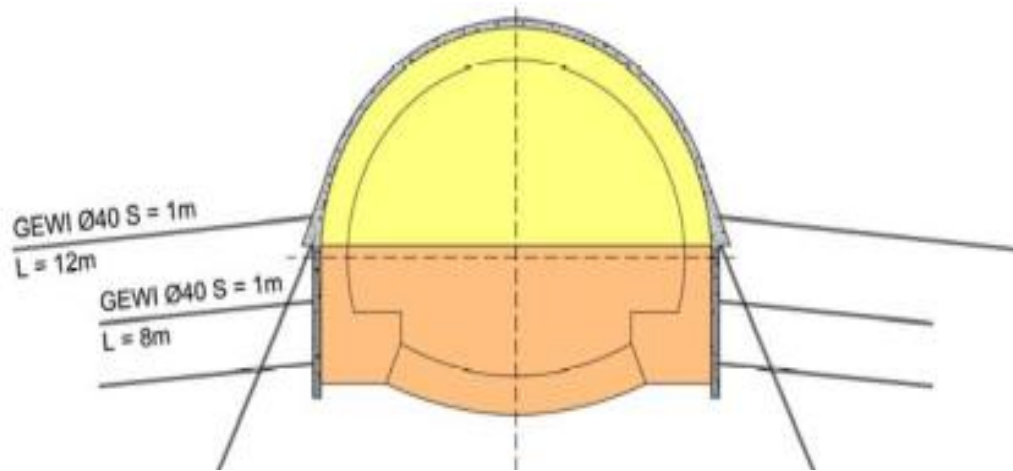


Figura 3.20. Refuerzo del sostenimiento en zonas de terreno débil. Tomado de Rodríguez (2011).

En los tramos con riesgo de lixiviación en profundidad se optó por pilotar el revestimiento del túnel con grupos de 3 pilotes de 1,2 m de diámetro, separados 2,5 m y longitudes de unos 17,5 m (Fig. 3.21) o la colocación de columnas de mortero de 300 mm de diámetro y longitudes de 4,5 a 6 m bajo solera.

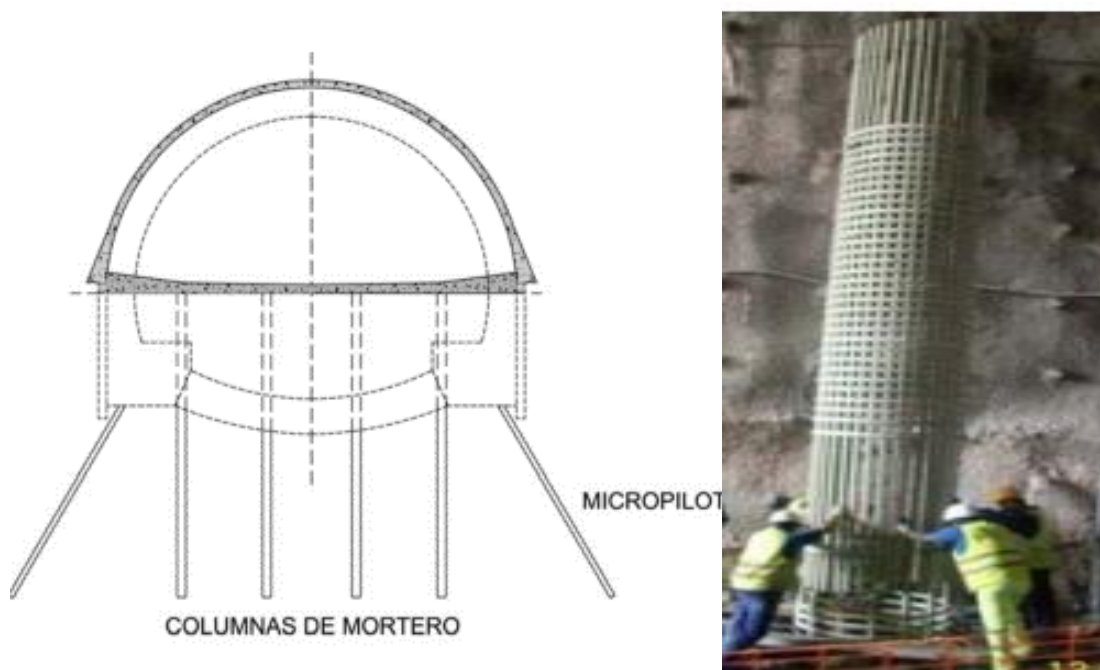


Figura 3.21. Aspecto de la sección con columnas de mortero y micropilotes; Introducción de pilotes. Tomado de Rodríguez (2011).

En la zona del emboquille de Ontígola las capas más superficiales del terreno estaban saturadas en agua, por lo que el agua llegaba fácilmente al túnel, existiendo un riesgo de lixiviado y de expansividad. Por tanto, en los últimos 80 m, donde cabía la hipótesis de este último riesgo, los pilotes se dimensionaron también a tracción (Rodríguez, 2011).

Además, para corregir esta situación en la zona más próxima al emboquille se plantearon inyecciones de resinas acrílicas como tratamiento de sellado de filtraciones desde el propio túnel.

Tras la finalización del túnel, las células de presión indicaban presiones de hinchamiento de hasta 0,3 MPa, lo que confirma que no se había logrado una estabilidad total.

3.3. Túnel de Fabares.

El túnel de Fabares se encuentra situado en la Autovía A-64, en el tramo de Lieres-Villaviciosa (Fig.3.22).

El trazado de este túnel se compone de dos tubos separados entre sí unos 25 m, con una longitud del tubo derecho (dirección Villaviciosa) de 2.140 m, y 2.167 m del tubo izquierdo (dirección Oviedo).

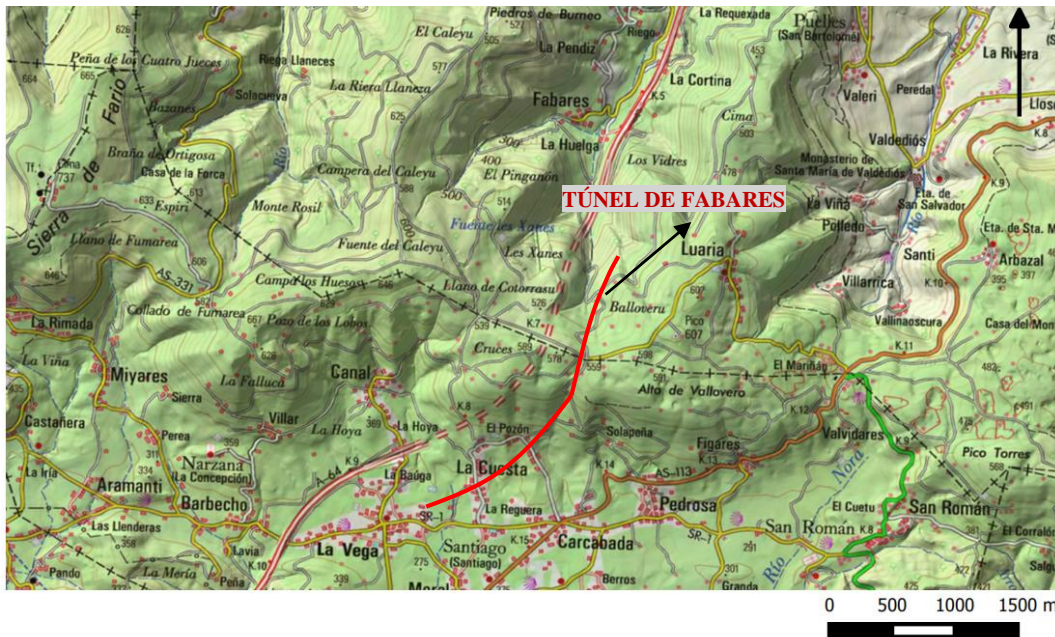


Figura 3.22 Situación geográfica del túnel de Fabares.

El túnel se sitúa geológicamente dentro de la denominada Cuenca Mesozoica Gijón-Villaviciosa, y perfora materiales que van desde el techo del Triásico (Keuper) hasta el Jurásico Superior (Malm). El keuper se compone de arcillas rojizas generalmente muy compactadas que, en profundidad, pasan a argilitas. En esta formación, hacia el techo, aparecen niveles de anhidritas de hasta 5 m de espesor, así como nódulos de dicho mineral disperso en las argilitas. A techo se encuentran brechas calcáreas con una potencia de entre 10 y 15 m. El resto del túnel se excava en materiales carbonatados, alternando básicamente calizas, margocalizas, margas, y calizas brechoides. Algunos de estos niveles presentan evidencias de karstificación.

Desde el punto de vista hidrogeológico, este túnel se encuentra en su mayor parte en el subsistema del acuífero de Villaviciosa, el cual está limitado al Norte por el Mar Cantábrico, al Este y Oeste por materiales triásicos, actuando como sustrato impermeable, y

al Sur por una zona de fallas y cabalgamientos (Franja Móvil intermedia) y por materiales triásicos.

Los materiales detríticos de edad jurásica constituyen un acuífero multicapa, en ocasiones colgado, que se alimenta por la infiltración del agua de lluvia y cuya descarga se produce a través de manantiales y arroyos de pequeña importancia. El Jurásico calcáreo constituye un importante acuífero asociado a la presencia de fracturas y fenómenos kársticos alimentados por el aporte directo de las lluvias.

3.3.1. Sistema de excavación.

La excavación del túnel se realizó con un área de aproximadamente 85 m^2 variando la geometría en función de la geología de cada tramo (Fig.3.23). Estas geometrías serían con solera para los tramos de calizas; con contrabóveda en terrenos compuestos por margas y calizas brechoides (no expansivos); y con contrabóveda reforzada en terrenos potencialmente expansivos (argilitas con anhidrita).

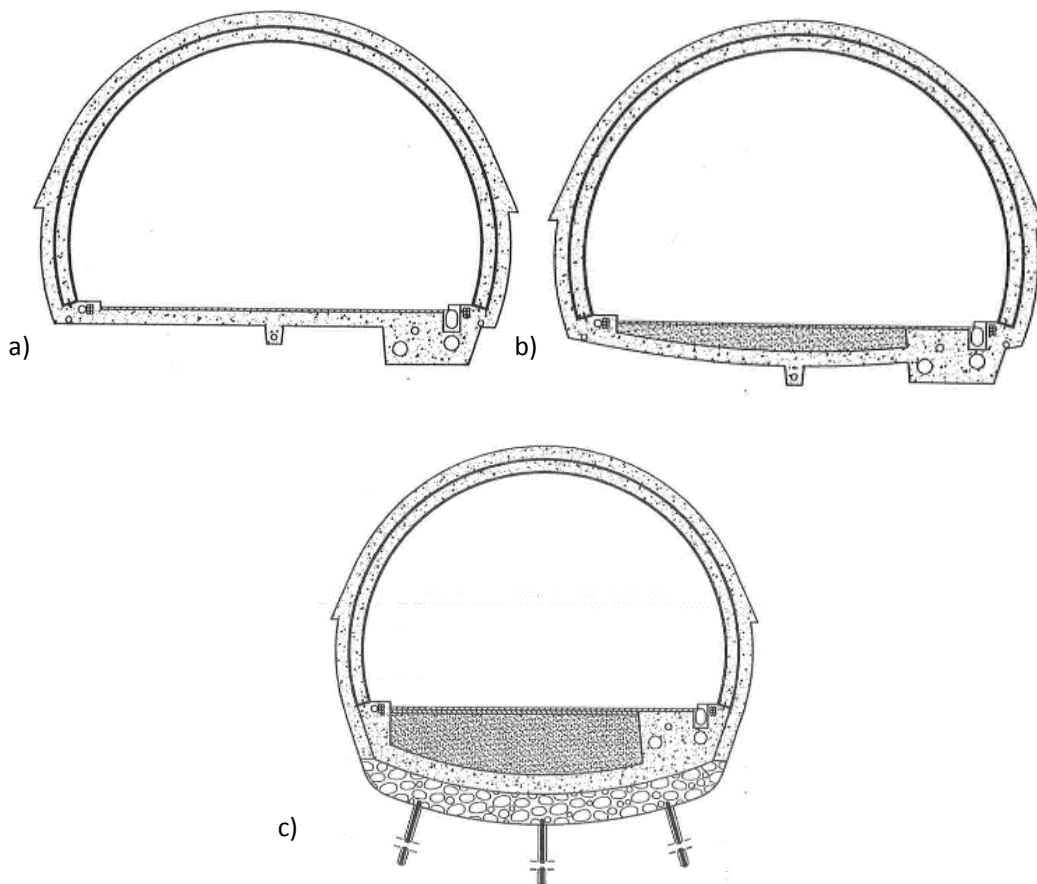


Figura 3.23. Distintas secciones tipo del túnel de Fabares. Sección con solera (a); sección con contrabóveda en materiales no expansivos (b); sección con contrabóveda en materiales potencialmente expansivos (c).

El sistema de excavación empleado comprendió avance y destroza, colocando el sostenimiento cerca del frente de avance, utilizando el presostenimiento cuando fue posible, con el fin de limitar lo máximo posible la plastificación de los terrenos con anhidrita. Así, una vez que el terreno correspondiente al avance estaba estabilizado, se continuaba con la excavación y sostenimiento de la destroza, llevando siempre un estricto control del agua en la zona de trabajo, de tal forma que se evitase totalmente la humectación de los terrenos susceptibles de hinchamiento a largo plazo. El sostenimiento se dimensionó para que pueda contribuir a impedir la relajación del terreno, en función de su distancia de colocación al frente, y para que sea capaz de colaborar con el revestimiento para soportar los posibles hinchamientos del terreno.

En algunas zonas se construyó una contrabóveda, bien por motivo estructural (zona de margas y calizas brechoides) o bien para contrarrestar las posibles presiones provocadas por los fenómenos de expansión por la anhidrita. La contrabóveda está construida de hormigón armado, y en las zonas de anhidrita el terreno se rigidificó mediante micropilotes, contruidos mediante taladros en seco, y se colocó una capa de balasto compresible para distribuir las cargas durante el posible proceso de hinchamiento. Además en las zonas donde fue necesario se colocaron bulones de hasta 3,5 m de longitud eficaz, en malla de (L) 1.5 m x (T) 1,5 m cubriendo al máximo posible la superficie descubierta.

Tras la excavación y la colocación del sostenimiento, se procedió a la colocación de drenajes e impermeabilización del túnel, acabando con el hormigonado de los paramentos y clave.

La contrabóveda se instrumentó con objeto de controlar la evolución del posible proceso de hinchamiento de las anhidritas. Para ello se realizó un control topográfico mediante nivelaciones de superficie, se habilitaron secciones para medir convergencias cada 25 m, y se instalaron células de carga y células de presión total.

3.3.2. Problemas geotécnicos.

Desde el comienzo del túnel en el emboquille sur del túnel se perforaron materiales del Keuper Superior a lo largo de un tramo de 510 m. Estos terrenos están constituidos básicamente por arcillas y argilitas, apareciendo en menor medida niveles de anhidritas y brechas dolomíticas hacia el techo de la formación. Este mineral aparece en forma de pequeños niveles en los tramos de argilitas, suponiendo entre el 10 y el 15 % de la potencia total.

En estos niveles se realizaron ensayos de difracción de Rayos X para determinar la proporción anhidrita - yeso, obteniendo como resultado un 95 % de anhidrita y un 5% de cuarzo, apareciendo únicamente trazas de yeso.

3.3.3. Soluciones especiales adoptadas.

Las soluciones adoptadas para el tramo de argilitas con anhidritas que difieren del resto del túnel, consiste esencialmente en impedir la entrada de agua desde el túnel hacia el terreno circundante.

Para ello se consideró necesario la realización de tratamientos del terreno, previos a la construcción del túnel, en el tramo de transición entre las margas brechoides y las argilitas con objeto de impedir la afluencia de agua al terreno circundante a la excavación. Este tratamiento se realizó mediante inyecciones químicas en sondeos perforados desde el frente de excavación, antes de que éste llegue a la zona a tratar.

Este tratamiento también fue realizado en zonas puntuales del tramo en argilitas en las que se produjeron surgencias de agua durante el avance. Para reconocer la existencia de estas infiltraciones en todo el tramo de argilitas se realizó el avance habiendo perforado previamente sondeos horizontales en el frente y en el sentido longitud de avance.

Además, una vez realizada la excavación, con el mismo objetivo, se colocó una lámina de polietileno reticulado de 4 mm de espesor. Esta lámina se colocó en dos fases, una inmediatamente después de colocada la capa de balasto compresible, situándose bajo la contrabóveda y otra inmediatamente antes de iniciar la puesta en obra del revestimiento de paramentos y clave. En la segunda fase la lámina se fijó sobre el sostenimiento de paramentos y bóvedas, cuidándose especialmente la continuidad entre la lámina colocada en esta fase y la anterior.

Además de controlar la filtración de agua, se utilizó un revestimiento específico para esta zona. El revestimiento en este tramo se compone de una contrabóveda de 12,8 m de radio y 60 cm de espesor, con objeto de contener los posibles hinchamientos. Esta contrabóveda se diseñó armada en ambas caras con mallazo electrosoldado y, en las zonas donde fue necesario, se colocaron miropilotes o bulones de 12 mm de diámetro.

Asimismo, se colocó un material compresible bajo la contrabóveda. Esta solución se ha adoptado en algunos túneles excavados en terrenos con problemas de hinchamiento y su objetivo consiste en aportar una cierta capacidad de desplazamiento al terreno sin que se vea afectado el revestimiento que, por ser de hormigón, acepta unos desplazamientos mucho más pequeños antes de llegar a la rotura.

Esta solución está ligada al control de la entrada de agua al terreno. Si no se logra impedir la misma, la hidratación de la anhidrita sólo se podría contrarrestar hasta una presión de 1,6 MPa. Este valor, en función del grado de reparto con el que actúe, podrían ser remitida por la estructura y el material compresible, en cuyo caso lo único que haría sería retrasar la rotura de la contrabóveda.

Sin embargo, si el control de la entrada de agua al terreno circundante al túnel es efectivo se estimó que la hidratación de la anhidrita será limitada y la deformación de la capa compresible será muy útil, en especial para repartir cargas y rebajar los momentos flectores.

3.4 Túnel de Albertia.

El Túnel de Albertia se sitúa en el tramo Legutiano-Eskoriatza de la Línea de Alta Velocidad ferroviaria Vitoria - Bilbao - San Sebastián (Fig. 3.24), abarcando aproximadamente 4.580 m (Peñas y Rodenas, 2011). Se trata de un túnel de doble tubo con vía única cada uno, que alcanza una sección libre de 57 m², que fue excavado por métodos convencionales, principalmente mediante voladura.

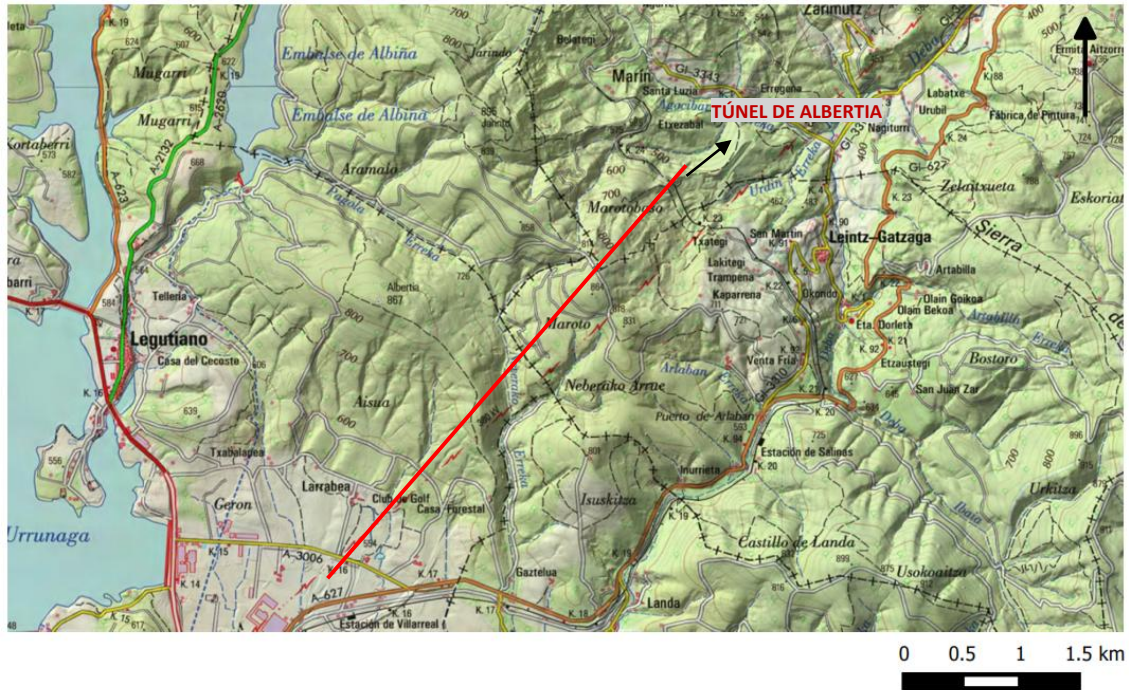


Figura 3.24. Situación geográfica del Túnel de Albertia.

La geología del túnel está especialmente marcada por la estructura del macizo, caracterizada por la presencia de una sucesión de cabalgamientos que ponen contacto la unidad de Oiz, con las de Yurre (Fig. 3.25).

La Unidad de Oiz está formada principalmente por una alternancia rítmica de areniscas y limolitas, con intercalaciones de calizas. Estas rocas presentan una estructura bandeada con una fábrica planar de origen sedimentario bien definida, en bancos de potencia generalmente centimétrica y colores grises a violáceos.

La Unidad de Yurre está formada por Lutitas con septaritas y lutitas bituminosas con intercalaciones de areniscas de forma esporádica de casi un metro. Son rocas masivas, con una fábrica planar muy penetrativa de origen sedimentario y tectónico, de color negro o gris oscuro. Presenta una foliación muy penetrativa, dando lugar a un aspecto similar al de las pizarras (Peñas y Ródenas, 2011).

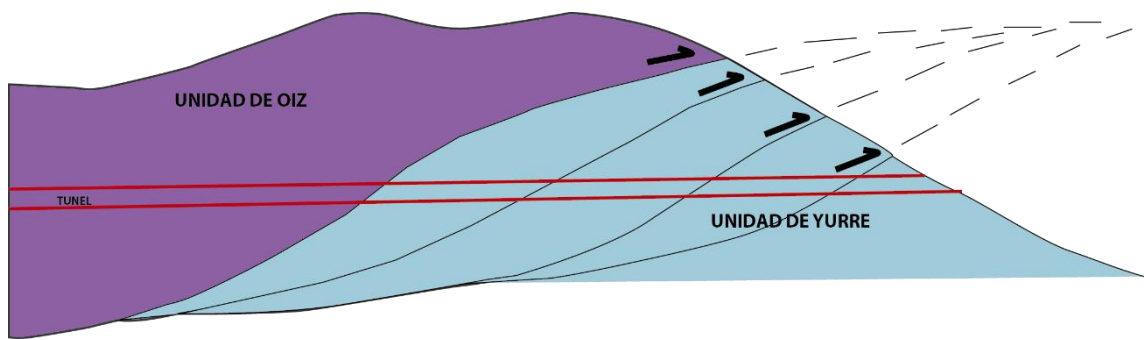


Figura 3.25. Esquema de la estructura del macizo en forma de dúplex que atraviesa el Túnel de Alberta. Tomado de Dirección General de ADIF, 2011.

Sin embargo, la característica más llamativa es la existencia en profundidad de varios niveles sulfatados intercalados dentro de esta secuencia. A estos sulfatos se les atribuye un origen sedimentario, a pesar de que están fuertemente tectonizados como consecuencia del desarrollo de los cabalgamientos, ya que son estos materiales más blandos los que sirven de nivel de despegue. De esta forma, las rocas sulfatadas aparecen intercaladas con las lutitas nombradas anteriormente, aunque concentradas en diferentes niveles de despegue de los sucesivos cabalgamientos (Fig. 3.25). Además, estos niveles no tienen continuidad lateral, ni de potencia ni de composición (Dirección General de ADIF, 2011).

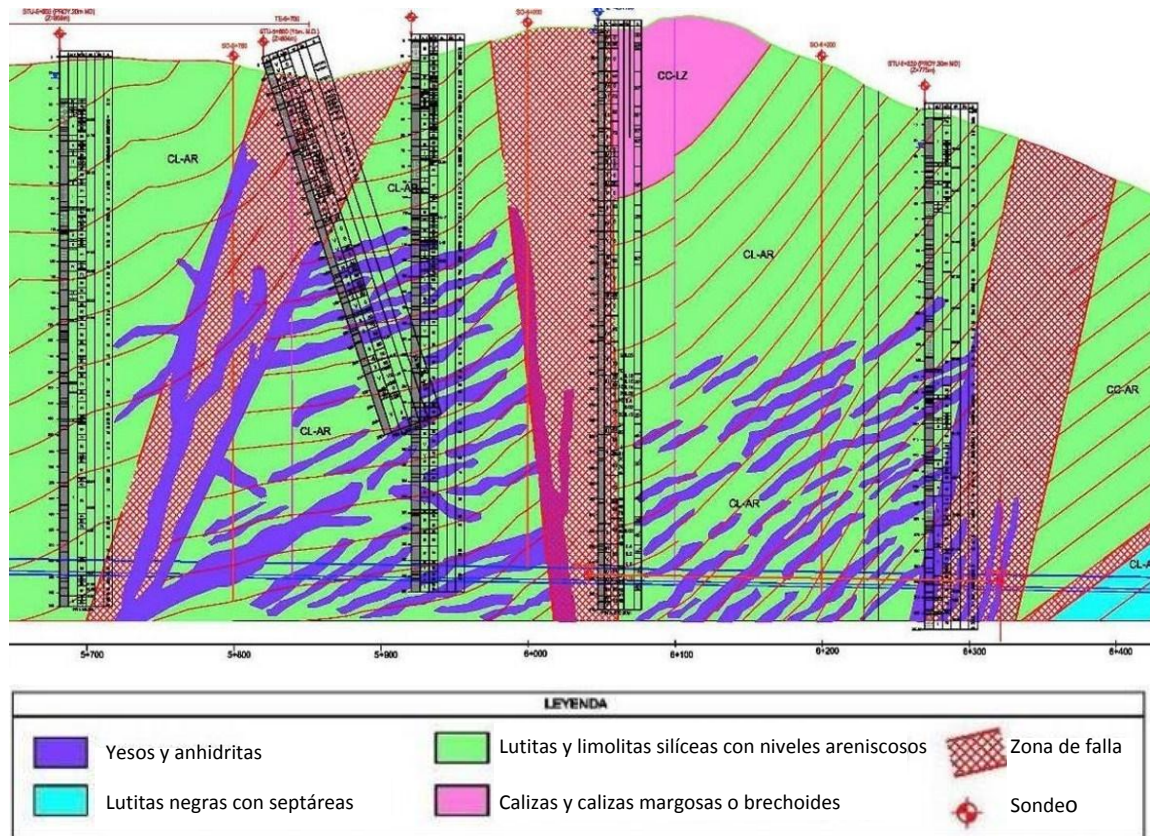


Figura 3.26. Esquema geológico del “tramo 2” del Túnel de Alberta. Tomado de Peña y Rodenas (2011).

A partir de los análisis de los sondeos y de los frentes de excavación se diferenciaron tres tipos de rocas sulfatadas atendiendo a su textura (Dirección General de ADIF, 2011):

- Sulfatos masivos. Se han denominado de esta forma a los tramos en los que las fases sulfatadas son mayoritarias (>90% en volumen), aunque en ocasiones aparecen interstratificados junto con las lutitas y con cierta deformación plástica”.
- Sulfatos brechoides. En esta tipología se incluyen las brechas con clastos lutíticos con cemento yesífero, en los que la proporción entre lutitas y rocas sulfatadas son del mismo orden”.
- Sulfatos en fracturas. Finalmente se han detectado numerosas fracturas rellenas de sulfatos, con espesores de orden milimétrico hasta unos pocos centímetros” (fig 3.26).

En el Proyecto de Construcción a pesar de detectar la presencia de yeso no se constató la existencia anhidrita. Sin embargo, al abordarse la puesta en obra del túnel ya se contaba con la información procedente del cercano túnel carretero de Arlaban en el que sí había aparecido este mineral.

3.3.4. Sistema de excavación.

El túnel de Albertia es una perforación de aproximadamente 4.580 m de longitud, dividido a su vez en dos subtramos en función de la presencia de facies sulfatadas (Dirección General ADIF, 2011): el subtramo I, de 2.680 m de túnel, y el subtramo II, rico en sales sulfatadas, en el que se perforan los 2.100 km restantes.

En este segundo tramo se realizaron sondeos verticales para la identificación de minerales con peligro de hinchamiento o disolución (yeso y anhidrita) mediante ensayos de difracción de Rayos X y reconocimiento petrográfico de láminas delgadas a partir de las empresas SAITEC y TEAM INGENIERÍA S.L. (Peñas y Rodenas, 2011).

Una vez confirmada la presencia de anhidrita en el terreno, se realizó una primera valoración de la problemática que podría generar en el diseño del túnel.

El Túnel de Albertia, igual que en otros casos nombrados anteriormente, se diseñó con medidas de solución rígida frente a soluciones semirígidas o flexibles, ya que se estimó que proporcionaría una solución estructural más fiable.

Las secciones presentan una geometría próxima a la circular, evitando así la concentración de esfuerzos en las esquinas (Peñas y Rodenas, 2011), con un contrabóveda robusta que limite los desplazamientos verticales causados por presiones de hinchamiento de hasta 5 MPa (Fig. 3.27).

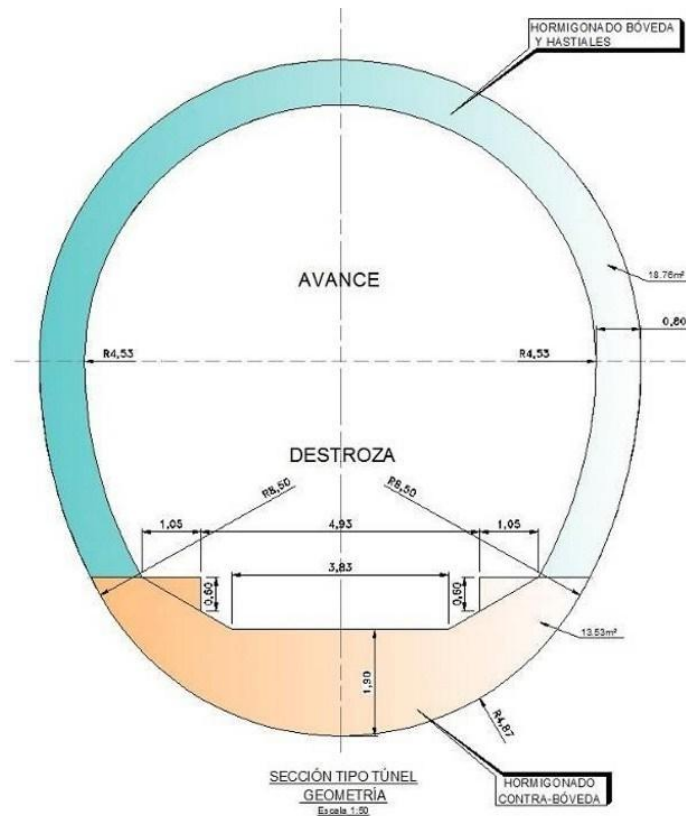


Figura 3.27. Sección tipo del Túnel de Albertia. Tomado de Peña y Rodenas, 2011.

El sistema de excavación elegido para la ejecución del túnel de Albertia fue el denominado Nuevo Método Austríaco en avance y destroza, con empleo de sistemas convencionales (voladura y medios mecánicos), aplicando el sostenimiento apropiado dependiendo de los terrenos atravesados.

El proceso constructivo ha consistido, una vez terminados los trabajos en el emboquille del túnel, en la excavación del túnel en mina comenzando por la excavación de la sección en avance, continuando con la ejecución del sostenimiento de avance, la excavación de la destroza y colocación posterior del sostenimiento de destroza, y finalmente en la ejecución de la contrabóveda de hormigón.

Una vez acabada la excavación se realizó el tratamiento de impermeabilización, finalizando con el revestimiento que generará la sección definitiva en la que se implantará la vía.

Para realizar la instrumentación se utilizaron 7 extensómetros continuos de tipo *sliding deformer* de 15 m de longitud cada uno, colocados en el centro de la sección para evitar que los acodamientos que producen los hastiales del túnel enmascaren los movimientos. Estos extensómetros se han colocado en diferentes puntos del trazado, tanto en

zonas en las que se han encontrado cantidades elevadas de anhidrita en el terreno, como en otras donde el contenido es más reducido, con el fin de obtener resultados comparativos. Se ubican en una tubería extensométrica instalada en el interior de un sondeo, solidarizada al terreno mediante una lechada de cemento que tenga características similares al terreno (Fig. 3.28) y permite medir los movimientos verticales del terreno con intervalos de 1 m y con precisiones del orden de $\pm 0,03$ mm, alcanzando rangos de medida de 50 mm.

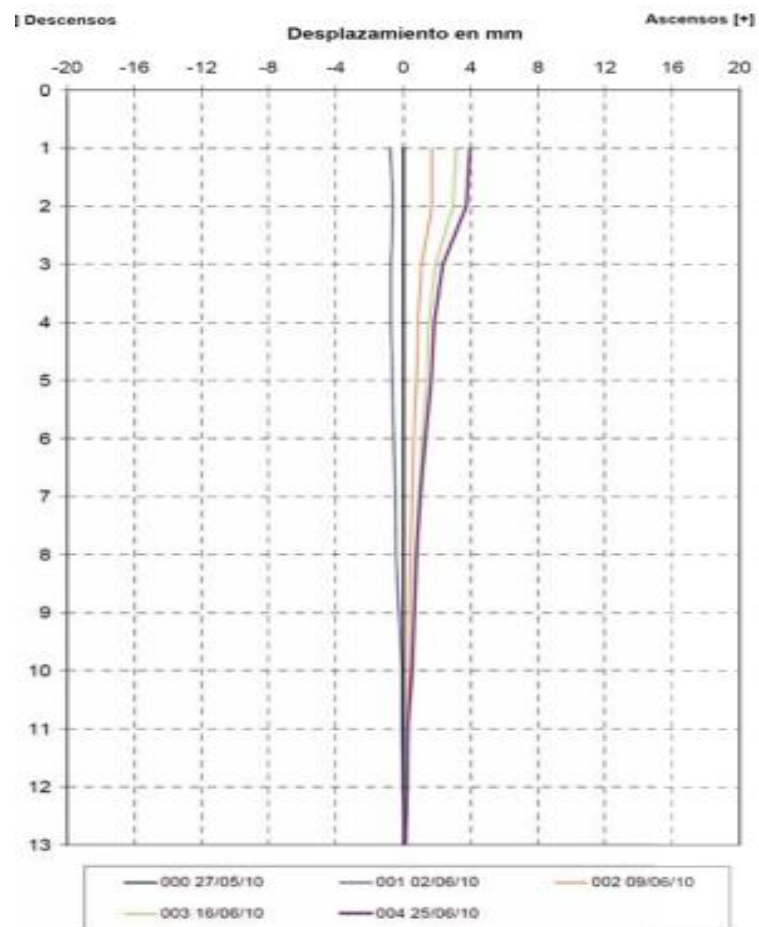


Figura 3.28. Ejemplo de las medidas tomadas con uno de los extensómetros colocados en el Túnel de Albertia. Tomado de Dirección General de ADIF, 2011.

3.3.5. Problemas geotécnicos.

A partir de los ensayos de difracción de Rayos X y de la observación de las muestras de lámina delgada, se observó la presencia de anhidrita en cantidades importantes (mayor al 5%) en 15 muestras de las 198 analizadas, tomadas principalmente entre los PK 5+720 y el 5+780, mientras que en el resto de muestras sulfatadas los contenidos de este mineral expansivo eran más reducidos, generalmente inferiores al 1%.

Los contenidos elevados se encontraban en muestras con tipología brechoide o masiva. En las muestras tomadas de fracturas, el contenido en anhidrita, cuando ha aparecido, ha sido muy bajo, con una única excepción. (Fig. 3.29).

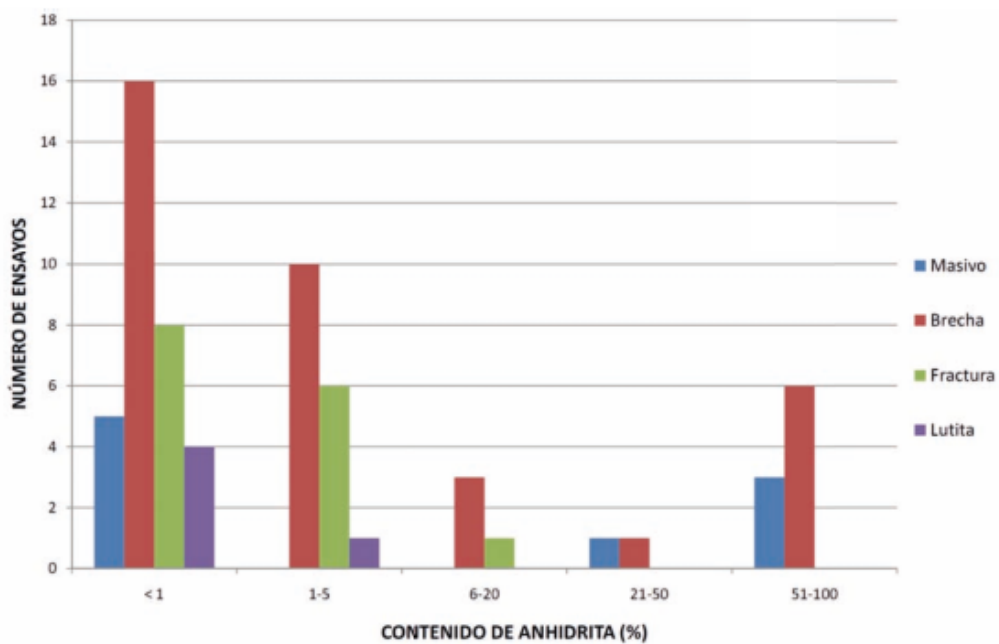


Figura 3.29. Contenido de anhidrita en el Túnel de Albertia. Tomado de Dirección General ADIF, 2011).

En cuanto a la forma de presentación de la anhidrita, cuando los porcentajes son elevados aparece bien como nódulos compuestos únicamente por anhidrita, o bien por una mezcla de anhidrita y yeso. En las muestras con porcentajes bajos, se presenta como pequeños cristales subidiomorfos preservados generalmente dentro de grandes cristales poiquiloblásticos de carbonatos, yesos y, en algunos casos, de cuarzo (Dirección General ADIF, 2011).

Además, los ensayos realizados en las muestras de agua permitieron comprobar que el agua infiltrada estaba ligeramente subsaturada frente a sulfatos, lo que indica que con pequeñas variaciones (cambios de temperatura, evaporación, etc.) podría comenzar a precipitar yeso. La presencia de fallas y fracturas, relacionadas principalmente con la Orogenia alpina (Martinez, 1989) favorecerían la circulación de estos fluidos.

Esta circulación podría provocar la hidratación de la anhidrita, convirtiéndose así en yeso (Esteban, 1990) o bien la precipitación de yeso fibroso en los posibles huecos cuando el fluido se encuentre sobresaturado.

En este túnel, a la problemática de los fenómenos de hinchamiento se le añades los problemas geotécnicos de fluencia. Este fenómeno consiste en la pérdida de las propiedades resistentes del terreno (reducción de cohesión) según aumenta la deformación del mismo. En estos casos, la roca pasaría de un comportamiento elastoplástico a otro elastoplástico-viscoso, es decir, se reduce progresivamente la cohesión con forme aumenta el tiempo y las deformaciones (Sulem et al., 1987; Pang y Dong, 1991; Sandoval, 2008).

En el Túnel de Albertia el tramo afectado por el fenómeno de fluencia se localiza entre los PK 5+900 y 6+200, en la Unidad Yurre, siempre con coberteras superiores a 300m.

Este problema se puso de manifiesto durante el control de las secciones de convergencia, donde se midieron desplazamientos entre hastiales superiores a 250 mm y velocidades de convergencia de 1-3 mm/día, que en algunos casos llegaron a superar los 20 mm/día. Estos movimientos se evidenciaron en caídas de la gunita, grietas y desconchones (Peñas y Rodenas, 2011).

3.3.6. Soluciones técnicas adoptadas.

Tras comprobar la existencia de evidentes fenómenos de fluencia se llevaron a cabo una serie de actuaciones que además ayudan a impedir los posibles hinchamientos.

En primer lugar, se realizó la fase de avance y como sostenimiento se perforaron bulones autoperforantes de hasta 15 m de longitud siguiendo una distribución en forma de malla (Fig. 3.30) para reforzar el terreno y limitar los desplazamientos. Además, se construyó una solera de 60 cm de hormigón armado para evitar el cierre de la base de los hastiales y reducir el riesgo (Fig. 3.30b). Todo ello colaboró en que la velocidad de convergencia entre hastiales disminuyese hasta valores de entre 0,1-0,2 mm/día (Peñas y Rodenas, 2011).



Figura 3.30. Instalación de malla de bulones (a) y proceso de ejecución de la solera de hormigón armado (b). Tomado de Peña y Rodenas (2011).

Posteriormente, tras observar las fuertes deformaciones se optó por la ejecución del sostenimiento más pesado previsto en el Proyecto (independientemente del valor de índice RMR del macizo), mientras el túnel se encontrase bajo coberteras de más de 300 m (Peñas y Rodenas, 2011).

Los problemas asociados a la excavación durante la fase de avance se incrementaron en la fase de destroza. Como consecuencia, se ejecutó la colocación de puntales HEB300 cada 3 m para reducir los desplazamientos y las tensiones en fase de destroza (Fig. 3.31); se cerraron las cerchas en contrabóveda para mejorar el reparto tensional en el túnel, y, tras la destroza, se ejecutó la colocación del sostenimiento y del revestimiento con la mayor rapidez que permitió el proceso constructivo (Peñas y Rodenas, 2011).



Figura 3.31. Fotografía de la colocación de malla de bulones (a) y fotografía de la solera de hormigón armado (b). Tomado de Peña y Rodenas (2011).

Tras la excavación se ejecutó el sostenimiento, que constó, al igual que en la fase de avance, de una malla de bulones autoperforantes de 15 m de longitud (Fig. 3.32). Seguidamente, se colocó la primera impermeabilización del túnel, la colocación de un tubo-dren, y el revestimiento de la contrabóveda mediante el armado y hormigonado de la contrabóveda.

Finalmente, se desmontaron los puntales, se realizó la segunda fase de impermeabilización mediante la colocación de geotextiles en la bóveda y se revistió la misma con el armado y posterior hormigonado (Fig. 3.32).

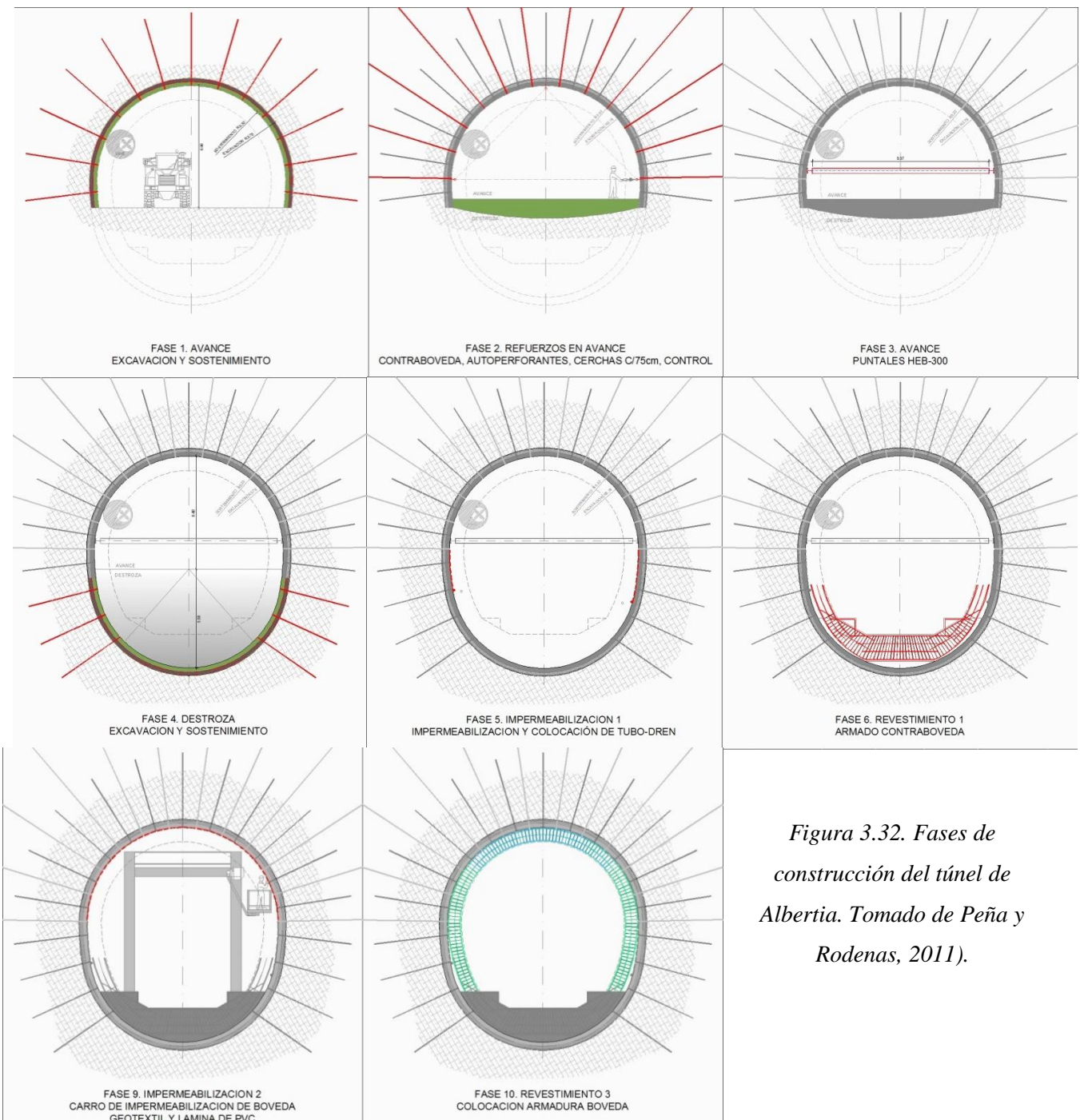
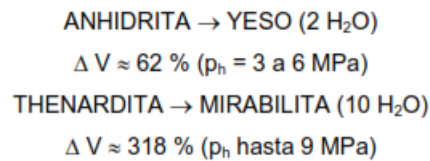


Figura 3.32. Fases de construcción del túnel de Albertia. Tomado de Peña y Rodenas, 2011).

4. Problemática geotécnica derivada de la presencia de anhidrita.

En análisis de los túneles descritos en el apartado anterior, ha permitido elaborar una síntesis de la problemática general causada en la perforación de túneles por la presencia de minerales expansivos, tales como la anhidrita.

El riesgo principal de la presencia de este tipo de minerales viene derivado del potencial hinchamiento en presencia de agua en el que, por ejemplo, la anhidrita se transforma en yeso, aumentando hasta un 62 % su volumen, o la thenardita en mirabilita, caso en que puede llegar a triplicar su volumen (hasta un 318 %):



Como consecuencia, se han llegado a medir presiones de hinchamiento de hasta 6 y 9 MPa, respectivamente.

En los túneles, los problemas relacionados con la expansividad suelen manifestarse a medio y largo plazo, es decir, cuando ya se ha ejecutado totalmente la excavación o incluso cuando ya está en servicio. Este hecho conlleva frecuentemente importantes costes económicos, derivándose de las soluciones técnicas que se suelen requerir.

Los fenómenos expansivos se suelen concentrar en la solera de las perforaciones subterráneas. Esto se explica aludiendo a la descarga tensional que sufre el túnel tras la excavación, más acusada en la solera de las secciones geométricas con forma de herradura, que conduce a la apertura de grietas y al consiguiente incremento de la permeabilidad del macizo. El propio “efecto drenaje” que ocasiona el túnel y la roca más permeable situada bajo la solera provocan la concentración de agua en este sector, favoreciendo la hidratación de anhidrita, thenardita, etc.

Cuando comienzan los levantamientos de la solera del túnel, es muy probable que se generen daños en las instalaciones de drenaje longitudinal, lo que puede provocar un aumento de las filtraciones de agua a la roca y el consiguiente agravamiento del problema. De acuerdo a los túneles analizados, este tipo de problemáticas pueden dar lugar a velocidades de levantamiento de hasta 2mm/día, llegando a medirse levantamientos totales de hasta 800 mm la solera del túnel (Fig. 4.1).

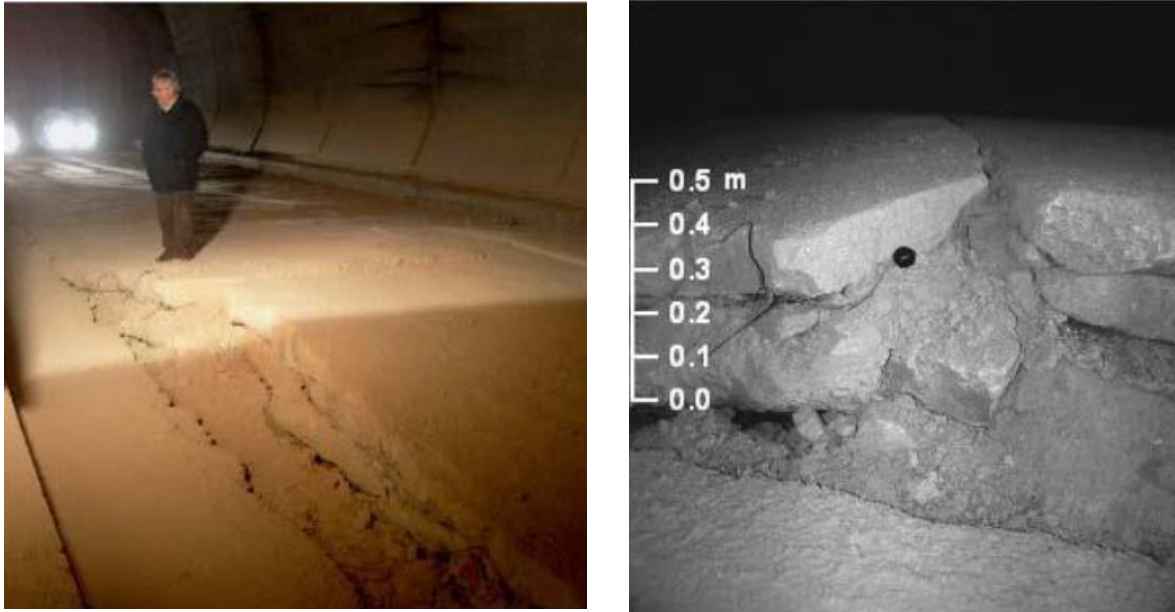


Figura 4.1. Ejemplos de roturas y levantamientos producidos en la solera del Túnel de Lilla.

Tomado de Berdugo (2007).

Además, los materiales en los que se encuentran este tipo de minerales suelen generar otro tipo de problemas geotécnicos en presencia de agua, que adicionalmente pueden dificultar la excavación de los túneles al ocasionarse fenómenos de karstificación, corrosión, lixiviación e, incluso, fluencia a ciertas profundidades.

Estos problemas, aunque generalmente no se estudien con la misma intensidad que los fenómenos de expansión también pueden resultar de gran relevancia. Por ejemplo, en los casos estudiados, los fenómenos de fluencia generaron desplazamientos entre hastiales superiores a 250 mm y velocidades de convergencia de 1-3 mm/día, que en algunos casos llegaron a superar los 20 mm/día. Estos movimientos se evidenciaron, entre otros, en caídas de la gunita, desarrollo de grietas y de desconchones (Peñas y Rodenas, 2011).

5. Soluciones técnicas ante la presencia de anhidrita.

La elección de las soluciones técnicas que permitan subsanar la problemática derivada de la presencia de anhidrita en túneles debe plantearse considerando las diferentes fases de la perforación: sistema de excavación, técnicas de impermeabilización, diseño del sostenimiento-revestimiento.

5.1. Sistemas de excavación.

El método de excavación seleccionado para la perforación del túnel presenta una notable importancia en la aparición de problemas derivados de la presencia de anhidrita. La técnica elegida puede llegar a convertir en crítica la construcción del túnel, bien porque las características geotécnicas del terreno a perforar puedan ser muy deficientes, por la presencia de agua en el macizo, o porque el equilibrio final de la perforación puede verse afectado por las fases anteriores.

En este caso, se considera que los métodos de excavación más idóneos son los convencionales de reducido impacto, tales como el martillo neumático, rozadora y retroexcavadora, mediante el sistema de avance y destroza. El objetivo es que se genere la menor afección a los materiales circundantes y, por tanto, de que la denominada “zona activa” sea lo más limitada posible.

El uso de explosivos se desaconseja ante el riesgo de sobre fracturación del macizo, que provoca un aumento de la permeabilidad del mismo y favorece la precipitación de yeso en las nuevas fracturas.

5.2. Impermeabilización del túnel.

En la actualidad se considera imprescindible diseñar túneles provistos de sistemas impermeabilizantes, bien para evitar filtraciones al interior del túnel, que generarían problemas comunes que afectan a los carriles o catenarias durante la fase de explotación, o bien para impedir que la humedad relativa presente en el túnel pueda filtrarse desde la excavación al terreno circundante. Para ello se utilizan diversos tipos de geosintéticos, generalmente colocados mediante láminas bajo la solera o contrabóveda y en el trasdós del revestimiento a lo largo de bóveda y hastiales.

Ante la presencia de cavidades y/o fisuras o materiales muy permeables se recomienda la aplicación inyecciones de lechada de cemento o micro-cemento a baja presión, a modo de relleno de fracturas en rocas y/o poros en suelos. Este tratamiento permite, además, mejorar el comportamiento del material al aumentar su resistencia, disminuir su deformabilidad y limitar su permeabilidad.

Asimismo, longitudinalmente al túnel se suele desarrollar una circulación de agua en el trasdós del sostenimiento-revestimiento o por la degradación del propio sostenimiento, que puede producir el aporte de agua a zonas con riesgo de disolución o hinchamiento. Para interceptar este flujo se recomienda en aquellas zonas que sea necesario la construcción de sucesivos anillos drenantes que penetren en el terreno a lo largo de la sección del túnel.

5.3. Sostenimiento-revestimiento.

El criterio más extendido para el diseño de secciones resistentes al empuje producido por la expansión de la anhidrita es la ejecución de secciones lo más circulares posible, con el objetivo de evitar la concentración de esfuerzos a lo largo de las mismas. Asimismo, además de la consiguiente ejecución de contrabóvedas, se permite un cierto hinchamiento del terreno con objeto de reducir los empujes sobre el sostenimiento de la perforación. Durante la misma se recomienda aplicar el sostenimiento/revestimiento lo más cerca posible del frente de excavación, además de tratar de limitar al máximo la entrada de agua al terreno.

Sin embargo, la conveniencia de permitir ciertos hinchamientos del terreno con anterioridad a la colocación del sostenimiento o de colocar revestimientos más rígidos o más flexibles ha ido variando en los últimos años. En las primeras excavaciones afectadas por este tipo de problemática se permitía cierto desarrollo del hinchamiento, dejando zonas huecas bajo la solera, mediante la colocación de gravas o materiales de baja densidad con facilidad para comprimirse (Fig. 5.1). Asimismo, se recurría a secciones tipo de sostenimiento flexible, basados en la utilización de *slots*.

Este diseño está cada vez más en desuso, ya que depende de la funcionalidad de los métodos de impermeabilización del túnel y, por tanto, confiando en que la hidratación de la anhidrita será limitada. Únicamente, en el caso de que la impermeabilización sea adecuada la capa compresible es muy útil para repartir cargas y rebajar los momentos flectores. En numerosos casos se ha observado que estos métodos generaban deformaciones asimétricas, e incluso podían llegar a favorecer la entrada de agua al macizo, produciendo un efecto negativo.

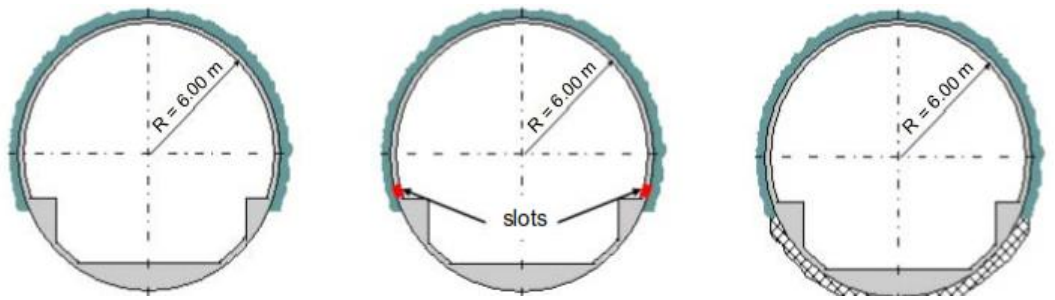


Figura 5.1. Ejemplos de tipos de sección circular utilizados en los tramos de prueba del túnel de Lilla. Sección rígida(a); Sección con slots (b) y sección con espuma de poliuretano (c). Tomado de Berdugo (2007).

Con los avances en los métodos numéricos de modelización, se ha generalizado la colocación de refuerzos en la bóveda y el empleo de contrabóvedas, buscando secciones geométricas circulares, con el objeto de resistir e impedir cualquier tipo de hinchamiento. Las secciones rígidas, a pesar de registrar mayores presiones radiales en los estadios iniciales, resisten con mayor efectividad los efectos expansivos. Esto puede explicarse apelando a que la extensión de la zona activa con esta técnica es menor (Plaza, 2008), así como a que se produce un autosellado inducido por el propio hinchamiento alrededor del túnel (Wittke, 2003).

Finalmente, en función del problema concreto asociado a la expansividad, se pueden aplicar medidas adicionales, tales como la perforación de pilotes, micropilotes o bulones, siempre y cuando no faciliten la circulación de fluidos, ya que en zonas con presencia de agua y minerales expansivos pueden provocar un efecto contraproducente.

En la figura 5.2 se presenta una síntesis de las soluciones técnicas generales más indicadas para la perforación de túneles en presencia de anhidrita.

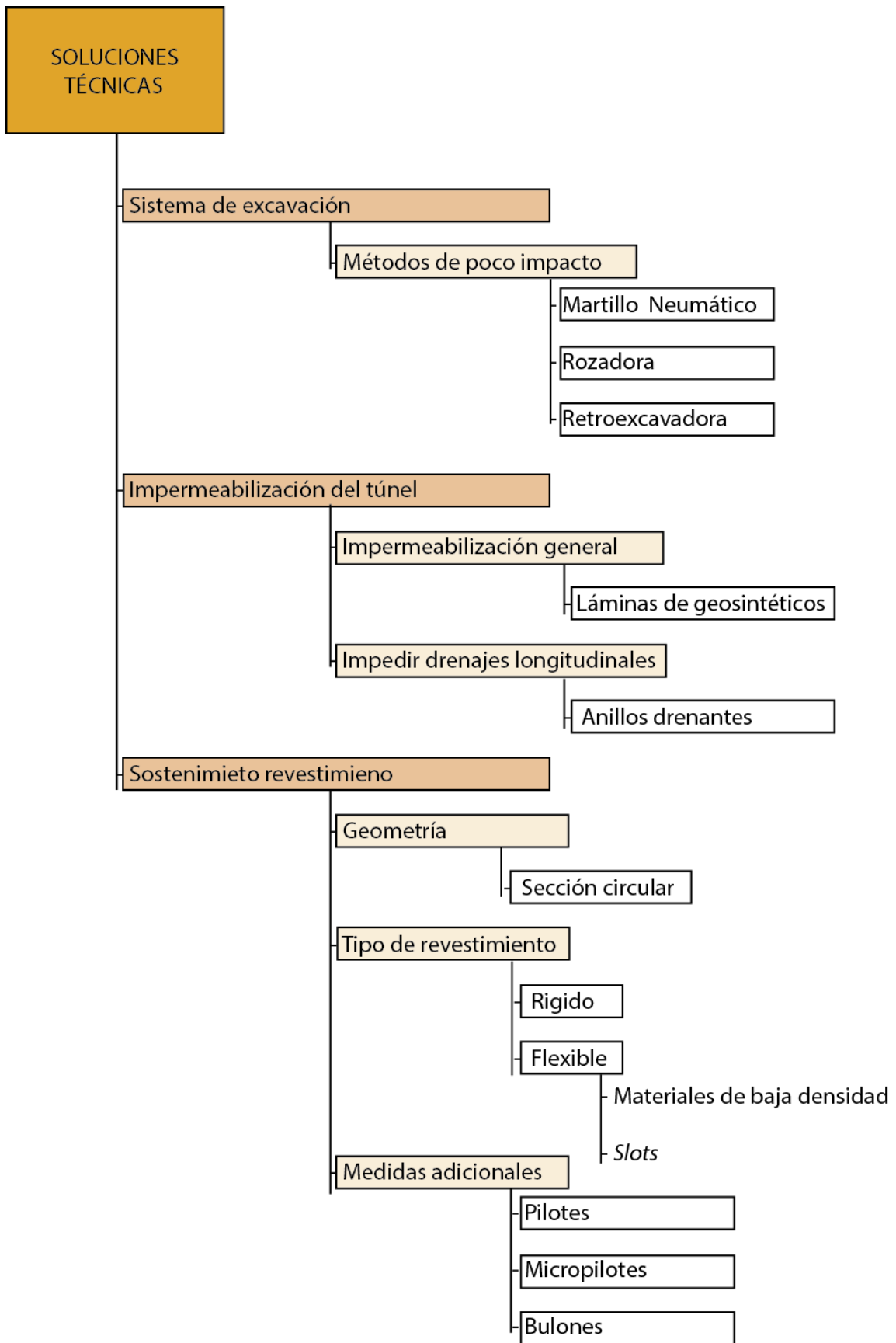


Figura 5.2. Soluciones técnicas indicadas ante la perforación de un túnel en presencia de anhidrita.

6. Protocolo de estudio geológico-geotécnico de un túnel con anhidrita.

El diseño de un túnel en terrenos expansivos requiere la realización de una serie de estudios geológicos, geotécnicos e hidrogeológicos previos que difieren en algunos aspectos de las investigaciones convencionales (Fig.6.3).

6.1. Mineralogía y quimismo.

De forma general, en las obras de ingeniería siempre se ha asumido que el yeso era el único componente salino, hasta que comenzó a constatarse la presencia de otros minerales como halita, glauberita, anhidrita, etc., cuyo comportamiento geotécnico es diferente (solubilidad, hinchamiento, etc.). En los estudios geotécnicos se realizan a menudo descripciones mineralógicas *de visu*, sin precisar la composición real de los minerales.

Por ello, ante la presencia de sales es necesario identificar los tipos y los porcentajes relativos que aparecen en los diferentes materiales y a lo largo de la perforación proyectada. La campaña de prospección del terreno a realizar debe contemplar la realización de sondeos para cuya refrigeración se debe emplear agua no potable o salina, ya que el refrigerante empleado en la perforación puede producir disoluciones importantes y conducir el agua a capas inalteradas profundas. La toma de muestras debe ser cuidadosamente planificada, siendo preceptivo disponer de muestras representativas de todos los litotipos.

Las muestras debenser analizadas en laboratorio, mineralógica, química y mecánicamente. Así, son preceptivos los estudios petrográficos mediante lámina delgada y los estudios de difracción de rayos X que permitan diferenciar minerales, texturas, etc. Además de las determinaciones del contenido en sulfatos se deben realizar ensayos de hinchamiento, y de inundación bajo carga constante, mediante el método Huder-Amberg. Estos últimos se han revelado como los más eficaces a la hora de identificar las presiones de hinchamiento (Deu Lozano, 2008).

6.2. Agua subterránea.

Como es sabido, la transformación de los minerales expansivos está controlada por la variación de temperatura y por la presencia de agua (Fig. 6.1). Asimismo, el quimismo y el tipo de flujo acuoso juega un papel fundamental en los procesos de disolución, precipitación e hinchamiento.

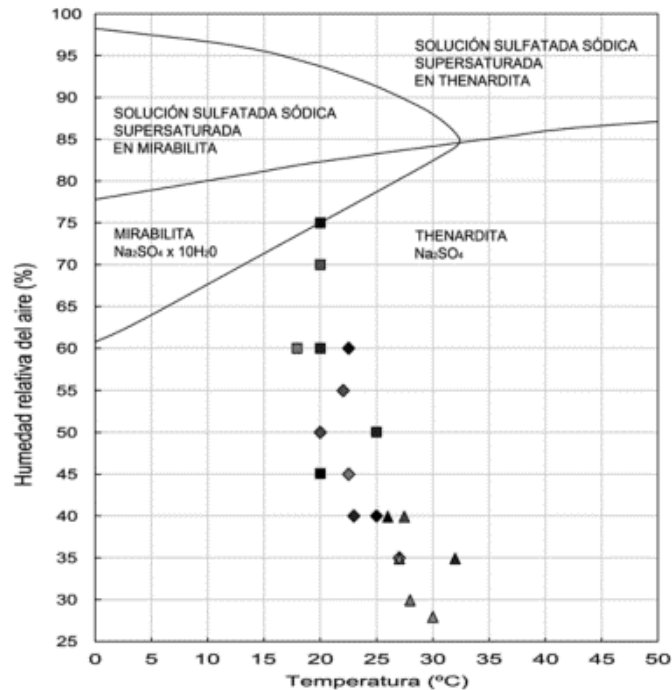


Figura 6.1. Variación de los compuestos salinos en función de la humedad relativa del aire y de la temperatura. Tomado de González (2011).

Así, además de la propia mineralogía, resulta esencial determinar el contexto hidrogeológico (distribución y tamaño de fallas, cavidades kársticas, u otras estructuras que puedan constituir caminos preferenciales para la circulación del agua) y el tipo de circulación de las aguas subterráneas.

La movilidad del agua freática resulta decisiva para estimar su estabilidad respecto a la roca por la que circula o se almacena. Son diferentes los sistemas para hacerlo, si bien el más utilizado es el ensayo de isótopos de tritio. La técnica no está exenta de dificultad, dado que hay que asegurarse de que las muestras corresponden a un mismo acuífero. A partir de los datos obtenidos se deben realizar estudios que permitan definir 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 o facilitar la evaporación del agua circundante al túnel. No obstante, es conveniente realizar diagramas de estabilidad del agua con respecto a sulfatos de calcio y sodio, que permitan conocer si dicha muestra puede provocar disolución o precipitación de estos compuestos.

6.3. Bases de diseño y construcción.

El diseño y la construcción del túnel deben asegurar la estabilidad y durabilidad del sostenimiento-revestimiento del túnel en el ambiente agresivo en que va a aplicarse. Asimismo, es necesario asegurar su estabilidad en aquellas zonas donde podrán desarrollarse fenómenos de expansión.

El sostenimiento-revestimiento debe reunir una serie de características que lo hagan especialmente indicado para este tipo de entornos:

- Resistencia a la acción de sales y sulfatos
- No facilitar el desarrollo de juntas o fisuras que puedan permitir el paso del agua freática.
- Resistencia de los elementos metálicos a la corrosión por cloruros.
- Incluir sistemas para la introducción de una capa protectora de material sintético o resistente a las sales.
- Resistencia a las presiones de hinchamiento estimadas.

La estabilidad en el entorno al túnel depende en gran medida del control del flujo acuoso longitudinal que se suele generar en torno a los muros. Este aspecto es corregible mediante costillas o coronas transversales en el perímetro del túnel que impidan esta circulación. Si el movimiento de agua freática es muy reducido, el agua se mantendrá saturada y no progresará el ataque al sostenimiento ni al macizo rocoso circundante.

La geometría óptima para la sección del túnel es la circular (Fig. 6.2), dado que evita la concentración de esfuerzos en puntos concretos del perímetro del mismo. Asimismo, se debe optar por técnicas de excavación lo menos “destructivas” posibles para preservar el macizo rocoso circundante a la excavación, y posteriormente realizar el encofrado de la sección con hormigón armado, comenzando con la contrabóveda.

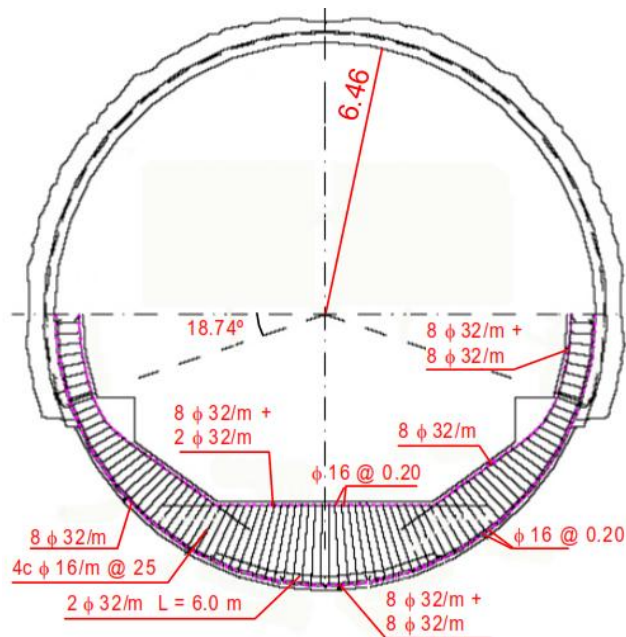


Figura 6.2. Ejemplo de sección tipo de un túnel excavado en terreno con minerales expansivos, con el revestimiento de la contrabóveda de hormigón armado. Tomado de Alonso y Ramón (2011).

6.4. Sistemas de auscultación.

Un túnel excavado en anhidrita debe ser instrumentado para medir la evolución de las presiones radiales totales en el contacto roca-revestimiento, las tensiones dentro de la contrabóveda y de la bóveda, y la distribución de desplazamientos en la contrabóveda, tanto durante la construcción del túnel como tras la ejecución final.

La auscultación proporciona información de gran valor tanto para el control de la excavación en sí, como para el control de las afecciones en el entorno de la misma. Esta información permite evaluar el estado de las obras en sus distintas fases, realizando la comparación entre el comportamiento real y el previsto. Se posibilita de esta forma la toma de decisiones, así como el diseño y aplicación de las medidas correctoras en caso necesario.

La finalidad de la auscultación durante la fase de ejecución del túnel es poder tener un conocimiento más amplio del problema de estudio, que permitirá el control de las hipótesis asumidas en los cálculos y el ajuste continuo de las mismas. En esta fase, el sistema de auscultación implantado será el indicativo de la seguridad de la obra, permitiendo detectar los primeros síntomas de inestabilidad o de situaciones anómalas y disparar las alarmas en los casos necesarios.

La instrumentación debe constar de células de presión total radiales y tangenciales, cuya finalidad es medir la presión existente en el contacto sostenimiento-terreno; extensómetros de cuerda vibrante en el hormigón, en las caras sometidas a compresión y a extensión, que permitirán comprobar el estado tensional de las piezas armadas a partir de las deformaciones que éstas registran, así como extensómetros incrementales embutidos en perforaciones verticales, que permitirán conocer la profundidad en que se producen los hinchamientos y un valor de las presiones del terreno más allá de la zona de contacto.

Es conveniente que dicha instrumentación se disponga en diferentes secciones de control, situadas cada 25 metros en las zonas con mayor peligro de expansividad, lo que permitirá un análisis más detallado de los fenómenos en curso y el contraste de la información obtenida.

Además, se establecerá un plan de lecturas de instrumentación, cuya frecuencia de lecturas dependerá de la intensidad de las presiones de hinchamiento a las que esté sometido el túnel, pudiendo llegar a realizar lecturas de forma diaria, debiéndose mantener la misma hasta el momento en el que la variación entre lecturas haya disminuido lo suficiente como para justificar una reducción de esa frecuencia, sin que ello signifique una reducción de la seguridad en la obra y garantizando asimismo que las mediciones efectuadas permitan una representación clara de la evolución temporal.

Dichas lecturas continuarán, disminuyendo la frecuencia de forma progresiva, hasta que se observe una estabilización de los procesos expansivos, lo que permitirá conocer la evolución de la tensión en la estructura construida y el comportamiento del macizo.

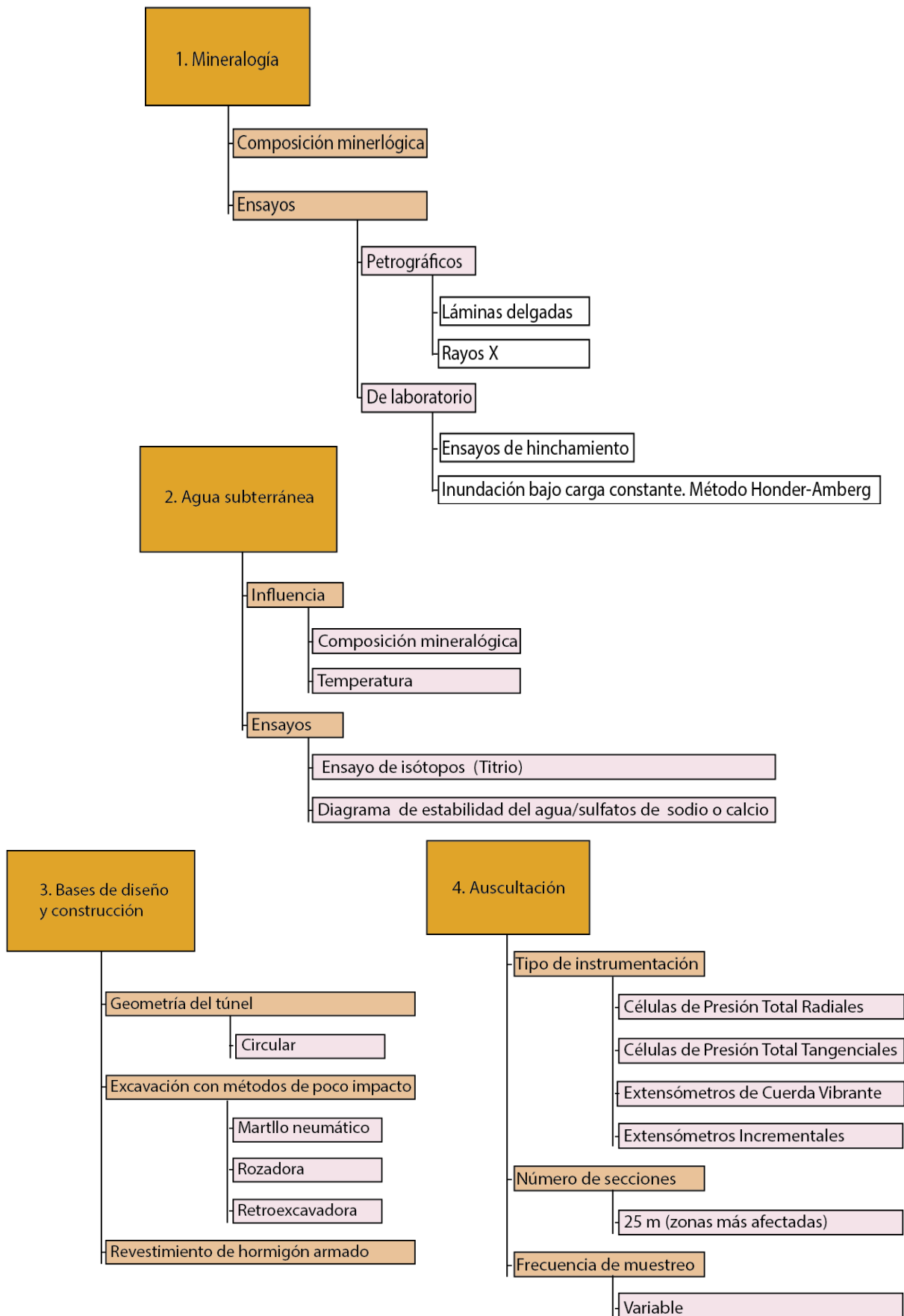


Figura 6.3. Resumen esquemático del protocolo de estudio geológico – geotécnico para la construcción de un túnel en un terreno con anhidrita.

7. Conclusiones.

La anhidrita, cuya composición química es sulfato cálcico anhidro (CaSO_4), en presencia de agua puede transformarse en yeso ($\text{CaSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$). Este proceso implica una disolución y una posterior cristalización que conlleva un importante incremento de volumen. Las hipótesis más actuales para explicar la conversión anhidrita - yeso apuntan a tres mecanismos principales: (i) la precipitación de minerales sulfatados en las fisuras como consecuencia de cambios de temperatura en presencia de aguas ricas en sulfatos; (ii) el crecimiento de minerales en las fisuras debido a la evaporación de soluciones acuosas; (iii) fenómenos osmóticos e intercambios catiónicos en la fracción arcillosa en presencia de aguas ricas en sulfatos.

El proceso de hidratación de la anhidrita puede llegar a prolongarse durante varios años, por lo que sus consecuencias en las excavaciones subterráneas pueden evidenciarse a medio y largo plazo. Este hecho conlleva frecuentemente importantes costes económicos, consecuencia de las soluciones técnicas que se suelen requerir.

En túneles excavados en España se ha observado que minerales como la anhidrita o la thenardita presentan un gran potencial de hinchamiento en presencia de agua, llegando a aumentar su volumen hasta un 62 % y 318 %, respectivamente, concentrándose principalmente en la solera de las excavaciones subterráneas.

Por tanto, el diseño de un túnel en terrenos expansivos requiere la realización de una serie de estudios geológicos, geotécnicos e hidrogeológicos previos que difieren en algunos aspectos de las investigaciones convencionales.

La campaña de prospección del terreno, y la toma de muestras debe ser cuidadosamente planificada, siendo preceptivo disponer de muestras representativas de todos los litotipos. Éstas deberán ser analizadas en laboratorio, mineralógica, química y mecánicamente. Así, son preceptivos los estudios petrográficos mediante lámina delgada y los estudios de difracción de rayos X que permitan diferenciar minerales, texturas, etc.

La movilidad del agua freática resulta decisiva para estimar su estabilidad respecto a la roca por la que circula o se almacena. Son diferentes los sistemas para hacerlo, si bien el más utilizado es el ensayo de isótopos de tritio. A partir de los datos obtenidos se deben realizar estudios que permitan definir las direcciones de flujo, los gradientes, etc. a cota de túnel, así como cursos de agua, etc. Además, es conveniente realizar diagramas de estabilidad, para conocer la capacidad de disolución o precipitación de dichas aguas.

Las soluciones técnicas que permitan subsanar la problemática derivada de la presencia de dichos materiales en túneles, debe plantearse considerando las diferentes fases de la perforación: sistema de excavación, técnicas de impermeabilización, diseño del sostenimiento-revestimiento.

El método de excavación más adecuado para la perforación de este tipo de túneles son los convencionales de reducido impacto, tales como el martillo neumático y rozadora , mediante el sistema de avance y destroza. El objetivo es que se genere la menor afección a los materiales circundantes.

Para la impermeabilización del túnel, se utilizan diversos tipos de geosintéticos, colocados mediante láminas, generalmente, bajo la solera o contrabóveda y en el trasdós del revestimiento a lo largo de bóveda y hastiales. En el caso de que exista la presencia de cavidades y/o fisuras o materiales muy permeables se pueden realizar inyecciones de lechada de cemento o micro-cemento a baja presión, mejorando así el comportamiento del material al aumentar su resistencia, disminuir su deformabilidad y limitar su permeabilidad.

Asimismo, en el caso de que exista el riesgo de generarse una circulación de agua longitudinal al túnel, se recomienda en aquellas zonas que sea necesario la construcción de sucesivos anillos drenantes que penetren en el terreno a lo largo de la sección del túnel.

El criterio más extendido para el diseño de secciones resistentes al empuje producido por la expansión de la anhidrita es la ejecución de secciones lo más circulares posible, con el objetivo de evitar la concentración de esfuerzos a lo largo de las mismas. Asimismo, además de la consiguiente ejecución de contrabóvedas, se permite un cierto hinchamiento del terreno con objeto de reducir los empujes sobre el sostenimiento de la perforación. Durante la misma se recomienda aplicar el sostenimiento/revestimiento lo más cerca posible del frente de excavación, además de tratar de limitar al máximo la entrada de agua al terreno.

Los túneles en anhidritas debenser instrumentado en distintas secciones, para medir la evolución de las presiones radiales totales en el contacto roca-revestimiento, las tensiones dentro de la contrabóveda y de la bóveda, y la distribución de desplazamientos en la contrabóveda, tanto durante la construcción del túnel como tras la ejecución final.

8. Bibliografía:

Alonso, E. E.: Alcoverro, J.(2004).“Swelling and degradation of argillaceous rocks.”*International conference on problematic soils*, Recife, pp.951-969.

Alonso, E. E. & Berdugo, I. R. (2005). “Expansive behaviour of sulphate-bearing clays.”*International conference on problematic soils*, Famagusta, pp. 477–498.

Alonso, E.E. & Berdugo, I. (2006). “Degradation and swelling of sulphate-bearing claystones.” *VI CSAMR*, Cartagena de Indias.pp. 211-248.

Alonso, E. E., Berdugo, I. R., Gens, A. & Romero, E. E. (2004). “Expansive phenomenon in an instrumented tunnel excavated in anhydritic-gypsiferous argillaceous rocks.”*Engineering & 53rd Geomechanics*, pp: 241-244.

Alonso, E.E., Berdugo I.R., Tarragó, D. & Ramon, A. (2007). “Tunnelling in sulphate claystones.”*14th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Madrid, Millpress, Rotterdam,1, pp. 103-122

Alonso, E. E., Olivella, S. & Arnedo, D. (2006). “Mechanisms of gas transport in clay barriers”. *Journal of Iberian Geology* 32. pp. 175-196.

Alonso, E., & Ramón, A. (2011). “El túnel de Lilla” *Jornada Técnica sobre Túneles en Terrenos Salinos y Expansivos*. Barcelona, pp. 57 – 89.

Amstad, C.& Kovari, K. (2001). “Untertagbau in quellfähigem ”*Fels. Forschungsbericht 482 Vereinigung Schweizerischer StraBenfachleute*, Zürich, German,pp. 226

Anadón, P. (1989). “Los sistemas lacustres del Eoceno superior y Oligoceno del sector oriental de la cuenca del Ebro.”*Acta Geologica Hispanica*, Vol.24, nº9-4, pp.205-30.

Arlandi, M. (2011). “Túneles en yesos y anhidritas: diversas experiencias en España.” (2011).*Jornada Técnica sobre Túneles en Terrenos Salinos y Expansivos*.Barcelona, pp. 113 – 129.

Berdugo, I.R., (2007). *Tunnelling in sulfate bearing rocks - expansive phenomena*.Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña.

Correas, R. (2015). *Líneas ferroviarias en terrenos evaporíticos. Medidas a adoptar en fase de proyecto, obra y explotación frente a los procesos de disolución*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Barcelona.

Campo, J.M.; Guerra, J.C.; Fernández-Ordóñez, D. (2012). "Analysis of the phenomenon of material expansiveness in tunnels built in anhydrite. Outcomes and experiences" *Materiales de construcción*. Vol. 62, 308, pp.583-595.

Deu Lozano, A.(2008). *Estudio experimental del crecimiento de minerales sulfatados en argilitas anhidrítico-yesíferas*. Tesina d'Especialitat de Enginyeria del Terreny, Cartogràfica i Geofísica. Facultad de Geología. Universidad Politécnica de Cataluña.

Dirección General de Grandes Proyectos ADIF (2011). "Propuesta y seguimiento de las medidas de seguridad estructural en la construcción de los túneles." *Jornadas técnicas sobre: Túneles Ferroviarios en el País Vasco*, Bilbao, pp 12 – 23.

Einfalt, H. C. (1975). "Ergebnisse der Untersuchungen an den Calciumsulfaten aus dem Gipskeuper Stuttgarts." *Ministerium für Wirtschaft, Mittelstand und Verkehr* (in German).

Einfalt, H. C. (1979). "Umwandlung von Anhydrit in Gips: Mechanismus und Einflussfaktoren." *Ber. Nat. Tag. Ingenieurgeologie*. Fellbach, in German, nº 2, pp. 153–158

Einfalt, H. C. & Götz, H. P. (1976). "Behaviour of anhydrite after addition of water." *Bulletin of Engineering Geology and the Environmental*, nº 13, pp. 69–70.

Esteban, F. (1990). *Caracterización experimental de la expansividad de una roca evaporítica: Identificación de los mecanismos de hinchamiento*. Tesis doctoral, Universidad de Cantabria, España.

Esteban, F. (1990). "Fenómenos de hinchamiento de formaciones margo-yesíferas de la cuenca del Ebro." *Ingeniería Civil, Cedex*, nº. 77, pp. 87-97.

García-Castellanos, D., Vergés, J., Gaspar-Escribano, J. & Cloetingh, S. (2003). "Interplay between tectonics, climate, and fluvial transport during the Cenozoic evolution of the Ebro Basin (NE Iberia)," *Journal of Geophysical Research*., nº 108(B7), pp. 23-47.

González, V.(2011). "El túnel del Regajal. Procedimientos constructivos aplicados." *Revista de Obras Públicas*, nº 3.522. pp. 55 – 74.

Gullón, J. (2016): *Estudio experimental del crecimiento de minerales sulfatados en argilitas anhidrítico-yesíferas*. Trabajo de Fin de Grado en Ingeniería Minera. Escuela Superior y Técnica de Ingenieros de Minas. Universidad de León.

Madsen, F.T., Flückiger, A., Hauber, L., Jordan, P., Voegtli, B., (1995). "New investigations on swelling rocks in the Belchen tunnel, Switzerland." *8th International Congress on Rock Mechanics*. Tokyo, Japan, pp. 263–267.

Madsen, F. T. & Nuesch, R. (1991). "The swelling behaviour of clay-sulfate rocks." *7th International Congress of Rock Mechanics*, Aachen1, pp. 285–288.

Marí, A., & Pérez, G. A. (2003). "Refuerzo del revestimiento de los túneles de Lilla y Camp Magré para la Línea de Alta Velocidad Madrid-ZaragozaBarcelona-Frontera Francesa. Tramo Lleida-Martorell. Provincia de Tarragona".

Martínez-Torres, L. M. (1989): *El manto de los mármoles (Pirineo Occidental): geología estructural y evolución geodinámica*. Tesis Doctoral, Universidad del País Vasco. pp. 294

Mayoral Alfaro, E.& Abad de los Santos, M.(2008). "Geología de la Cuenca del Guadalquivir". En: *Olías Álvarez, M., et al.: "Geología de Huelva: lugares de interés geológico"*. 2ª ed. Huelva : Universidad de Huelva,. pp. 20-27

Nüesch, R., Steiner, W. & Madsen, F.T. (1995). "Longtime swelling of anhydritic rocks: Mineralogical and microstructural evaluation." *8th International Congress of Rock Mechanics*, Vol 1, pp. 133-138.

Nüesch, R. & Ko, S.C. (2000). "Influence of mineralogical composition to experimental swellingbehaviour of shaley anhydrite clay." *Applied mineralogy, Rammlmair et al (ed), Balkema*. pp. 611-616.

Ortí, F. (1977). "Aproximación al estudio petrográfico de las microestructuras de las rocas de yeso secundario y a su origen". *Revista del Instituto de Investigaciones Geológicas de la Diputación Provincial de Barcelona*, Vol. 32, pp.87-152.

Pan, Y; Dong, J. (1991). "Time dependent tunnel convergence I: formulacion of the model." *International Journal of Rock Mechanics*. London. Vol 28, nº 6, pp.469- 475.

Peña, L., y Ródenas, C.(2011). "Los túneles de Albertia: problemas de fluencia y anhidritas expansivas". *Revista de Obras Públicas*, nº 3.525, pp. 1 – 16.

Plaza, A.: *Análisis del comportamiento de un túnel excavado en rocas altamente expansivas*.(2008). Tesina d'Especialitat de Enginyeria del Terreny. Facultad de Geología. Universidad Politécnica de Cataluña.

Rauh, F.; Spaun, G.; Thuro, K. (2006). "Assesment of the swelling potential of anhydrite in tunneling projects", *The Geological Society of London. IAEG Engineering geology for tomorrow´s cities*.

Rodriguez, J.M. (2011). "Túneles en terrenos salinos – El túnel de El Regajal". *Jornada Técnica sobre Túneles en Terrenos Salinos y Expansivos*. Barcelona, pp. 3 – 41.

Sandoval J. G. (2008): *Estudio de la convergencia por fluencia de túneles circulares en medios viscoelásticos plásticos*. Tesis Doctoral, ETS Caminos, Canales y Puertos Madrid. pp. 324.

Steiner, W. (1993). "Swelling rock in tunnels: rock characterization, effect of horizontal stresses and construction procedures. " *International Congress of Rock Mechanics* Vol.30, No. 4, pp. 361–380.

Sulem, J; Panet, M; Guenot, A. (1987). "An analytical solution for time - dependent displacement in a circular tunnel. " *International Journal of Rock Mechanics* London (GB), Vol 24, nº 3. pp. 155- 164.

Tauler, E., Tarragó, D., Berdugo, I., Deu, A. & Melgarejo, J.C. (2006). "Argilitas expansivas de un túnel del tren de alta velocidad (Barcelona - Lérida)." *Revista de la Sociedad Española de Mineralogía*, nº 6, pp. 479-482.

Wittke, W. (2003): "Begrenzung der Quelldrücke durch Selbstabdichtung beim Tunnelbau im anhydritführenden Gebirge". *WBI*. Print 13 Vol.2. pp. 112.