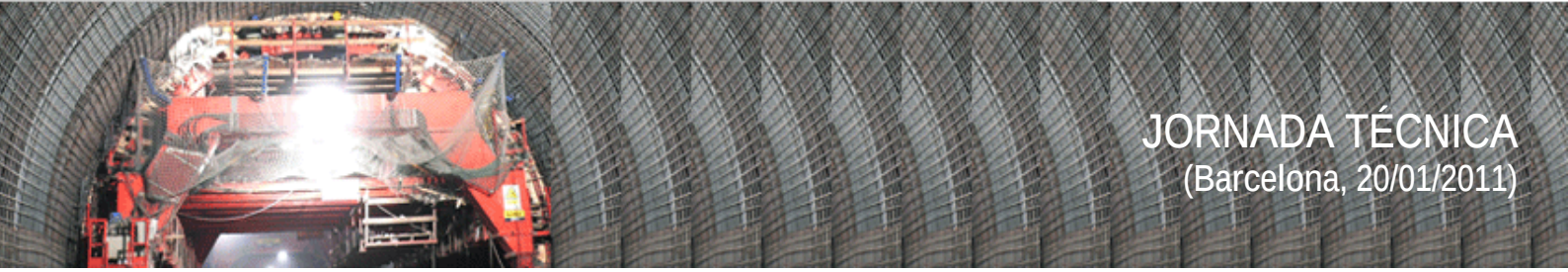


Túneles en terrenos salinos y expansivos

Auditorio del Edificio Vértex
Campus Nord-UPC
Pl. Eusebi Güell nº 6, Barcelona 08034

PROGRAMA

09.00-09.15	*Inauguración de la jornada* **Eduardo Alonso** (UPC, Barcelonaa)
09.15-10.00	*New comprehensive model for swelling of anhydritic rocks and corresponding design concept* **Walter Wittke** (WBI Gmbh, Alemania)
10.00-10.45	*El túnel del Regajal (LAV Madrid-Valencia) en formaciones salinas miocenas de la cuenca del Tajo* **José Mª Rodríguez Ortiz** (UPM, Madrid)
10.45-11.30	Pausa café
11.30-12.15	*Tunnelling in swelling rocks* **Georg Anagnostou** (ETH Zurich, Suiza)
12.15-13.00	*El túnel de Lilla* **Eduardo Alonso** (UPC, Barcelona)
13.00-14.30	Comida
14.30-15.15	*Tunnel design and construction practice: Technical solutions in swelling ground* **Thomas Marcher** (ILF, Innsbruck, Austria)
15.15-16.00	*Túneles en yesos y anhidritas* **Manuel Arlandi** (Geoconsult, Madrid)
16.00-16.30	*Mesa Redonda*
16.30-16.45	*Clausura* **Eduardo Alonso** (UPC, Barcelona)

AULA | PAYMACOTAS
INGENIERIA DE TUNELES

Jornada Técnica: Túneles en terrenos salinos y expansivos
Barcelona, 20 de Enero de 2011

TÚNELES EN YESOS Y ANHIDRITAS: DIVERSAS EXPERIENCIAS EN ESPAÑA

Manuel ARLANDI RODRIGUEZ
Geoconsult

ABSTRACT: España es un país con importante presencia de terrenos evaporíticos y salinos. Desde época romana, estos materiales han sido objeto de excavación subterránea en nuestro país. Por ello, se dispone de abundante experiencia respecto su comportamiento geotécnico. La característica más llamativa es quizás el poder expansivo de algunos de estos materiales, pero a ellos se asocian también otro tipo de riesgos y comportamientos geotécnicos. En el presente artículo se describe de manera general algunos de los riesgos geotécnicos observados en España en las recientes obras de túneles abordadas sobre terrenos salinos y evaporíticos.

1 INTRODUCCIÓN Y ASPECTOS GENERALES

La geología española ofrece numerosos afloramientos de terrenos salinos y evaporíticos. El mapa adjunto refleja la ubicación de las zonas con mayor concentración de afloramientos.

Desde el punto de vista geológico, los afloramientos más importantes se localizan en tres dominios geológicos principales:

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

Son principalmente abundantes en la mitad oriental del país, tal como puede apreciarse en el mapa adjunto (Fig. 1).

Los primeros indicios de trabajos subterráneos de estos materiales se remontan a época romana, con los minados subterráneos de placas de yeso transparente (lapis specularis), en la provincia de Cuenca (Fig. 2). La sal y el yeso han sido objeto continuo de trabajo desde entonces, especialmente con fines mineros.

Figura 1: Zonas de España donde se concentran los principales yacimientos evaporíticos y salinos.

Figura 2: Minado romano de yeso (Cuenca. España).

En época actual se han abordado en nuestro país numerosas obras de infraestructura lineal, principalmente las líneas de alta velocidad ferroviaria y las autopistas. En estas obras se han experimentado numerosos riesgos geotécnicos asociados a la excavación de túneles en estas litologías. El más llamativo de todos es la expansividad por hidratación, o los fenómenos de creep, pero se han observado otros, que también han supuesto riesgos de diversa índole: carstificaciones, presencia de gases, subsidencias, etc.

2 RIESGOS GEOTÉCNICOS EN TÚNELES ESPAÑOLES

2.1 Casuística observada en España

La literatura técnica española menciona con relativa frecuencia los riesgos asociados a la expansividad de las anhidritas, por tratarse del riesgo geotécnico que ha tenido mayor repercusión económica y mediática. Pero nos son los únicos riesgos que se han observado. De manera sintética, se pueden mencionar los siguientes:

- **Expansividad por hidratación de las anhidritas o sales sódicas (glauberita, thenardita, etc.):** estos minerales, al entrar en contacto con el agua, sufren un proceso de hidratación que incrementa su volumen, lo que a su vez provoca un importante incremento de tensión sobre los sostenimientos y revestimientos de túneles.
- **Presencia de carstificaciones y minados**: las evaporitas y sales suelen ser solubles, de manera que pueden desarrollar fenómenos de carstificación. Por otro lado, estos materiales han tenido siempre interés económico para el ser humano, de modo que es relativamente frecuente localizar antiguos minados en estos terrenos.
- **Capas colapsables de baja compacidad**: algunos terrenos sedimentarios presentan matrices salinas o yesíferas, que a veces se disuelven por acción del agua. Este proceso resta compacidad y resistencia a las capas que sufren este fenómeno.
- **Presencia de gases**: en determinados ambientes fisicoquímicos o por acción bacteriana, los minerales sulfatados se descomponen, generando gases sulfhídricos o anhídridos, que ocupan la porosidad o huecos generados por carstificación. Estos gases son tóxicos, pudiendo provocar incidentes en las obras si se liberan en la atmósfera del túnel.
- **Deshidratación del yeso en el proceso de excavación mecánica**: en algunos túneles excavados con tuneladora se ha observado que el calor desprendido por el proceso de corte del terreno, generado al rozar los útiles de corte de la cabeza de la máquina con el terreno, deshidratan el yeso, transformándolo en hemiedrita (escayola). Este material deshidratado se acumula en la cámara de excavación. Si entra en contacto con agua (del terreno o de operación de la máquina), se rehidrata, formándose bloques amalgamados de yeso, que dificultan el desescombrado y reducen el rendimiento de excavación de la tuneladora.

  Agresividad química de las aguas subterráneas sobre el hormigón del sostenimiento y revestimiento.
- **Desprendimiento de techos planos**: es muy frecuente que el yeso o las sales presenten unas estructura estratificada muy laminada, sin cohesión entre capas. Cuando se excavan estos macizos, con frecuencia se desprende el techo, generando importantes sobre-excavaciones (Fig. 3).

En los apartados que se incluyen a continuación, se relatan algunos casos que ilustran en detalle estos riesgos.

Figura 3: Techos planos en un antiguo túnel.

2.2 Túneles en Anhidrita

En los diseños actuales empleados en España para el sostenimiento y revestimiento de túneles en anhidritas o materiales salinos expansivos, se han analizado de manera previa dos enfoques técnicos diferentes:

- Diseñar un anillo de sostenimiento y revestimiento, de alta capacidad resistente, generalmente conformado con potentes contrabóvedas y revestimientos de hormigón armado. El anillo se diseña para resistir los empujes previsibles.
- Dejar que el terreno se expansione, reduciendo los empujes. En la práctica se diseña creando una capa deformable bajo la contrabóveda, a modo de colchón de expansión. Es una idea tradicional, retomada en tiempos recientes por Kovari.

En principio, ambas soluciones tienen ventajas e inconvenientes. La solución de resistir los empujes es la que se está empleando con mayor frecuencia en Alemania y en España. La solución de capa colchón, aunque se ha previsto en algunos proyectos españoles, finalmente no se ha puesto en práctica, ya que dicha capa es de difícil construcción y puede permitir la concentración de agua bajo la contrabóveda, agravando el problema.

En la práctica, uno de los problemas principales a la hora de abordar el diseño de un túnel en anhidritas es el de determinar la presión de hinchamiento que se aplicará en los cálculos estructurales.

El primer problema al que hay que enfrentarse es a la propia detección de la anhidrita. La confirmación de la presencia del mineral es relativamente fácil de realizar, empleando difracción de Rayos x, Petrografías, etc. Pero la determinación del porcentaje real de anhidrita en el terreno no es una tarea tan sencilla.

El caso más simple es cuando el macizo es heterogéneo, con presencia de anhidrita como único mineral en el total de su masa. En este caso, cualquier muestra ensayada presenta un 100 % de anhidrita, al igual que el macizo. Por ello, los resultados obtenidos mediante los ensayos de hinchamiento permiten evaluar de modo más preciso la presión real potencial de expansión.

Pero son frecuentes los casos de macizos heterogéneos en los que, además de anhidrita, aparezca yeso, arcilla, sales y carbonatos, en proporciones variables. En este caso, aunque se seleccionen muestras para ensayos de hinchamiento que presenten altos porcentajes de anhidrita, la asignación de la presión obtenida al macizo no es automática, ya que el porcentaje real de mineral en el conjunto del macizo no suele ser el mismo que en la muestra ensayada. En estos casos, es conveniente que la muestra tenga el mayor porcentaje posible de anhidrita, con el fin de que la presión que se obtenga sea un valor mayorado.

En España se emplean diversos tipos de ensayos de laboratorio sobre muestras de terreno obtenidas en sondeo o del frente de excavación del túnel. En general se trata de ensayos de presión de hinchamiento en edómetro, de la mayor duración posible. También es muy frecuente la realización de ensayos de inundación bajo carga constante (método Huder-Amberg). En algunos proyectos, las muestras se han ensayado por periodos superiores a los cuatro años.

Las presiones de expansión que se obtienen dependen fundamentalmente del tipo de muestra ensayada, molida o natural. En ensayos realizados en España sobre el mismo tipo de material, las muestras molidas han llegado a presentar valores de uno a dos órdenes de magnitud superiores a las de muestra naturales inalteradas.

Salvo excepciones notables, relatadas en la literatura técnica reciente, la experiencia en España muestra que los fenómenos de hinchamiento en general no se producen a corto plazo. Por dar un orden de magnitud, podría indicarse que lo habitual es que estos fenómenos tarden entre 5 y 10 años en desarrollarse.

En general, las observaciones muestran que los problemas estructurales en los túneles se concentran en la contrabóveda o solera. La bóveda se sostiene con sostenimientos moderados. Si el macizo es de buena calidad, puede sostenerse con espesores de gunita del orden de 10 a 15 cm.

Es importante realizar una excavación que no genere fisuración el terreno del contorno inmediato del túnel. Dado que la anhidrita y los materiales que suelen acompañarla (yesos, argilitas, carbonatos, etc.) son relativamente blandos, es recomendable la excavación mecánica (rozadora, retroexcavadora, tuneladora, etc.). La voladura puede emplearse en el núcleo de la excavación, realizando excavación mecánica en una franja de unos 0,5 – 1 m bajo el contorno del túnel.

A continuación se presenta el caso del túnel carretero Fabares. En su perfil longitudinal se incluyen terrenos jurásicos y triásicos de Facies Keuper. Cabe destacar un tramo de unos 40 metros, con presencia de anhidrita, que incluye una gran capa homogénea, de unos 10 - 15 metros de potencia, en este material. La zona presenta una cobertera de unos 90 m. En el croquis adjunto se esquematiza la estructura geológica del tramo mencionado (Fig. 4).

Para excavar esta zona se adoptaron las máximas precauciones para evitar el agua. Se evitó la colocación de bulones, ya que se temía que durante la perforación de los taladros para alojar a los mismos, se introdujese agua en el terreno. Se abordo la excavación de este tramo en sentido ascendente, para no llevar agua hacia el frente. La excavación se realizó

mecánicamente, para evitar que las voladuras fisurasen el contorno del túnel, y de ese modo facilitasen la circulación de agua por el terreno.

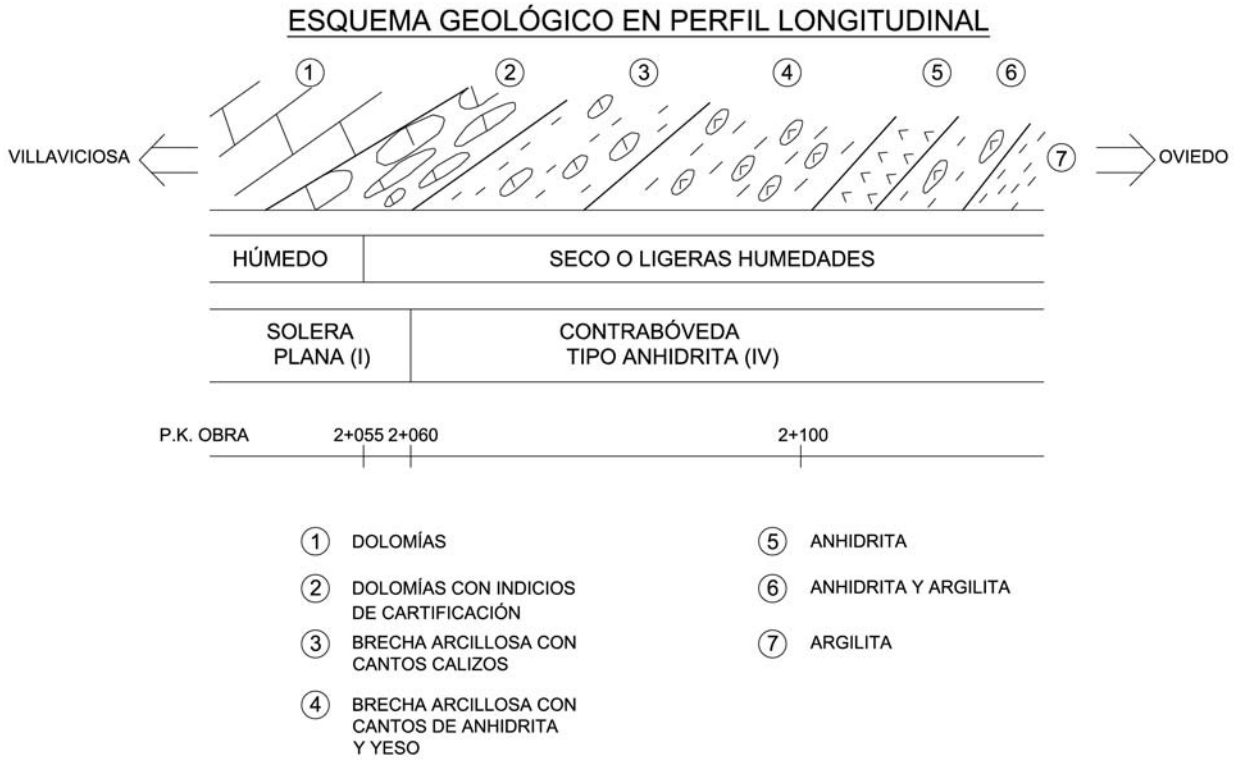


Figura 4: Perfil longitudinal del tramo anhidrítico del Túnel de Fabares.

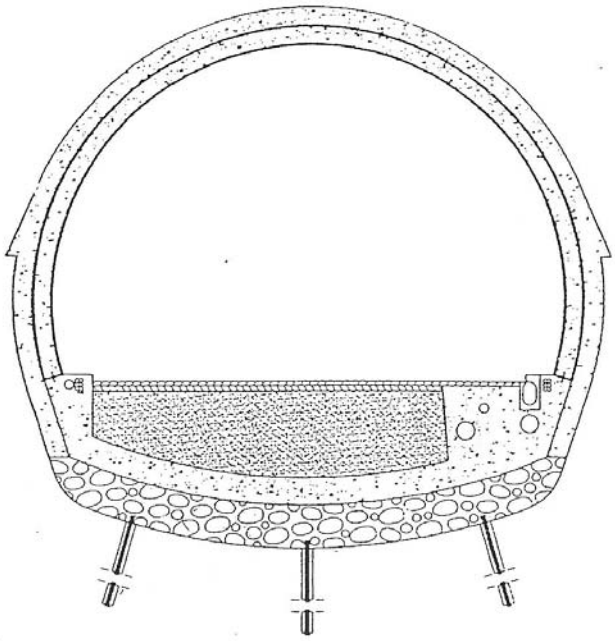


Figura 5: Sección originalmente proyectada para la zona de anhidrita del Túnel de Fabares. En la zona inferior de la contrabóveda se disponía una capa “colchón” constituida por balasto.

El proyecto original definía para este túnel una capa colchón de balasto, ubicada bajo la contrabóveda, y una serie de anclajes en ella (Fig. 5). Durante la realización de las obras, este diseño se desechó, pues se consideró que el material de la capa de expansión no era quizás el más adecuado, pues podría acumularse el agua en dicha zona y agravar el proceso de expansión. Se consideró además que la contrabóveda diseñada no era suficientemente robusta, y que los anclajes previstos se verían fuertemente solicitados.

Con el fin de mejorar la durabilidad del túnel, se optó entonces por definir una solución de sección resistente, con un revestimiento armado y una contrabóveda de gran espesor. Se tantearon diversos diseños, con espesores y curvaturas variables. Para ello se solicitó la colaboración de los Profesores Rodríguez Ortiz y Walter Wittke.

Tabla1: Resultado de los ensayos en muestras de anhidrita inalterada, anhidrita remoldeada, anhidrita + argilita remodeladas y yeso remoldeado

Muestra	Duración ensayo	Presión hinchamiento
Anhidrita inalterada	400 días	No Hincha
Anhidrita remoldeada	360 días	10 kg/cm2
Anhidrita + Argilita remoldeada	47 días	9,8 kg/cm2
Yeso remoldeado	27 días	1,72 kg/cm2

Para dimensionar estructuralmente la nueva sección, se realizaron una serie de ensayos de laboratorio, de hinchamiento libre en edómetro, y de presión de hinchamiento. Se ensayaron muestras de anhidrita inalterada, anhidrita remoldeada, anhidrita + argilita remodeladas y yeso remoldeado. Los resultados de estos ensayos se presentan en la Tabla 1.

Las conclusiones obtenidas fueron claras:

- En la anhidrita pura e inalterada, el mecanismo de hinchamiento es muy lento, o incluso puede no llegar a producirse en la escala temporal de duración del túnel.
- El remoldeo del terreno destruye su estructura y facilita la entrada de agua. De este modo se aceleran notablemente los fenómenos de hinchamiento. Incluso muestras aparentemente yesíferas mostraban hinchamiento al ser remoldeadas, probablemente por la existencia de relictos minerales de anhidrita.
- La situación más desfavorable a escala de macizo se da en el terreno constituido por anhidrita y argilita, ya que estas últimas se degradan muy rápido, facilitando la entrada de agua.

Los resultados de los ensayos fueron considerados no concluyentes en lo que respecta a la evaluación de presiones a largo plazo. Por ello, sobre la base de la experiencia del Profesor Wittke, se decidió emplear para el dimensionamiento y cálculo la siguiente gama de presiones:

- Anhidritas con vetas esporádicas de argilita: 9 – 5 MPa.
- Argilitas con vetas de anhidrita: 6 – 3 MPa.

Con una nueva caracterización geotécnica del terreno y una modelización numérica adecuada a este tipo de terreno, se realizó el cálculo y diseño de la nueva sección. El diseño final se definió con hormigón armado HA-50 (Fig. 6).

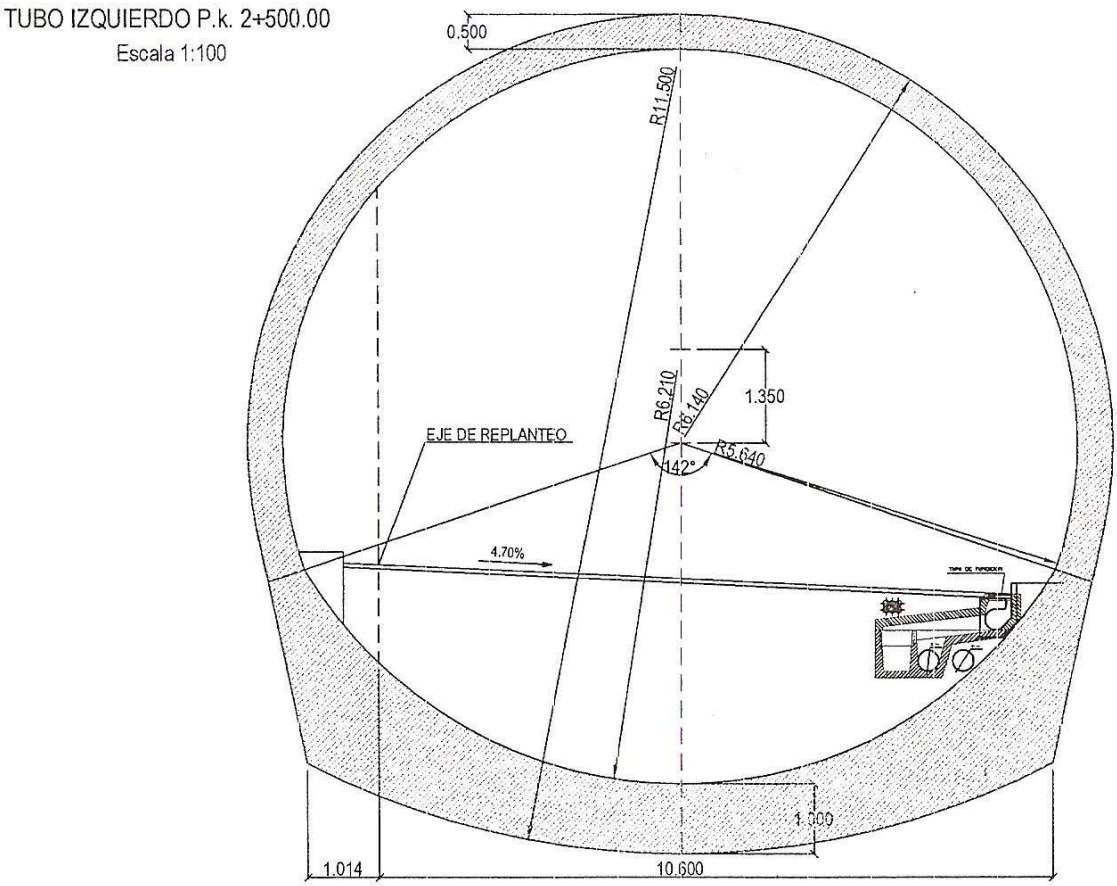


Figura 6: Sección finalmente adoptada para la zona de anhidrita del Túnel de Fabares.

Un caso de macizo heterogéneo es el del túnel de ferrocarril bajo la Sierra Cabrera. En dicho túnel se encuentra una zona de unos 400 m de longitud, donde los estudios geológicos previos señalaban la presencia de yesos. Históricamente no estaba detectada la presencia de anhidrita en la zona. En dicho tramo se realizaron una serie de ensayos de caracterización mineralógica, consistentes en difracción de rayos X y petrografías que constataron la presencia de anhidritas en la zona. De los testigos totales obtenidos, doce muestras detectaron la presencia de anhidritas con porcentajes de anhidrita que varían desde el 11 % y el 100 % del contenido mineral total.

Las muestras identificadas como anhidritas pertenecen a las facies evaporítico-carbonatadas de dos formaciones que se corresponden con las unidades geológicas denominadas YDA e YDM (Fig. 7).

Tras analizar las muestras en lámina delgada y en los afloramientos, se concluyó que la anhidrita no aparece de una forma continua en la secuencia estratigráfica, sino de una forma algo aleatoria. Se presenta normalmente asociada a niveles yesíferos, probablemente centimétricos, siendo difícil su tramificación afinada. El origen de esta anhidrita parece ser primario, de tipo laminar, estando condicionada con episodios más o menos secos del medio de formación, y con el grado de saturación del mismo, lo que conllevaría a la formación conjunta de niveles yesíferos y de anhidritas, que posteriormente fueron fuertemente tectonizados, deformándose y fracturándose con posterioridad, complicando aun más el seguimiento estratigráfico de dichos niveles anhidros. Parece más razonable hablar de

tramos en los que es posible la aparición de niveles de anhidrita, dado que no presentan un marco continuo ni una geometría definida (Fig. 8).

Figura 7: Macizo rocoso de yesos y anhidritas.

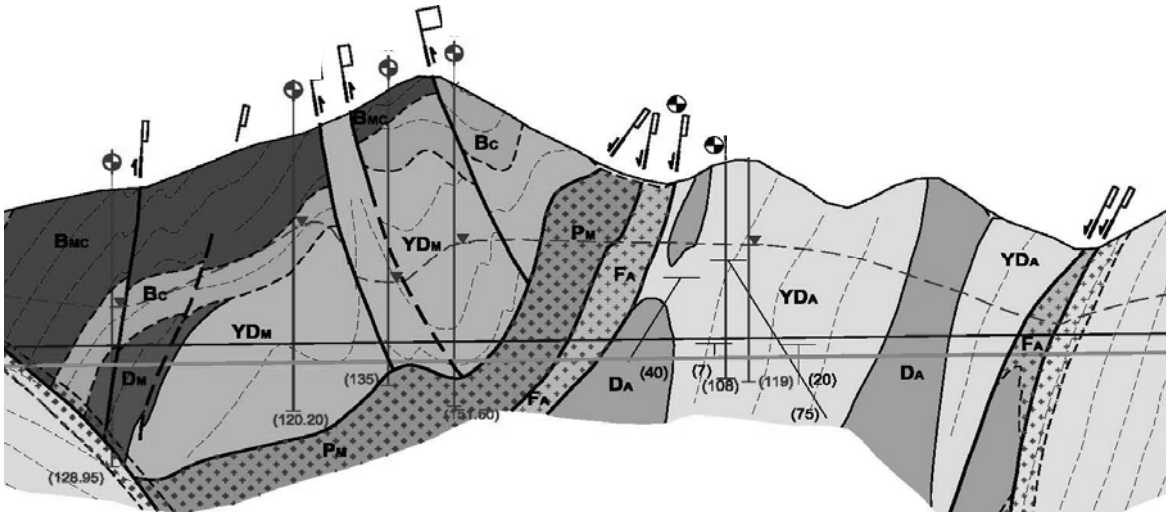


Figura 8: Esquema geológico de la zona del túnel con afloramientos de anhidrita y yeso (YDM e YDA).

Relacionados con las anhidritas, además de los yesos detríticos, también aparecen yesos secundarios. Su origen posiblemente está relacionado con la hidratación de las anhidritas debido a la permeabilidad que presentan los niveles dolomíticos que se encuentran interdigitados con ellas, y a la presencia de numerosas fracturas.

Tabla 3: Ensayo de hinchamiento libre.

Composición mineralógica	Estado de la muestra	Duración del ensayo (días)	Presión máxima (kg/cm^2)
47% anhydrita, 28% yeso, 12% filosilicatos, 2% cuarzo, 11% dolomita	inalterada	30	0,445
99% anidrita, <1% yeso, 1<% cuarzo	-	-	-
100% anhidrita	-	-	-
11% anhidrita, 54% yeso, <1% cuarzo, 35% dolomita	inalterada	56	0
50% yeso, 1% cuarzo, 49% dolomita	inalterada	27	0
100% yeso, indicios arcillas	-	-	-
100% yeso	remodelada	60	0
97% anhidrita, <1% yeso, <1% cuarzo, <1% carbonatos y filosilicatos	remodelada	245	35

Tras la detección del problema potencial se enviaron al laboratorio una serie de muestras con el fin de determinar la presión del hinchamiento que se puede producir en estos materiales. Con este fin se tomaron muestras y se realizaron ensayos de Presión de hinchamiento y ensayos de inundación bajo carga constante, Método Huder&Amberg, en protocolos de ensayos superiores a los dos meses. Los ensayos se realizaron tanto con muestras inalteradas como con muestras remoldeadas.

Las muestras fueron seleccionadas con criterios geológicos, a partir de los testigos de sondeos. Una vez seleccionadas se determinaron los porcentajes de las diversas especies minerales presentes, a partir de petrografías y ensayos DRX. Se abordaron entonces los ensayos, tanto sobre muestras naturales como en muestras molidas, mostrando los resultados que se ilustran en la Tablas 3 y 4.

De un sencillo análisis de los resultados puede deducirse lo siguiente:

- Las muestras remoldeadas muestran valores que pueden ser uno o dos órdenes de magnitud superiores a las muestras naturales.
- Los fenómenos de hinchamiento sobre muestras inalterada se demoran mucho en el tiempo, o no llegan a producirse.

A la vista de estos resultados se planteó la cuestión sobre la presión a considerar en el cálculo. Las muestras naturales mostraron valores de hinchamiento reducidos, o bien no desarrollaron el fenómeno, aunque el tiempo de ensayo fue solo de algunos meses. Las muestras pulverizadas, sin embargo, mostraron valores máximos en el entorno de los 4 MPa.

Tabla 4: Ensayo Huder Amberg.

Composición mineralógica	Estado de la muestra	Duración del ensayo (días)	Presión máxima (kg/cm^2)
47% anhydrita, 28% yeso, 12% filosilicatos, 2% cuarzo, 11% dolomita	-	-	-
99% anidrita, <1% yeso, 1<% cuarzo	inalterada	71	sin hinchamiento
100% anhidrita	inalterada	67	2
11% anhidrita, 54% yeso, <1% cuarzo, 35% dolomita	inalterada	71	sin hinchamiento
50% yeso, 1% cuarzo, 49% dolomita	inalterada	71	sin hinchamiento
100% yeso, indicios arcillas	inalterada	98	sin hinchamiento
100% yeso	-	-	-
97% anhidrita, <1% yeso, <1% cuarzo, <1% carbonatos y filosilicatos	remodelada	221	40

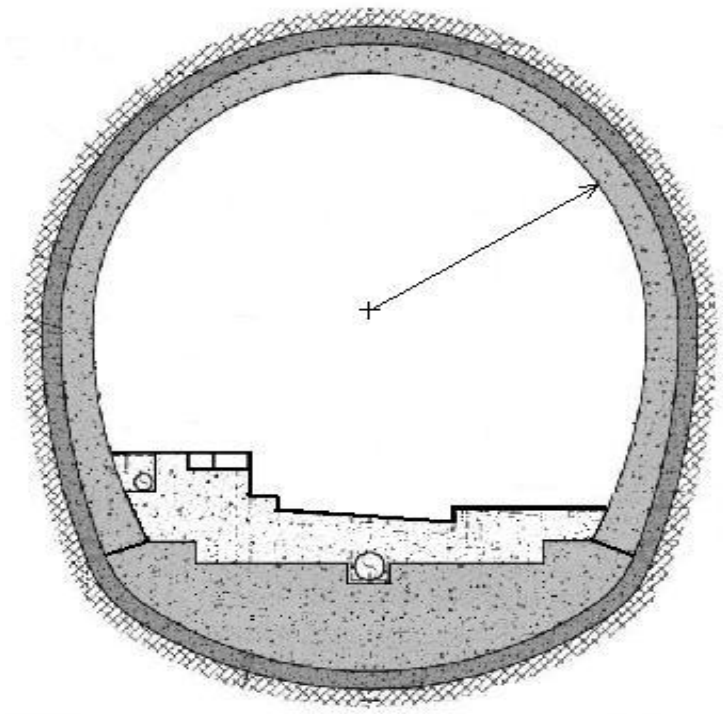


Figura 9: Sección tipo con método convencional ($R_{interior}$= 4,25 m).

Se consideró que los resultados presentados no eran concluyentes respecto a la presión que eventualmente pudieran desarrollarse a largo plazo. La naturaleza rocosa del macizo, con escasa presencia de arcillas u otros materiales degradables, llevaba a considerar que quizás el fenómeno no tuviese lugar, o lo hiciese en encasa magnitud. Se consideró poco probable que la presión máxima de hinchamiento alcanzase el valor de 4 MPa mostrado en algún ensayo sobre muestra remoldeada, incluso a largo plazo. Sin embargo, este valor de cálculo aseguraría un adecuado comportamiento del revestimiento, a lo largo de la vida útil del túnel, por lo que se consideró como el valor de diseño.

Se diseñó una sección de 0,5 m de espesor de revestimiento, en hormigón armado HA-50. La contrabóveda se reforzó especialmente, diseñándose con un espesor de espesor variable entre 0,8 y 1,2 m. En la Figura 9 adjunto se esquematiza la sección diseñada.

Se definió para esta zona una excavación de tipo mecánico, sin empleo de explosivos.

2.3 Túneles con presencia de minados

Los materiales evaporíticos presentan con frecuencia cavidades de dimensiones relativamente grandes, debido a dos razones principales:

- Son materiales muy solubles, de modo que pueden desarrollarse carstificaciones.
- Son minerales de interés económico, lo que provoca que, con cierta frecuencia, hayan sido objeto de explotación minera.

El caso que presentamos corresponde a este segundo tipo de cavidades. Los túneles de la Variante de Vallirana atraviesan un macizo triásico con materiales yesíferos que en la antigüedad fueron objeto de explotación minera (Fig. 10). Estas minas se materializan como cavidades de unos 5 m de altura máxima, que discurren en sentido descendente con inclinación de 25º, siguiendo la capa yesífera. El punto más superficial de estas minas se alcanza bajo una zona de viviendas, en que las cavidades discurren a 4 m de la superficie. El trazado de la carretera no discurre estrictamente bajo estas minas, pero su trazado no queda alejado.

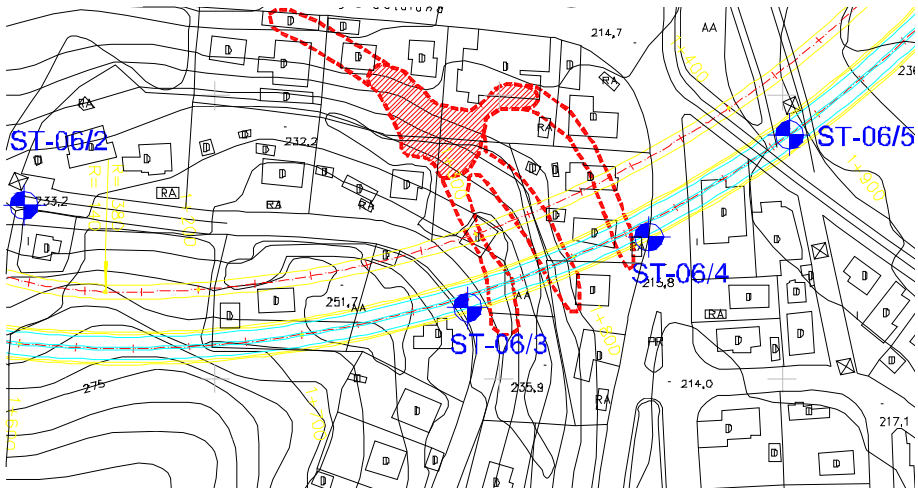


Figura 10: Cavidad minera (contorno rayado) y trazado del túnel carretero.

Los antiguos minados de yeso se localizan en el Muschelkalk. Es un tramo terrígeno que presenta espesores medios de 45 m. Su parte basal está constituido por lutitas rojas y yesos con una potencia aproximada de 20 a 5 m. El grueso de la facies esta constituido por

alternancia de areniscas y lutitas con una potencia de unos 20 - 35 m. Al techo de esta facies se detectan niveles de margas azules y yesos de poco espesor (2-3 m).

A priori, no puede descartarse que tenga lugar un fenómeno de subsidencia inducida, ya que la cimentación de las viviendas se apoya sobre el fondo de las cavidades. Cualquier inestabilidad que el túnel pueda generar en la mina, tensional o gravitatoria, podría eventualmente provocar asientos en la cimentación de la vivienda., tal como se ilustra en la Figura 11.

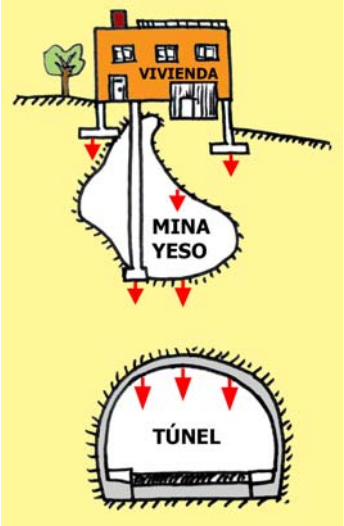


Figura 11: Riesgo de subsidencia inducida.

Para estudiar el problema, se realizó una inspección en el interior de la mina, realizando un levantamiento topográfico de la misma (Fig. 12). Pudo comprobarse como algunos de los pilares de las viviendas atravesaban las cavidades, y apoyaban en el suelo de las mismas. Se realizó un registro de fracturas y toma de muestras para ensayo. Con ello se dispuso de una caracterización geomecánica de la cavidad.

Figura 12: Mina de yeso.

A continuación se abordó un estudio de estabilidad de la cavidad, mediante elementos finitos. Se aplicó para ello el programa PHASES, con un modelo bidimensional de la

cavidad, considerando la sobrecarga de las viviendas suprayacentes. Los resultados de la simulación numérica se muestran en la Figura 13.

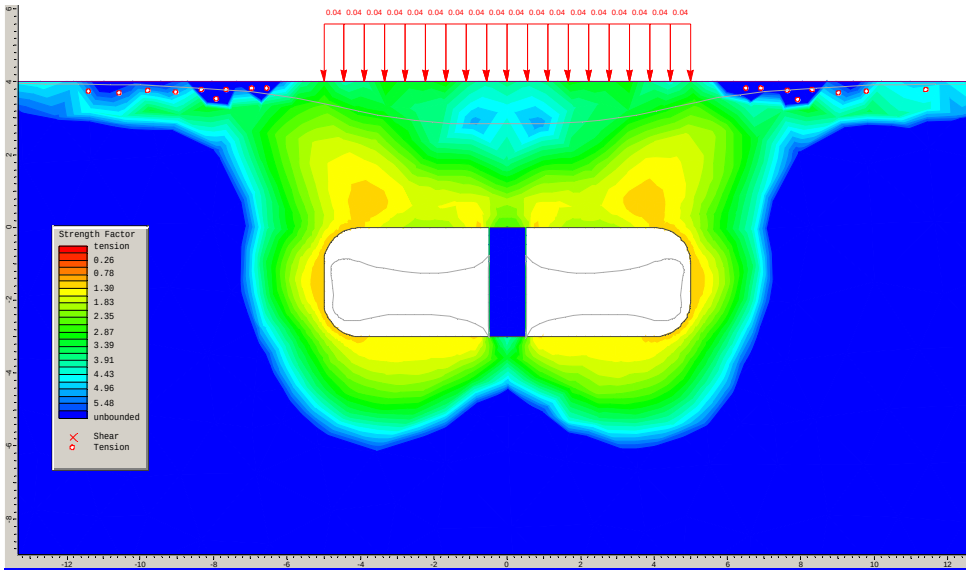


Figura 13: Modelo numérico.

Los resultados obtenidos permitían llegar a las siguientes conclusiones, respecto a la estabilidad de las minas y viviendas antes de la construcción del túnel:

- La cavidad es estable, con factores de seguridad que superan la unidad en todos los puntos del terreno.
- El pilar de hormigón que cimenta la vivienda presenta factores de seguridad superiores a cinco.
- Los factores de seguridad más bajos se obtienen en los hastiales de la mina, pero con valores estables (FS = 1,3).

De este modo, puede concluirse, que de no modificarse las condiciones geotécnicas de la mina, ni incrementarse las condiciones tensionales por efecto de la excavación de un túnel en sus cercanías, la mina se mantendría estable, sin afectar a la vivienda suprayacente. La experiencia y evolución del conjunto así lo corrobora, ya que la vivienda lleva 30 años ejecutada sobre la mina, sin que haya mostrado grietas o deterioros.

Por ello se modificó el trazado de la carretera, para alejarla de la mina en una distancia horizontal del orden de los 50 metros, y una profundidad adicional de unos 15 metros. Con la nueva ubicación de trazado se realizaron nuevas simulaciones numéricas, esta vez se abordaron cálculos tridimensionales mediante el programa FLAC 3D, que validaron la modificación de trazado propuesta.

2.4 Túneles con presencia de gases

En los túneles desarrollados sobre materiales yesíferos pueden aparecer bolsas de gas tóxico (sulfuro de hidrogeno), que entrañan un notable riesgo para la salud, por su carácter tóxico.

El gas se genera por reducción del yeso, en condiciones anaeróbicas (zonas profundas sin aporte de oxígeno), por la acción de bacterias reductoras de sulfatos (Sporovibrio desulfuricans).

Estas bacterias atacan a los sulfatos provocando su reducción, consecuencia de la misma es la transformación del sulfato en sulfuro de hidrógeno y de la formación de dióxido de carbono, un estadio intermedio de la reducción es la formación de dióxido de azufre.

La reacción química que tiene lugar se observa a continuación:

$$\begin{array}{c} SO_2 \\ \uparrow \\ SO_4^{-2} + 2CH_2O + H^+ \rightarrow HS^- + 2CO_2 + H_2 \\ \uparrow \\ Ca\ SO_4\ 2(H_2O) \end{array}$$

Durante la realización de sondeos para la caracterización geotécnica del túnel ferroviario de Seseña, se detectó la presencia de gases, emanados de huecos en materiales yesíferos. Los gases mostraban un olor fétido a huevos podridos, claro indicio de la presencia de sulfuro de hidrógeno.

Los materiales donde se trabajaba, corresponden a evaporitas terciarias de la Cuenca de Madrid.

La testificación del sondeo, hasta producirse la emanación del gas, presentaba la siguiente columna litológica:

- Hasta los 0,60 metros se han cortado rellenos antrópicos del camino consistentes en arenas marrones con gravas de tamaño centimétrico, subangulosas-suredondeadas de naturaleza silícea.
- De 0,6 m a 6,25 m se han atravesado yesos blancos alterados con intercalaciones margosas de color grisáceo que presentan aspecto pulverulento.
- De 6,25m a 12,20 m se han cortado margas gris oscuras que presentan lentejones yesíferos blancos, blandos y de aspecto pulverulentos.
- De 12,20 m a 34,00 m se han cortado arcillas grises oscuras que presentan lentejones yesíferos blandos. Hacia la base de este tramo las arcillas presentan un color negruzco con un fuerte olor fétido. A partir de 30 m se desprenden gases con olor fétido.

Se esperó una semana, para que el gas se liberase completamente, y se abordó una campaña de toma de muestra de los gases, que incluía la investigación de los siguientes (Fig. 14):

- Grisuometría: Durante toda la visita se tubo conectado a boca de sondeo el medidor de explosividad.
- Concentración de gases: CO, NO_x, SO_2, SH_2 y CO_2 y gas natural
- Recogida de muestra en un tubo de carbono activo
- Recogida de muestra en soluciones absorbentes
- Recogida de muestra en bolsa de muestreo inerte

Para realizar estas medidas se siguió un estricto protocolo de seguridad:

- En primer lugar y alejados unos 500 metros de la boca de sondeo se conectó el explosímetro para detección de gas explosivo (metano), y se avanzó hacia el sondeo con cautela y controlando en todo momento la medida que indicaba este equipo. Desde su conexión hasta la llegada de la boca del sondeo la medida fue 0%.
- Tras comprobar la inexistencia de metano, se procedió a la utilización del equipo de medición de gases mediante técnicas colorimétricas. El orden de medida fue el siguiente:
  - NO_2 por su peligrosidad
  - Gas natural para descartar totalmente la presencia de este gas
  - H_2S y SO_2 por las características composicionales de los materiales atravesados (yesos).
  - CO_2 y CO
- A continuación se procedió a la recogida de muestra en tubo de carbono activo para lo que se empleó una bomba de muestreo, cuyo caudal fue previamente ajustado mediante un calibrador de burbuja.
- Tras la recogida de la muestra el tubo de carbono activo ha sido llevado a analizar mediante técnicas cromatográficas con el fin de determinar la composición del gas emanado.
- A la vista de los resultados obtenidos del detector de gases con tubos colorimétricos se ha procedido a la captación de los compuestos existentes en el gas mediante impingers con soluciones captadoras y bolsas de muestreo inertes. Las muestras recogidas han sido enviadas al laboratorio para su análisis químico.

Figura 14: Equipos de toma de muestra y medida a pie de sondeo.

Los resultados obtenidos son los que se adjuntan en la Tabla 5, en la última columna se exponen los valores límites ambientales de exposición profesional para agentes químicos en España.

Tabla 5: Resultados del análisis químico y límites ambientales de exposición según la lista de agentes contaminantes de España del año 2004.

Gas	Muestra	Medición (mg/m^3)	Límite reglamentario (mg/m^3)	
			VLA-ED	VLA-EC
Sulfuro de Hidrógeno SH_2	S 7-1 (SH_2)	1.767	14	21
	S 7-2 (SH_2)	1.451	14	21
Dióxido de Azufre SO_2	S 7-1 (SO_2)	1,6	5,3	13
	S 7-2 (SO_2)	6,6	5,3	13

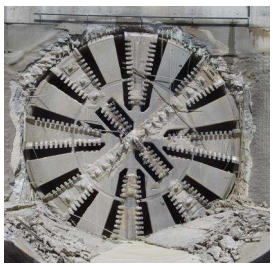
Las conclusiones deducidas de la tabla anterior son las siguientes:

- La concentración de dióxido de azufre no supera los límites establecidos para exposición profesional corta.
- En cuanto al límite establecido para la exposición diaria de dióxido de azufre se observa que la cantidad detectada en una de las muestras es superior al valor establecido.
- Sin embargo si se considera la definición de valor límite de exposición diaria se observa que implica considerar el conjunto de las distintas exposiciones del trabajador a lo largo de la jornada real de trabajo, y la muestra tomada corresponde a una exposición corta al agente químico por lo que no se puede considerar este resultado para evaluar la exposición diaria.
- Las concentraciones medidas en sulfuro de hidrógeno se encuentran muy por encima de los límites permitidos.

Por estas circunstancias, el estudio geotécnico desarrollado aconsejó la ejecución del túnel a cielo abierto, en lugar de en mina, ya que de ese modo se limitarían los riesgos de emanación durante la construcción del túnel.

PAYMACOTAS

Desde 1970, contribuimos al desarrollo de infraestructuras eficaces y duraderas. Nuestros servicios abarcan la gestión integral de los proyectos, las direcciones de obra y asistencias técnicas, el control de calidad de ejecución y materiales y la ingeniería geotécnica.



Una de las últimas intervencione es en el túnel del Ferrocarril Málaga-Fuengirola, bajo la nueva pista del Aeropuerto de Málaga . Desde la Estación de Guadalhorce hasta la Estación del Aeropuerto con una longitud de 1.971,54m.

El túnel se encuentra en terrenos blandos y bajo el agua por la mayoría del trazado. La necesidad de tener una excavación estable y un túnel estanco, además de factores como el paso bajo el río Guadalhorce y bajo el ferrocarril, ha determinado la decisión de excavar y construir a la vez este tramo de túnel con una máquina excavadora escudada denominada “tuneladora” del tipo EPB “presión de tierras”.

GEOPAYMA es nuestra empresa especializada en reconocimientos geotécnicos de campo y laboratorio, consultoría geológico-geotécnica y de instrumentación, y auscultación topográfica y geotécnica.

AREAS DE ACTUACIÓN: Ingeniería viaria, ferroviaria, de túneles, hidráulica, medioambiental, geotécnica, y de gestión de residuos; coordinaciones en seguridad y salud, laboratorios de ensayos de materiales, auscultaciones y patologías, infraestructuras urbanas y aeroportuarias, puertos y costas, estructuras y project management.

Madrid. P.I. La Granja. C/ Valportillo Primera, 22-24.
28108 Alcobendas (Madrid). T. 91 7280524
Barcelona. Ed.Creápolis. Av. De la Torre Blanca, 57.
08173 Sant Cugat (Barcelona).T. 93 5752834

www.paymacotas.com

Consultoría de Servicos Integrales de Ingeniería

BUREAU VERITAS 1828

PAYMACOTAS