

EL TÚNEL DE LILLA

Eduardo ALONSO y Anna RAMON
UPC

RESUMEN: Las arcillas sulfatadas pueden experimentar fenómenos expansivos graves como consecuencia de excavaciones. La intensidad del comportamiento expansivo observado en estos materiales es mayor que en otras rocas y suelos expansivos libres de sulfatos. En la mayoría de casos la funcionalidad y estabilidad de los túneles se ven afectadas.

Investigaciones de campo y ensayos de laboratorio muestran que, en general, el desarrollo de deformaciones y altas presiones en rocas sulfatadas está asociado al crecimiento de cristales de yeso en discontinuidades. El crecimiento de cristales de yeso es una consecuencia de la sobresaturación del agua del macizo en sulfatos. Los datos de campo que avalan esta interpretación tienen un ejemplo sobresaliente en el túnel de Lilla (Tarragona), que ha sufrido graves problemas de hinchamiento tras su construcción.

Aunque el fenómeno de hinchamiento en túneles que atraviesan materiales yesíferos se ha descrito y analizado cualitativamente a menudo, la predicción de deformaciones y presiones de hinchamiento sigue siendo una tarea difícil. En el presente trabajo se ha desarrollado un modelo de cálculo hidro-mecánico acoplado que permite predecir hinchamientos en excavaciones en arcillas sulfatadas durante la etapa de diseño.

Se concluye con una descripción del diseño de la sección resistente del túnel de Lilla, a partir de datos de campo de presiones experimentadas por el revestimiento en secciones de prueba.

1 INTRODUCCIÓN

Se han descrito fenómenos expansivos de gran intensidad en túneles excavados en arcillitas anhidríticas de origen secundario en el centro de Europa. El túnel de Lilla atraviesa sedimentos arcillosos anhidríticos más modernos, terciarios, de la cuenca del Ebro. En estos materiales no se habían descrito fenómenos expansivos de la intensidad encontrada en Lilla. Tanto los movimientos verticales de solera (que alcanzaron valores próximos a 1 m) como las tensiones máximas medidas sobre revestimientos rígidos (6 MPa) son solo valores extremos raramente mencionados en la literatura. Por ello Lilla es un caso de referencia

para la construcción de túneles en España, especialmente en el Centro y Este peninsular donde son frecuentes las formaciones anhidríticas y yesíferas.

2 DESCRIPCIÓN DE LOS FENÓMENOS OBSERVADOS

2.1 Geología del túnel de Lilla

El túnel de Lilla discurre a través de un relieve de suave montaña en la margen izquierda del río Francolí (cerca del Montblanc en Tarragona), en dirección Norte-Sur y con una pendiente máxima del 2.5%. El túnel atraviesa principalmente rocas arcillosas del Eoceno Inferior que contienen anhidrita y un sistema complejo de venas de yeso fibroso. Los estratos componen series monótonas de capas razonablemente horizontales (ver Fig. 1).

El yeso se encuentra principalmente en forma de venas fibrosas milimétricas y centimétricas y en nódulos y escamas (Fig.2a, b y c). A nivel local, el yeso alabastrino gris aparece en franjas subhorizontales en la roca matriz. Un aspecto importante es la existencia de un sistema persistente de superficies cizalladas, de bajo buzamiento (Fig. 2d). Estas superficies están relacionadas con importantes pliegues en rodilla debidos a la tectónica de gran radio de curvatura del Horst regional (Priorato-Gayá). El papel que juegan estas superficies en los fenómenos expansivos se discute más adelante.

Existen dos componentes esenciales en la caracterización mineralógica del material atravesado por el túnel: (i) la matriz arcillosa y (ii) la fracción cristalina sulfatada (Tab. 1). El primero está formado por filosilicatos (illita y paligorskita), minerales ricos en magnesio y calcio (dolomita) y, en menor cuantía, por cuarzo. Las arcillas expansivas sólo se detectan en puntos aislados de la matriz. El segundo componente está constituido principalmente por anhidrita y yeso. El agua subterránea que contiene el túnel está muy mineralizada y muestra concentraciones elevadas de sulfatos y de calcio (ver Tab. 2).

2.2 Aspectos técnicos del túnel de Lilla

El túnel tiene una longitud de 2 km y fue excavado inicialmente con una sección transversal en herradura de 117.3 m² (radio de la bóveda: 6.76 m). El recubrimiento oscila entre los 10 m y los 110 m.

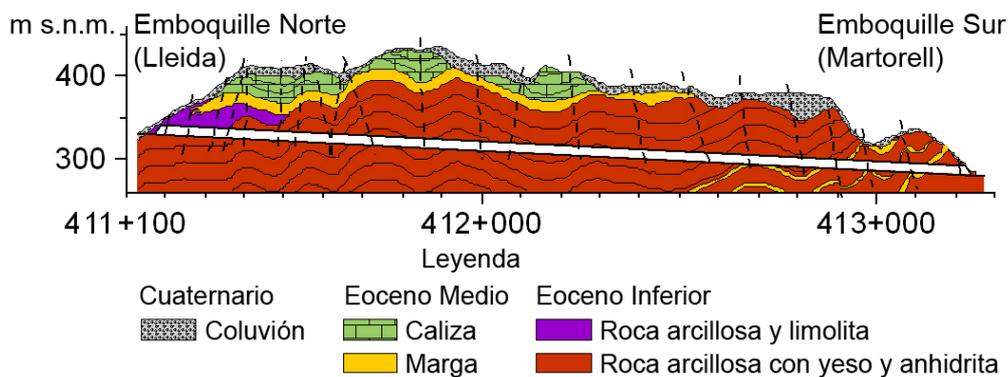


Figura 1: Perfil geológico longitudinal del túnel de Lilla.

El proyecto se basó en el Método de Convergencia-Confinamiento y la excavación se realizó mediante perforación y voladura desde ambos emboquilles, dividiendo la sección en avance y destroza. El sostenimiento inmediato consistió en hormigón proyectado y en pernos de

anclaje. Sólo se instalaron cerchas de acero (HEB 160) en algunas zonas donde la roca era de baja calidad.

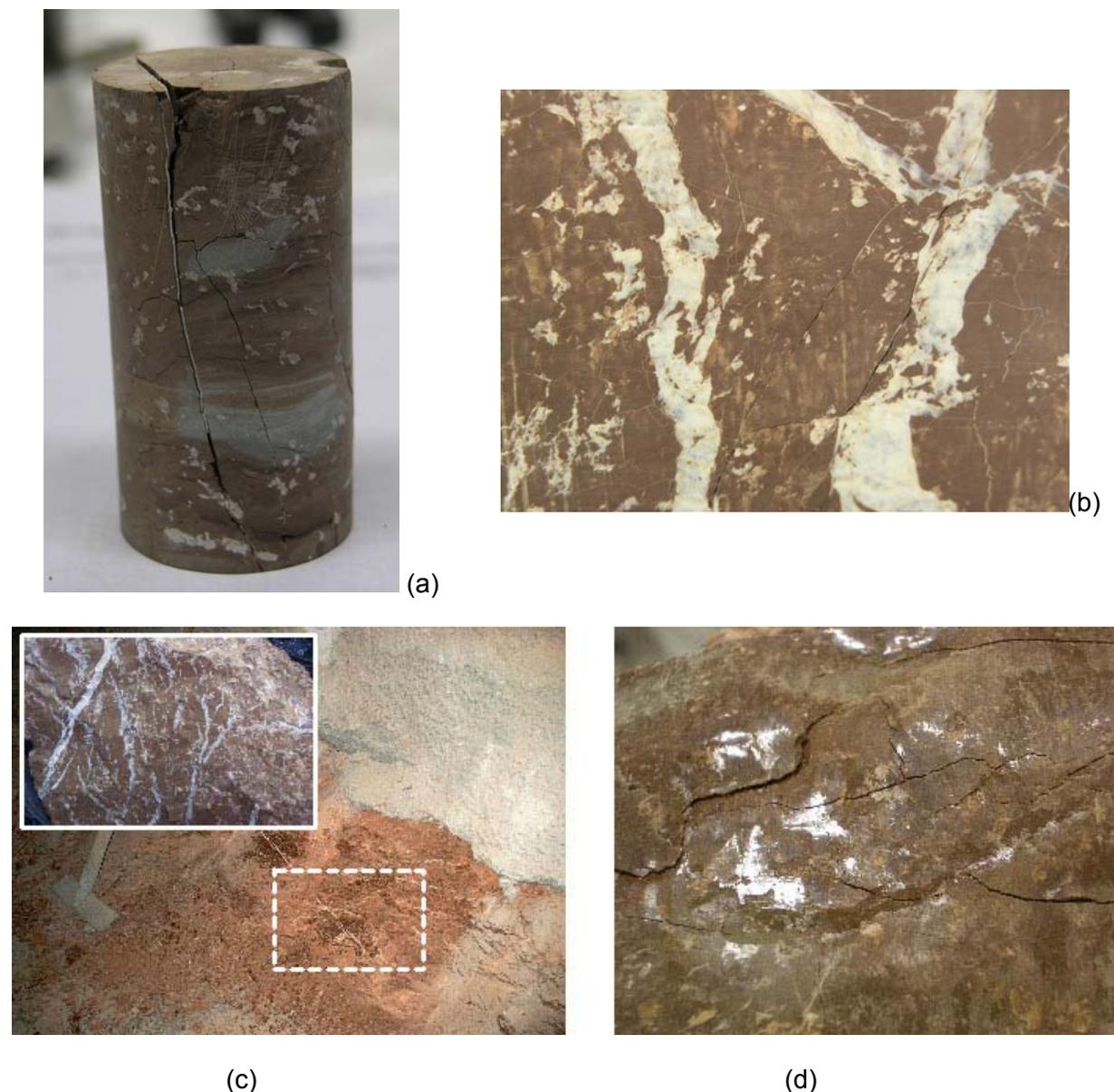


Figura 2: Detalles de la roca arcillosa de Lilla: (a) muestra tras varios ciclos de humedecimiento-secado (Pineda, 2007), (b) y (c): venas de yeso fibroso cruciforme en la matriz arcillosa, (d): superficies cizalladas.

El revestimiento consistió en una capa de hormigón en masa de 300 mm de espesor (25 MPa). Se construyó una losa horizontal de hormigón en masa de 300 mm de espesor (20 MPa) en la solera del túnel, que se hormigonó una vez se hubo concluido la destroza. La solera del túnel sufrió la acción de agentes medioambientales durante la mayor parte del proceso constructivo.

Debido a la baja permeabilidad del macizo, la impermeabilización de la sección se restringió a los emboquilles. Se utilizó un geotextil de 500g/m² sobre una lámina de PVC de 1.5 mm de

espesor situada entre el sostenimiento y el revestimiento. El sistema de drenaje longitudinal estaba compuesto por un colector de PVC ($\varnothing = 500$ mm), situado a 1.4 m por debajo de la solera. Bajo el colector se extendió una capa de gravas de 200 mm de espesor. El agua de la bóveda se recogía en colectores distribuidos a lo largo de la solera del túnel. La Figura 3 muestra la sección transversal original del túnel.

Tabla 2.1: Composición y propiedades de la roca arcillosa de Lilla.

Composición mineralógica, contenido relativo (%)	
Cuarzo	2 – 7
Dolomita	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 de agua (%)	0,5 – 4,5
Densidad total (Mg/m^3)	2,40 – 2,86
q_u . Resistencia a compresión simple (MPa)	17 – 170

Tabla 2.2: Composición química y propiedades de las muestras de agua provenientes del túnel de Lilla.

Muestra	A	B
Estación	411+680	413+050
Fecha	04/03/2003	23/09/2003
Temp. agua ($^{\circ}\text{C}$)	12,4	16,8
Macro-componentes (ppm)		
Sulfatos (SO_4^{2-})	1783,00	1842,00
Bicarbonatos (HCO_3^-)	302,00	269,76
Cloruros (Cl^-)	39,00	38,82
Nitratos (NO_3^{1-})	6,00	2,06
Calcio (Ca^{2+})	550,00	572,94
Magnesio (Mg^{2+})	141,00	164,23
Sodio (Na^+)	29,20	33,60
Potasio (K^+)	3,20	3,01
Otras propiedades		
pH	6,75	7,57
[C.E.] a 20°C ($\mu\text{S/cm}$)	2820	2640

2.3 Fenómenos de hinchamiento en el túnel de Lilla

Las primeras expansiones en el túnel de Lilla se detectaron en la losa de solera en septiembre/octubre de 2002, inmediatamente después de su construcción. Los fenómenos expansivos aumentaron en gravedad con el tiempo y ocurrieron de manera generalizada a nivel de la solera. Los movimientos sólo se percibían levemente en la bóveda sin revestir. Al desplazamiento siguieron los daños al sistema de drenaje longitudinal y, finalmente, el deterioro de las losas de solera.

Se iniciaron medidas “in situ” y ensayos de laboratorio para tratar de entender el fenómeno. Se instrumentaron tramos de estudio en secciones con solera plana y en secciones con contrabóveda. Se midieron presiones en dirección radial en bóveda y contrabóveda mediante células de presión total. Se instalaron también extensómetros continuos (micrómetros deslizantes) bajo solera.

Se recuperaron muestras continuas inalteradas de la roca bajo solera durante las campañas de sondeos de octubre de 2002 y marzo de 2003. También se realizó una serie de ensayos sistemáticos de laboratorio para obtener perfiles cuasi-continuos a partir de las propiedades geotécnicas de las muestras (incluida la composición mineralógica de la roca).

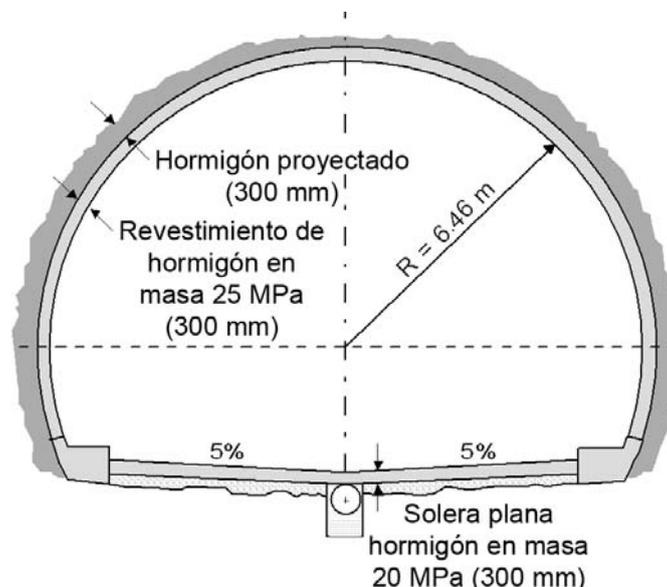


Figura 3: Sección transversal original del túnel de Lilla.

La Figura 4 indica la magnitud del desplazamiento de la solera y la extensión estimada de la degradación de la roca en tres fases diferentes durante el periodo de hinchamiento: octubre de 2002 (al principio del programa de monitorización), marzo de 2003 (inmediatamente después de la construcción de las secciones de prueba con contrabóveda) y diciembre de 2003. La “zona activa” se define con las cotas en las que se midieron deformaciones de hinchamiento. La profundidad de la roca dañada que se muestra en la Figura 4 fue estimada a partir de una serie de sondeos excavados a lo largo del túnel. Por otro lado, la zona activa que se dibuja se obtuvo a partir de datos de extensómetros continuos. Los datos que se representan en la Figura 4 muestran que la cota del límite inferior de la zona dañada sufre un descenso inicial progresivo en poco tiempo. Estos datos indican que las expansiones están relacionadas con la degradación de la roca.

La magnitud del fenómeno expansivo en el túnel de Lilla no fue homogénea a lo largo de su longitud. Los hinchamientos más extremos se concentraron en un tramo de unos 800 metros

a partir del emboquille Norte. En una longitud de 500 metros aproximadamente, próximos al extremo Sur no se observaron hinchamientos.

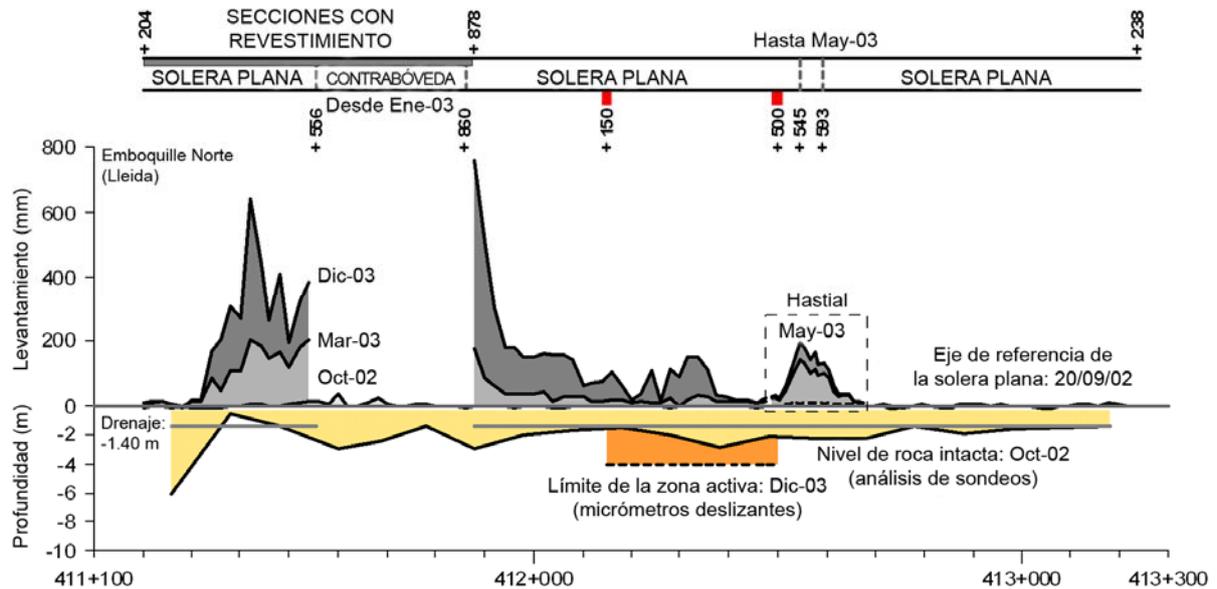


Figura 4: Hinchamiento de la losa longitudinal entre octubre de 2002 y diciembre de 2003 y su relación con las condiciones de la roca en octubre de 2002 y la cota de la zona activa.

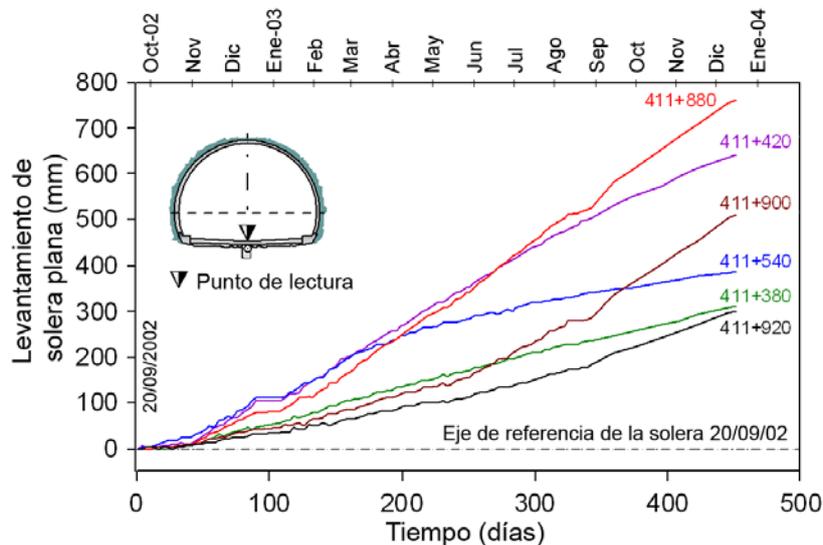


Figura 5: Evolución de los hinchamientos de solera entre septiembre de 2002 y diciembre de 2003.

Los fenómenos expansivos en la roca bajo solera evolucionaron rápidamente. En diciembre de 2003 las secciones críticas con solera plana (411+420 y 411+880) mostraron desplazamientos de más de 600 mm, con una velocidad de movimiento vertical que variaba de 1.2 a 2 mm/día (Fig. 5), mientras que en la sección crítica con contrabóveda (411+663) se midió un desplazamiento máximo de 27 mm durante los 10 meses posteriores a su construcción. En este caso, el valor de la velocidad de hinchamiento fue de 0.1 mm/día (Fig. 6). A pesar de que se obtuvieron valores relativamente altos de los desplazamientos verticales en las secciones con contrabóveda, en algunos puntos se observó que las presiones radiales totales eran muy altas (4-5 MPa) (Fig. 7).

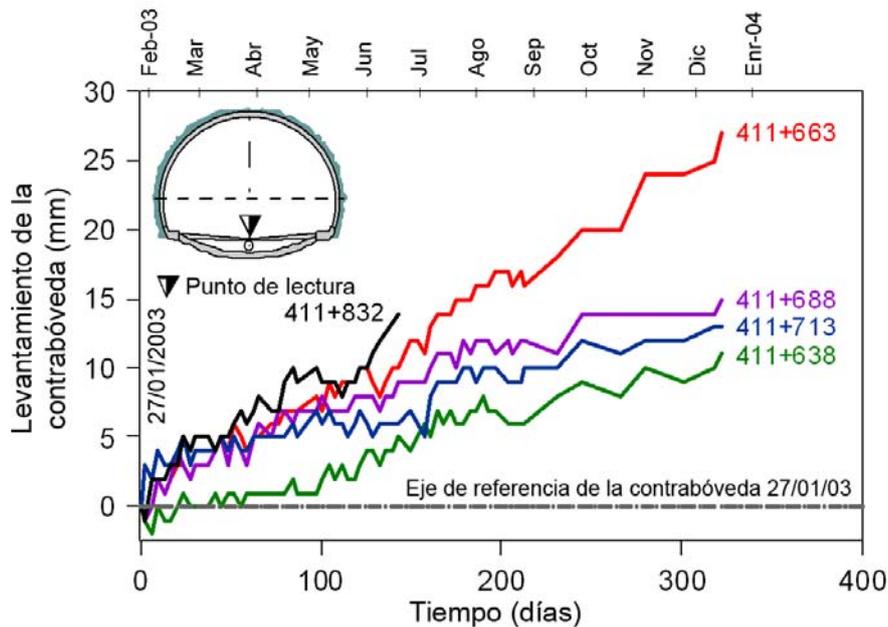


Figura 6: Evolución de los desplazamientos entre enero y diciembre de 2003 en las secciones con contrabóveda.

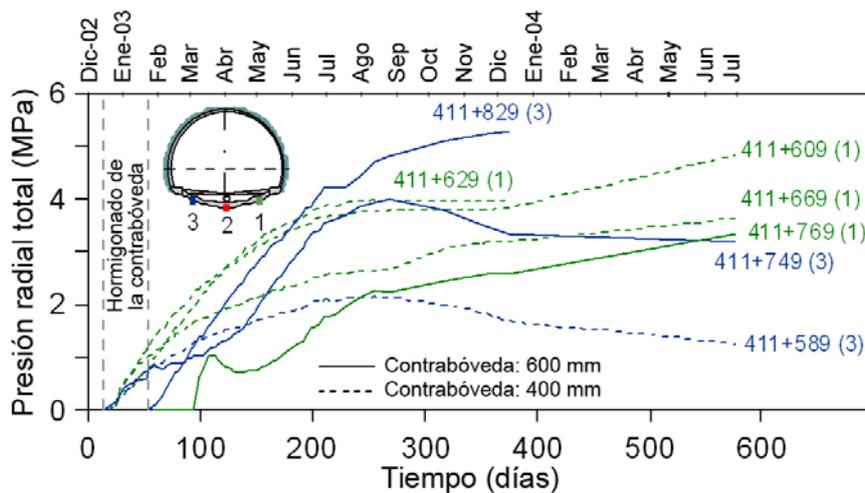


Figura 7: Evolución de la presión radial total en las secciones de contrabóveda.

Las lecturas de los micrómetros deslizantes, así como los ensayos de laboratorio en muestras inalteradas, permitieron evaluar la magnitud y propiedades geotécnicas de la zona activa bajo solera. Las expansiones por debajo de la contrabóveda en la sección 411+600 se asociaron al aumento de la humedad de la roca en una zona activa con un espesor de 4 a 5 m, que básicamente permaneció invariable en el tiempo (Fig. 8).

La degradación de la roca en esta sección se ve claramente ilustrada por los cambios en las propiedades gravimétricas y volumétricas en función del tiempo y la profundidad. En todos los perfiles de roca estudiados, la zona activa se caracteriza por la aparición de agujas de yeso neoformado en las superficies cizalladas abiertas al excavar el túnel (Fig. 9a).

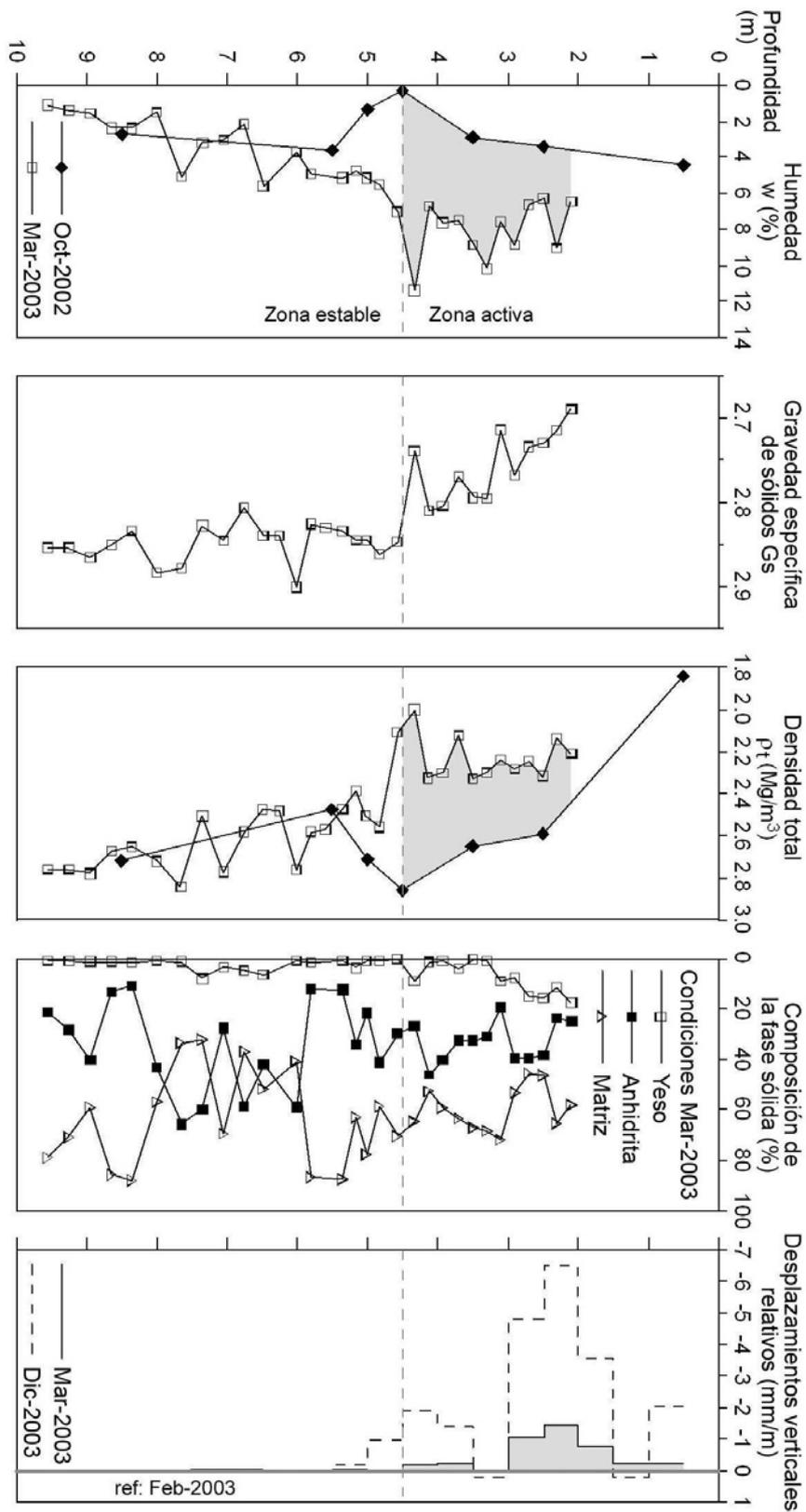


Figura 8: Caracterización y perfil vertical de la estación 411+600 (contrabóveda).

Otro aspecto a resaltar es la existencia de agregados yesíferos neoformados en discontinuidades, relativamente confinadas, de muestras recuperadas de la parte inferior de la zona activa (Fig. 9b). Este fenómeno podría estar relacionado con un "efecto cuña" capaz de mover, independientemente de los mecanismos expansivos que tengan lugar en la zona activa, parte de la masa de roca como si se tratase de un cuerpo rígido. El incremento observado de yeso en la capa activa (Fig. 8) se explica por la cristalización de agujas de yeso neoformado en fisuras (Fig. 9). Además, la degradación de las propiedades mecánicas del material expandido está relacionada con la pérdida de resistencia a la compresión simple de la roca (Fig. 10b). En la capa activa la humedad crece notablemente en comparación con los valores medidos de la roca inalterada (Fig. 10a).

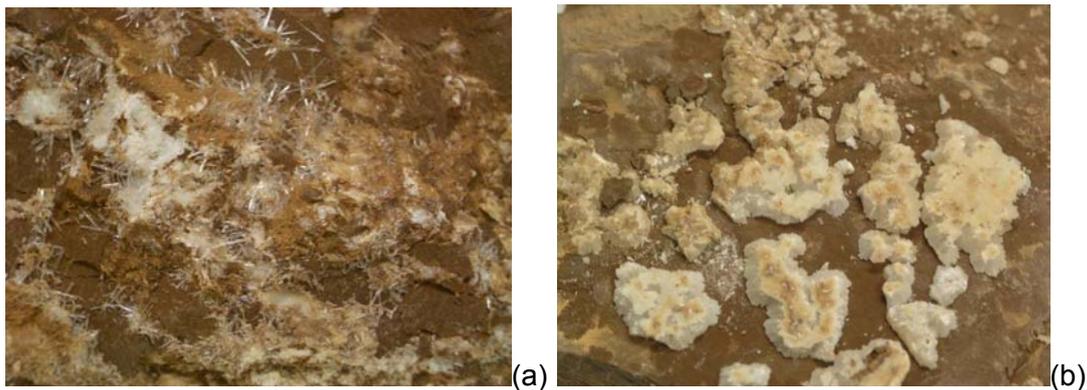


Figura 9: Crecimiento de cristales de yeso en fisuras observado en el túnel de Lilla. (a) Agujas de yeso en una superficie cizallada situada en la zona activa, (b) acumulación de nódulos de yeso en una discontinuidad confinada situada en la parte inferior de la zona activa.

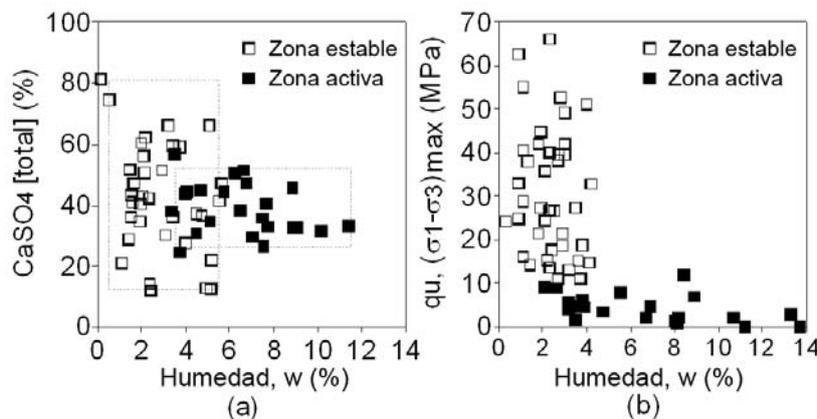


Figura 10: Indicadores de la degradación química y mecánica de la roca arcillosa de Lilla. (a) Relación entre el contenido de agua y el contenido total de sulfato de calcio, (b) relación entre el contenido de agua y la resistencia a la compresión no confinada.

Se han realizado dos nuevos sondeos en el túnel de Lilla para entender la variación de los levantamientos de solera a lo largo de su longitud. Los sondeos se ejecutaron desde la superficie natural del terreno hasta una profundidad correspondiente a 10 metros por debajo del nivel de la contrabóveda del túnel, alejados unos pocos metros del hastial del túnel. Un sondeo se situó cerca de una sección con desplazamientos de hinchamiento máximos, y el otro cerca de una sección con desplazamientos de hinchamiento mínimos. El análisis de los sondeos mostró que en la ubicación donde se midieron a los hinchamientos máximos (Sondeo 1) existía una alta proporción de estrías y espejos de falla. En comparación con el

otro sondeo (Sondeo 2), se encontró que existía un mayor porcentaje de sulfatos en la roca (Fig. 11), predominando la anhidrita.

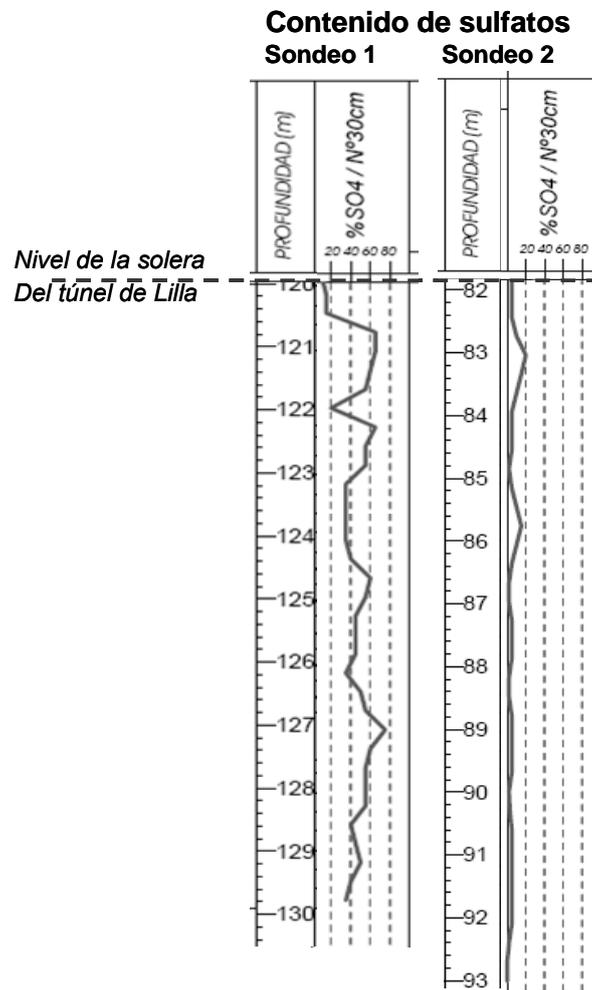


Figura 11: Proporción de sulfatos en el material extraído mediante sondeos.

3 MECANISMOS DE HINCHAMIENTO DE LAS ROCAS ARCILLOSAS SULFATADAS

Parece comprobado que la expansión observada en las rocas arcillosas sulfatadas se debe al crecimiento de cristales de yeso en fisuras o huecos disponibles en el macizo rocoso. Se observa que el fenómeno expansivo en arcillas sulfatadas ocurre principalmente en discontinuidades estructurales. Una característica común en los distintos casos de hinchamientos en rocas sulfatadas descritos en la literatura, es la presencia de cristales de yeso de neoformación en discontinuidades abiertas localizadas en la zona activa donde se concentran las expansiones (ver Fig. 12 y Fig. 9).

Los cristales se originan al precipitar los sulfatos en exceso de la concentración de saturación de las aguas en circulación. Por tanto, tres requisitos para la formación de cristales son: la existencia de fisuras o huecos, la presencia de agua y su sobresaturación en sulfatos.

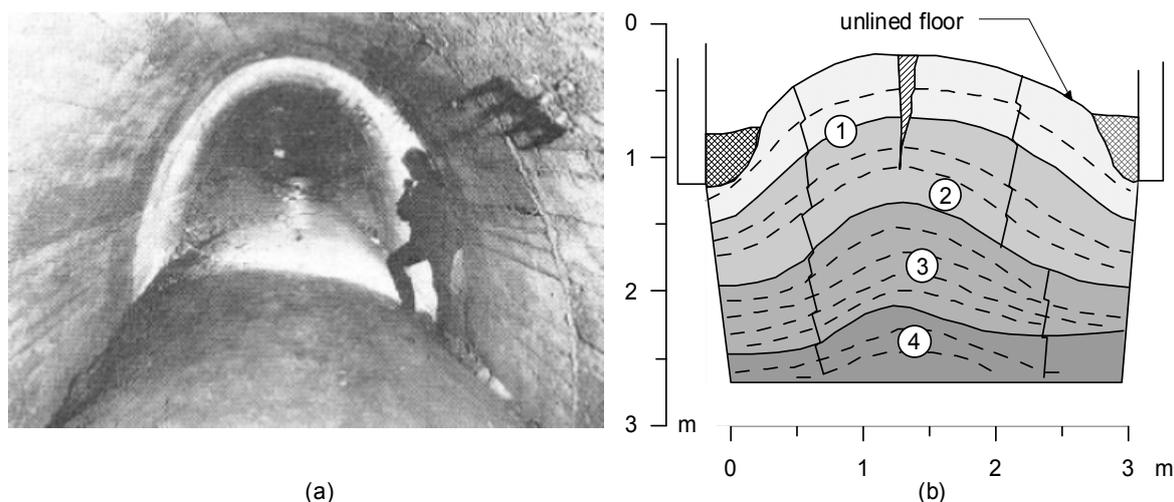


Figura 12: (a) Túnel Norte de Wagenburg en 1970. Imagen tomada de Spaun (1974). (b) Distribución de los cristales de yeso a lo largo del perfil de subsuelo deteriorado, según Krause (1977) y Nagel (1986): (1) macrocristales y cristales de yeso segregados-impuros, (2) cristales de yeso segregados-puros en hoja fina, (3) macrocristales de yeso y fibras de yeso, (4) transición entre (1) y (2).

Existen, al menos, dos mecanismos que conducen a la sobresaturación en sulfatos del agua en el macizo rocoso y que por tanto pueden conducir a hinchamiento:

- Evaporación del agua sulfatada.
- Disolución de anhidrita y posterior equilibrado respecto al yeso de la solución acuosa sulfatada.

La propia presencia del túnel, debido a las condiciones de humedad relativa impuestas por su atmósfera, con su ambiente ventilado, favorece la evaporación en las superficies expuestas de la roca. El segundo mecanismo puede producirse dentro de la propia roca, aunque se encuentre saturada.

3.1 Evaporación del agua sulfatada

Si examinamos el primer mecanismo descrito que puede conducir a hinchamientos (evaporación), la zona activa afecta a un volumen finito de roca sujeta a cambios en las condiciones de succión. En ella coexisten tanto la humectación debida a la entrada de agua como el secado debido a las condiciones medioambientales que impone la ventilación en un túnel, incluso si existe una solera de hormigón. En efecto, la permeabilidad del hormigón y las juntas de construcción facilitan la transferencia de vapor. En estas condiciones, la dirección de la transferencia de vapor depende de la diferencia entre la humedad relativa impuesta por el agua subterránea que hidrata la roca y la humedad relativa del aire de ventilación del túnel.

En el caso del túnel de Lilla, se ha determinado experimentalmente la dependencia de la humedad relativa generada por el agua subterránea con la temperatura en condiciones controladas de acuerdo con el método que sugieren Delage et al. (1998) y Tang y Cui (2005). Estas medidas indican que el agua subterránea de Lilla impuso una humedad relativa que oscilaba entre el 91% a 30°C y el 93% a 5°C. Estos valores de temperatura corresponden a valores extremos en el túnel durante un año de monitorización. Por otro lado, análisis termodinámicos del índice de saturación para el yeso de las aguas subterráneas muestran que, teniendo en cuenta las condiciones medioambientales impuestas por la ventilación del túnel, el yeso podría precipitarse sólo a temperaturas

inferiores a los 10°C. Sin embargo, la temperatura en el interior del túnel a menudo era ligeramente superior a los 10°C. Se midió durante varios meses la humedad relativa y la temperatura en el túnel de Lilla (Oldecop, 2006). Esta información se ha integrado en la Figura 13 y revela algunos detalles de importancia sobre la interacción entre las condiciones medioambientales inducidas por la ventilación del túnel y las aguas subterráneas que hidratan la zona activa:

- La precipitación del yeso debido a un descenso de la temperatura sólo es teóricamente posible en invierno. Este periodo también se caracteriza por tener los valores medios más bajos de humedad relativa debida a ventilación natural.
- Dentro del rango de temperaturas medidas en el túnel, el agua subterránea puede imponer una humedad relativa media del 92%, valor que está por encima de la humedad relativa máxima medida en el túnel. Por ello el vapor sólo puede transferirse del agua subterránea a la atmósfera del túnel.

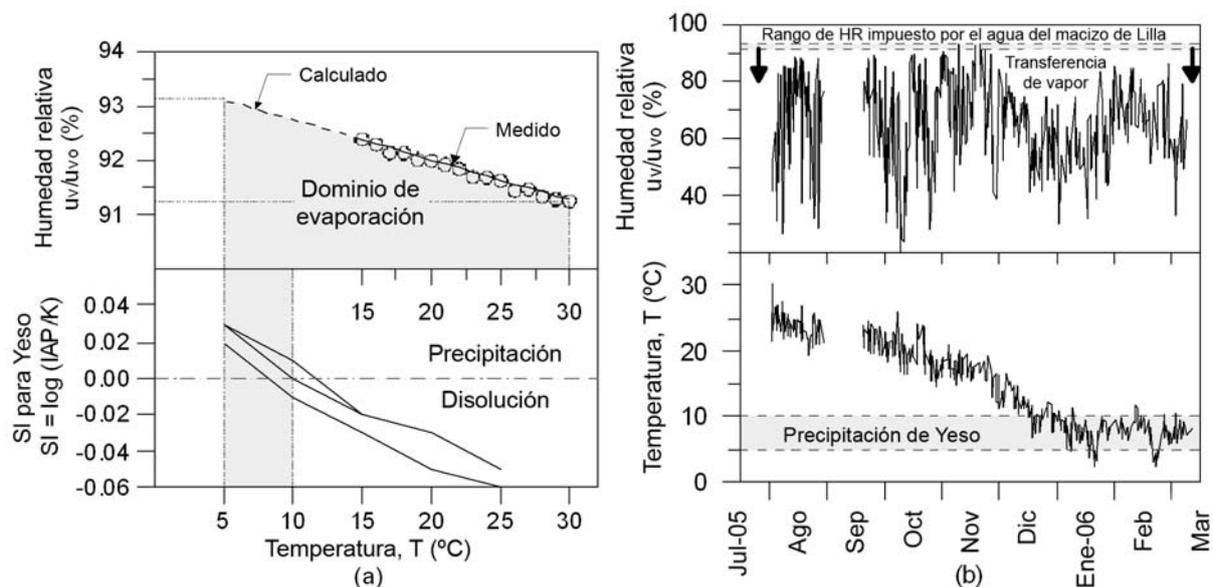


Figura 13: (a) Condiciones de saturación del yeso en el agua subterránea de Lilla. (b) Interacción entre la atmósfera y el agua subterránea contenida en el túnel de Lilla.

3.2 Cristalización en ambiente saturado

El segundo mecanismo citado que puede conducir a hinchamientos, requiere la presencia de anhidrita y, probablemente, la de yeso en el mismo entorno. Estudios experimentales indican que el crecimiento de cristales de yeso puede ocurrir en ausencia de evaporación. El trabajo experimental desarrollado por Kontrec et al. (2002) describe la transformación de anhidrita a yeso en medio acuoso y su cinética. En este trabajo se demuestra que el proceso de transformación requiere una disolución previa de los sulfatos. En Kontrec et al. 2002 también se ha descrito la precipitación espontánea de sulfato de calcio, principalmente de sulfato de calcio dihidratado (yeso), a partir de soluciones altamente supersaturadas, y la cristalización inducida mediante “embriones” de cristales a bajas sobresaturaciones.

El fenómeno de precipitación de yeso debido a la disolución de anhidrita en presencia de yeso se describe de la siguiente manera: la anhidrita es más soluble que el yeso, los experimentos muestran que las concentraciones de equilibrio del yeso y de la anhidrita, a 20°C, son $15.5 \cdot 10^{-3} \text{ mmol/cm}^3$ y $21.0 \cdot 10^{-3} \text{ mmol/cm}^3$ respectivamente (Kontrec et al. 2002),

en consecuencia la concentración de equilibrio de sulfato de calcio (disuelto en la solución) en presencia de yeso es menor que la concentración de equilibrio de sulfato de calcio disuelto en contacto con cristales anhidrita. Esta situación resultará en una precipitación de sulfato de calcio en forma de cristales de yeso como se explica con detalle a continuación. El agua en contacto con la anhidrita adquiere, en el límite, una concentración de saturación de sulfato de calcio que es más alta que la que adquiere el agua en presencia de yeso. Por tanto, tras disolver anhidrita y alcanzar la saturación respecto la anhidrita, la solución es capaz de precipitar cristales de yeso, especialmente si existen cristales de yeso disponibles que favorezcan la precipitación. Este mecanismo, con el tiempo, puede transformar toda la anhidrita en yeso, pero siempre mediante el mecanismo de la re-cristalización, con la ayuda del agua. Este segundo mecanismo es potencialmente más peligroso e intenso que el primero. Por otra parte es de difícil control, a diferencia del primero.

En la práctica la sobresaturación (sin evaporación) se alcanza principalmente cuando el agua que fluye en discontinuidades disuelve anhidrita. Debido a que la precipitación de cristales de yeso tendrá lugar en un medio fracturado (la roca arcillosa), la cristalización de yeso en discontinuidades resultará en la apertura de fracturas existentes y en la aparición de nuevas, generando nuevas superficies donde el yeso puede cristalizar, dependiendo de las características del macizo rocoso y de las condiciones de flujo y de equilibrio del agua sulfatada.

La suma de los procesos aislados de apertura de las fisuras se traduce en el fenómeno expansivo general observado. Los distintos agregados de yeso cristalizado actuarían como pequeños gatos hidráulicos que dilatan la masa de roca circundante, originando hinchamientos y presiones elevadas sobre revestimientos. Aparentemente este proceso se mantendría mientras se produzca la cristalización del yeso, en lo que influye el aporte de agua rica en sulfatos, su concentración y las condiciones ambientales de las juntas.

Los fenómenos expansivos se suelen concentrar en la solera de los túneles. Existen algunas razones. En secciones en herradura o similares la roca, tras la excavación, sufre una descarga tensional importante que conduce a la apertura de grietas, incrementando la permeabilidad del macizo. El propio "efecto dren" del túnel y de la roca más permeable bajo solera concentran el agua en ella y permite el desencadenamiento de los procesos descritos anteriormente. En caso de hinchamiento las medidas "in situ" indican que las expansiones se concentran en espesores finitos (unos pocos metros bajo solera como hemos visto anteriormente).

En Lilla, la reducción de tensiones por excavación fue probablemente la causa de que se abriesen tanto superficies de cizalla como fisuras en la roca. El flujo de agua, rica en sulfatos, permitió la precipitación de cristales en las fisuras. Por tanto, los fenómenos de hinchamiento están asociados con el crecimiento de cristales y evolucionan sistemáticamente en el tiempo mientras las discontinuidades permanecen abiertas.

Se desconoce la presión máxima que, en la práctica, pueden alcanzar los fenómenos de expansión. En el túnel de Lilla se ha alcanzado los 6 MPa en una de las células de carga instaladas en el revestimiento. Este valor es de los más altos nunca publicados en casos similares, en concreto en túneles centroeuropeos excavados en rocas sulfatadas del Keuper. No se conoce, sin embargo, la distribución precisa de tensiones sobre el revestimiento del túnel de Lilla, sino únicamente los valores de presión de hinchamiento en unos pocos puntos. Su variabilidad hace difícil proponer distribuciones concretas y fiables de presión sobre el revestimiento.

4 MODELO TEÓRICO DE CÁLCULO

Se ha desarrollado un modelo de cálculo hidro-mecánico acoplado que permite predecir hinchamientos en excavaciones en arcillas sulfatadas durante la etapa de diseño del túnel. El modelo es consistente con observaciones de campo y de laboratorio. Permite simular el flujo de agua a través de un material con un contenido de yeso y anhidrita inicial. Reproduce la disolución de anhidrita y cristalización de yeso tanto en medio acuoso por sobresaturación en sulfatos debido a la disolución de anhidrita como debido a la sobresaturación por evaporación de agua saturada en sulfatos. En el modelo se transforma la cristalización en deformaciones. En el caso de desplazamientos impedidos, las deformaciones se traducen en tensiones de hinchamiento.

Se ha modelado el crecimiento de cristales dentro de un marco general para análisis Termo-Hidro-Mecánico en materiales porosos saturados y no saturados. En el material poroso se distingue una fase sólida compuesta de minerales arcillosos y de cristales de anhidrita y yeso que son susceptibles de disolverse. Para tener en cuenta las características de este material en la formulación, el balance de masa de fase sólida incluye dos "tipos" de sólido: el sólido insoluble (que corresponde a matriz arcillosa) y el sólido soluble (que representa los cristales de anhidrita y de yeso). Se ha definido una nueva porosidad para los cristales, $\phi_c = \phi_{\text{yeso}} + \phi_{\text{anhidrita}}$, que es la fracción del volumen total ocupado por ellos. El balance de masa de fase sólida insoluble se define según la ecuación clásica

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_s (1 - \phi - \phi_c)) + \nabla \cdot \left[(\rho_s (1 - \phi - \phi_c)) \frac{d\mathbf{u}}{dt} \right] = 0 \quad (1)$$

mientras que el balance de masa de fase sólida soluble se escribe

$$\frac{\partial (\rho_c \phi_c)}{\partial t} + \nabla \cdot \left[(\rho_c \phi_c) \frac{d\mathbf{u}}{dt} \right] = \frac{dm_c}{dt} \quad (2)$$

Esta última ecuación introduce el incremento de masa precipitada o disuelta de cristales $\frac{dm_c}{dt}$.

Combinando las ecuaciones anteriores se obtiene la variación de la porosidad del material:

$$\frac{D_s \phi}{Dt} = [(1 - \phi)] \nabla \cdot \frac{d\mathbf{u}}{dt} - \frac{1}{\rho_c} \frac{dm_c}{dt} \quad (3)$$

La variación de la porosidad tiene dos componentes: el incremento de deformaciones volumétricas inducidas por los desplazamientos de los sólidos y el incremento de deformaciones volumétricas inducidas por la masa de cristales precipitada o disuelta.

Para el cálculo de la precipitación de cristales se ha tenido en cuenta que ésta puede producirse debido a los dos orígenes diferentes descritos anteriormente. La hipótesis considerada para calcular la masa de cristales precipitados, dm_c , en el caso de producirse evaporación, es que el agua contenida en los poros está saturada en sulfatos con una concentración C_{sat} . Entonces cualquier evaporación (dV_w) resulta en una masa precipitada de valor

$$dm = dV_w C_{\text{sat}} \quad (4)$$

Cuando el crecimiento de cristales de yeso tiene lugar en medio acuoso sin evaporación, el cálculo de masa precipitada o disuelta se resuelve a partir de las ecuaciones para la cinética de disolución/precipitación de la anhidrita y el yeso, que dependen de las variables: concentración de sulfatos disueltos en el agua, presión y temperatura.

Finalmente la cantidad de masa precipitada se relaciona con las deformaciones inducidas por precipitación de cristales mediante la ecuación

$$\frac{d\varepsilon_v}{dt} = \gamma \frac{1}{\rho_c} \frac{dm}{dt} \quad (5)$$

Donde γ es un coeficiente de medida del “esponjamiento” en la masa de roca. A falta de resultados experimentales se ha propuesto

$$\gamma = 1 + (\gamma_{\max} - 1) e^{-\frac{\sigma_{\text{ave}}}{P_c(1-\phi)}} \quad (6)$$

Donde P_c es una tensión de referencia asociada con la presión de cristalización; ϕ es la porosidad; σ_{ave} es la tensión media y γ_{\max} un parámetro de la ecuación.

y

$$\gamma = a \cdot e^{(-b \cdot (-\sigma))} \quad \text{si } \sigma < 0 \quad (7)$$
$$\gamma = \gamma_{\max} \quad \text{si } \sigma \geq 0$$

Donde σ es una tensión normal a una dirección de hinchamiento y a , b y γ_{\max} son parámetros del modelo; $\sigma < 0$ implica compresión.

Donde se observa la dependencia con las tensiones

Estas deformaciones se introducen en el proceso iterativo global y el modelo las tiene en cuenta para el cálculo de desplazamientos, deformaciones y tensiones. Cuando las deformaciones están impedidas, la cantidad de masa precipitada se traduce en incremento de las tensiones.

La formulación se ha implementado en el programa de Elementos Finitos para análisis Termo-Hidro-Mecánicos CODE_BRIGTH (DIT-UPC, 2002) [1].

Se ha modelado el hinchamiento observado en Lilla debido al crecimiento de cristales por evaporación de aguas sulfatadas y debido a precipitación de yeso sin evaporación, de forma separada. Las dos modelaciones se describen a continuación.

4.1 Modelación de la expansión debido a cristalización por evaporación

En esta simulación se ha considerado que el crecimiento de cristales de yeso en discontinuidades es debido únicamente a la evaporación de aguas sulfatadas. El modelo simula la evaporación impuesta por la atmósfera del túnel, reproduce la cristalización que esta evaporación implica y transforma la cristalización en deformaciones.

Los mecanismos de expansión en arcillitas sulfatadas están fuertemente condicionados por la disponibilidad de agua sulfatada en el entorno del túnel. La descarga tensional provocada por la excavación contribuye a la formación y apertura de fracturas. La permeabilidad de una roca fracturada puede ser varios órdenes de magnitud superior a la de la roca matriz. En primer lugar, en el modelo de cálculo se simula la excavación del túnel y la formación y apertura de fracturas. Las discontinuidades se simulan mediante un modelo que relaciona

las deformaciones con cambios en la apertura de las fracturas. La apertura de las fracturas se traduce en aumentos de la permeabilidad del material. De este modo se genera una zona de permeabilidad mayor en el entorno del túnel (Fig. 14).

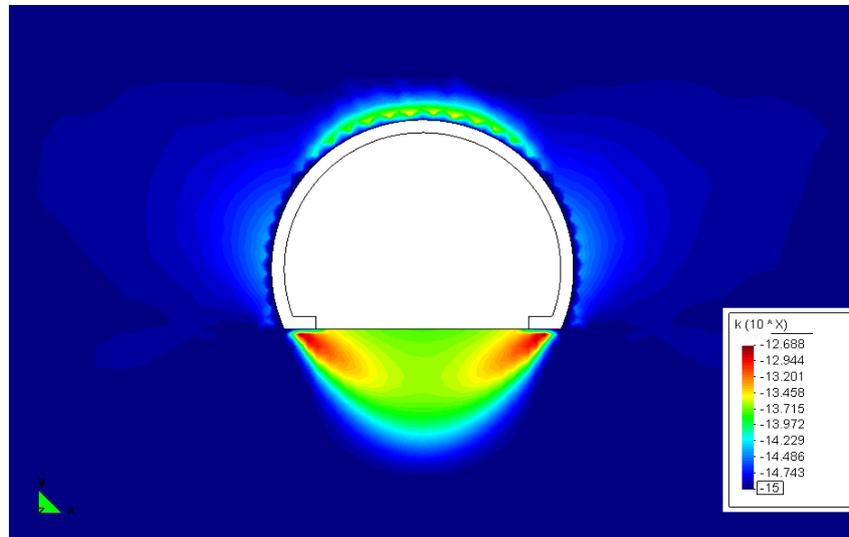


Figura 14: Simulación de la apertura de fracturas durante la excavación. Contornos de permeabilidad (m^2).

La simulación del flujo de agua hacia el interior del túnel se realiza mediante la imposición de (a) una humedad relativa baja en el interior del túnel y (b) una condición de contorno de presión de líquido en el contorno inferior del dominio (Fig. 15). Una humedad relativa del 60% supone una succión de unos 60 MPa.

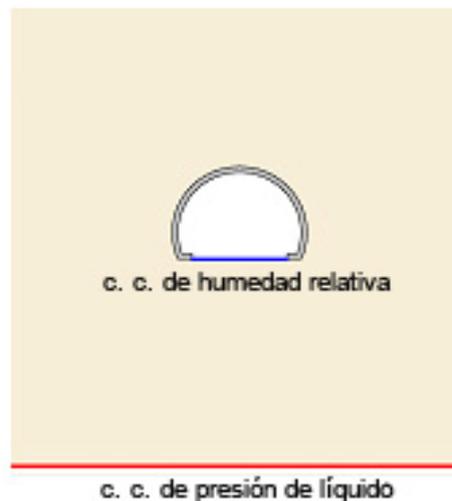


Figura 15: Condiciones de contorno de flujo.

En la Figura 16 se pueden observar los vectores de flujo líquido de agua. En las inmediaciones del túnel el agua se evapora debido a la acción de la humedad relativa impuesta. A partir de este punto el flujo de agua se produce por difusión de vapor.

En el modelo se considera el agua con una concentración de saturación en sulfatos. Al evaporarse el agua, estas sales precipitan. Para transformar el yeso precipitado en deformaciones volumétricas se utilizó la ecuación (6) con $\gamma_{max}=50$.

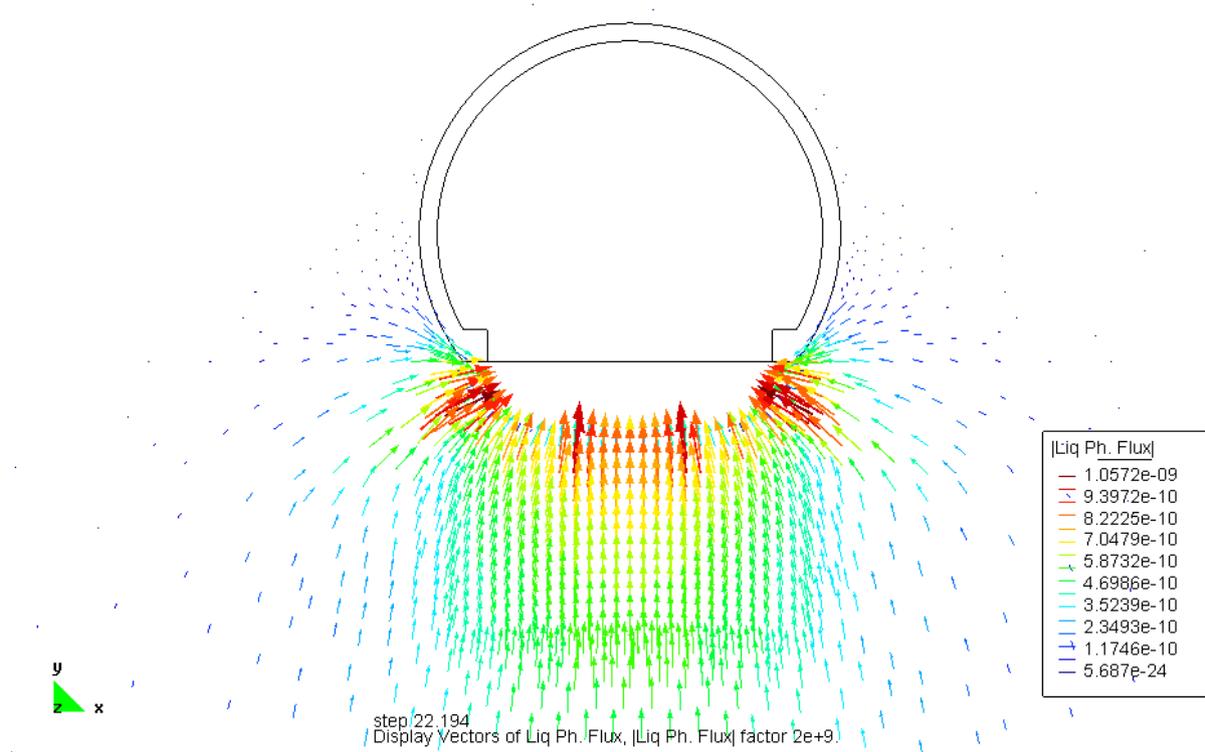


Figura 16: Vectores de flujo de agua hacia el túnel (kg/s).

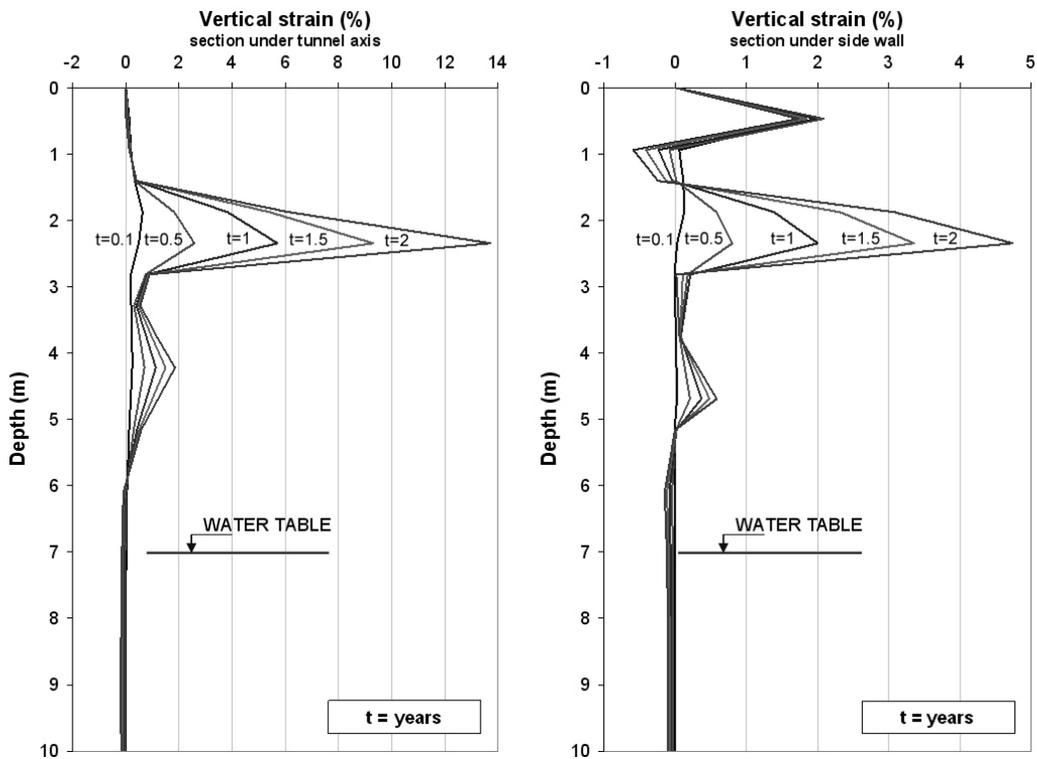


Figura 17: Deformaciones verticales en dos secciones verticales. A) Bajo el eje del túnel. B) Bajo el hastial.

En la Figura 17 se muestran las deformaciones verticales calculadas a partir de crecimiento de cristales inducido por la evaporación en el contorno del túnel. Los hinchamientos verticales calculados siguen las tendencias observadas en el campo por los extensómetros de alta precisión. Sin embargo los hinchamientos calculados son considerablemente menores que los medidos. La deformada calculada del revestimiento del túnel se muestra en la Figura 18.

El modelo predice que el desarrollo de levantamientos es esencialmente lineal en el tiempo (Fig. 19). Este resultado también está de acuerdo con las observaciones realizadas en el campo.

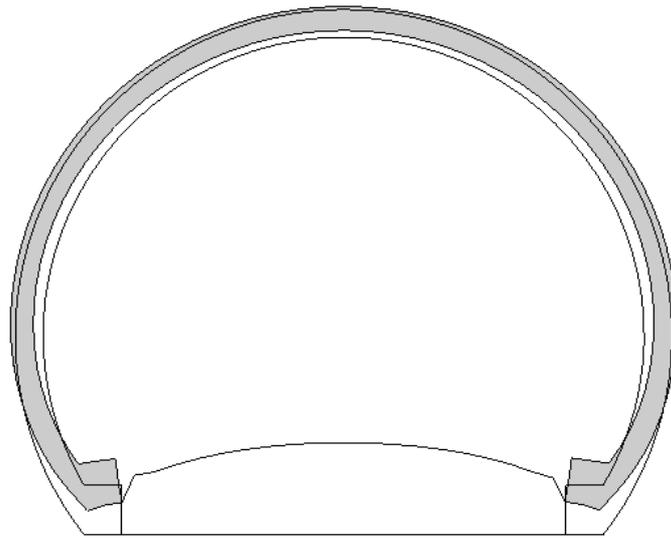


Figura 18: Deformada calculada del revestimiento del túnel (x20).

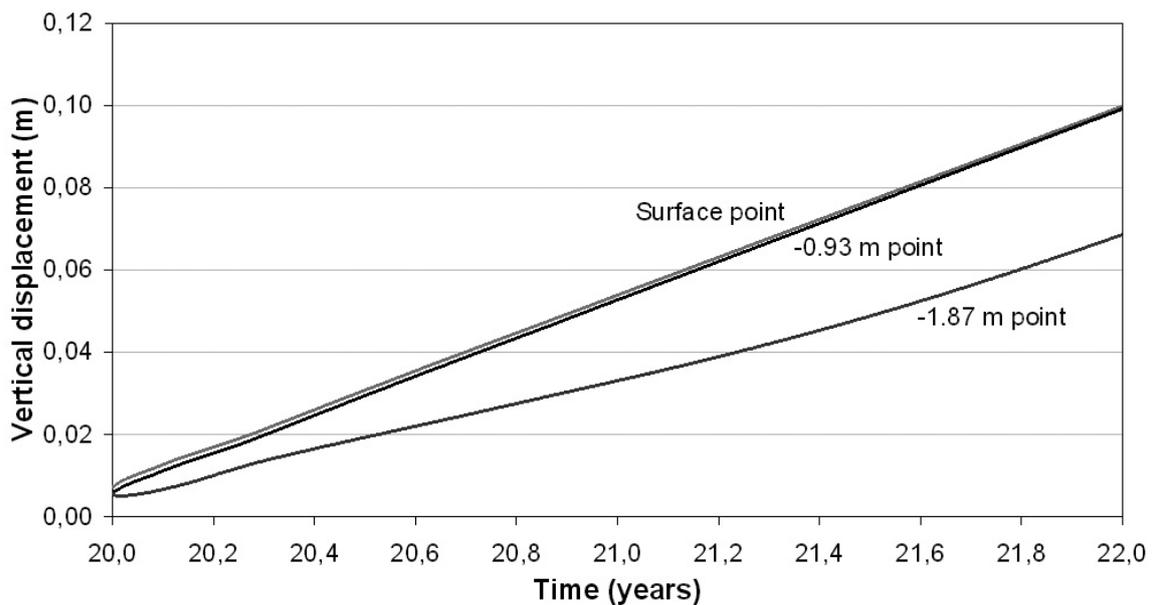


Figura 19: Desarrollo de desplazamientos verticales del suelo del túnel en el tiempo.

Finalmente, el modelo permite obtener las tensiones generadas en el sostenimiento (Fig. 20).

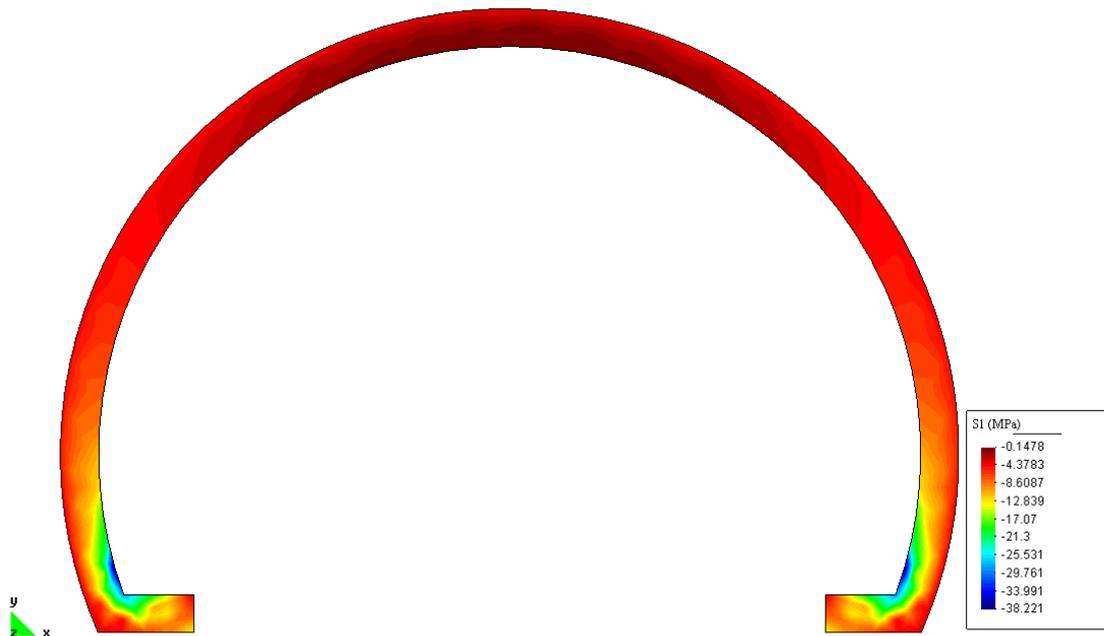


Figura 20: Distribución de tensiones en el sostenimiento. Tensión principal mayor.

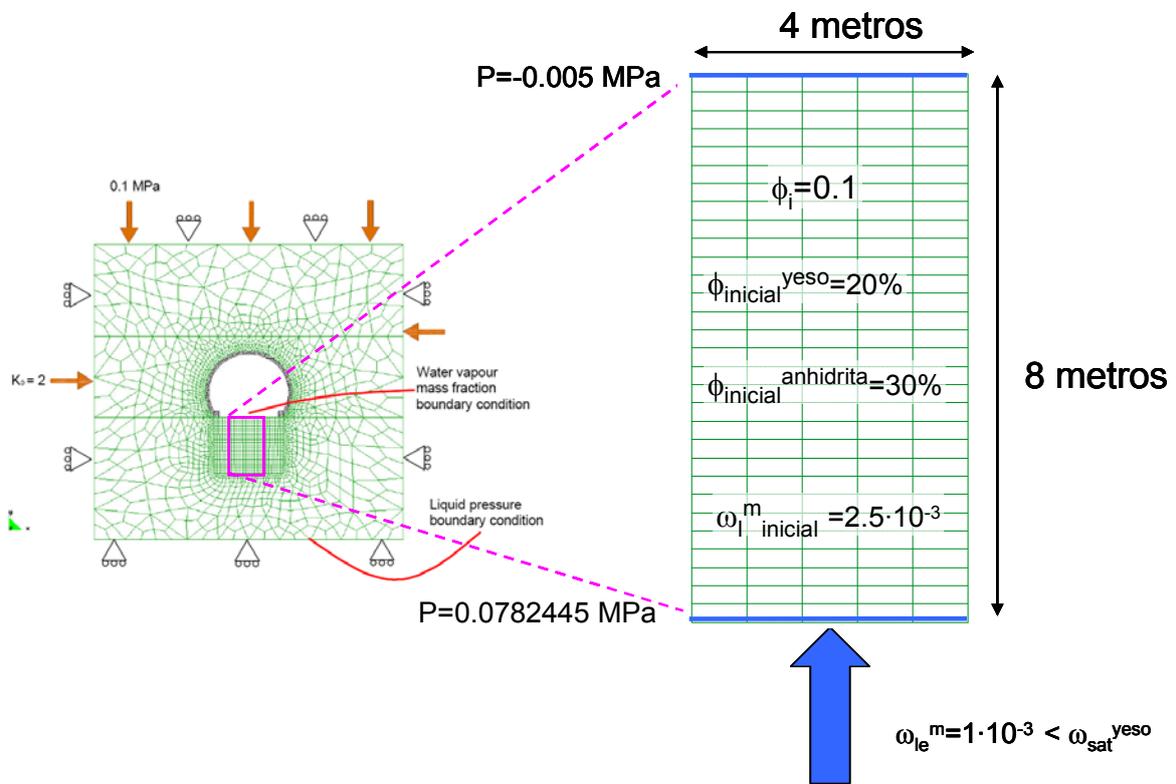


Figura 21: Esquema de la geometría modelada.

4.2 Modelación de la expansión por cristalización en ambiente saturado

Se ha simulado el fenómeno de hinchamiento ocurrido en el túnel de Lilla considerando únicamente el crecimiento de cristales de yeso debido a la sobresaturación en sulfatos del agua del macizo rocoso (mecanismo *b* de los dos descritos anteriormente). Se ha considerado que el material situado por debajo de la solera del túnel de Lilla está confinado lateralmente, y que los desplazamientos solo se desarrollan en dirección vertical. Esto es una aproximación a las condiciones de contorno impuestas por la excavación del túnel (condición de contorno libre en desplazamientos en el nivel de la solera). Por tanto, el comportamiento supuesto del material bajo la solera del túnel de Lilla es similar al existente en un ensayo edométrico.

Se ha modelado una columna de material bajo el nivel de la solera, situado en la zona activa. Se ha impuesto un flujo vertical unidimensional, representando el flujo ascendente hacia la solera plana del túnel. Se ha simulado que el agua que entra en el dominio de cálculo tiene una concentración menor que la de saturación respecto al yeso. La Figura 21 esquematiza la geometría simplificada del túnel de Lilla que ha sido modelada. Se han impuesto desplazamientos impedidos en el contorno horizontal inferior y en los contornos verticales de la geometría considerada.

La Figura 22 muestra la evolución en el tiempo de las fracciones volumétricas de yeso y anhidrita calculadas durante la simulación. Se observa que el contenido calculado de yeso aumenta en el tiempo a medida que el contenido calculado de anhidrita disminuye.

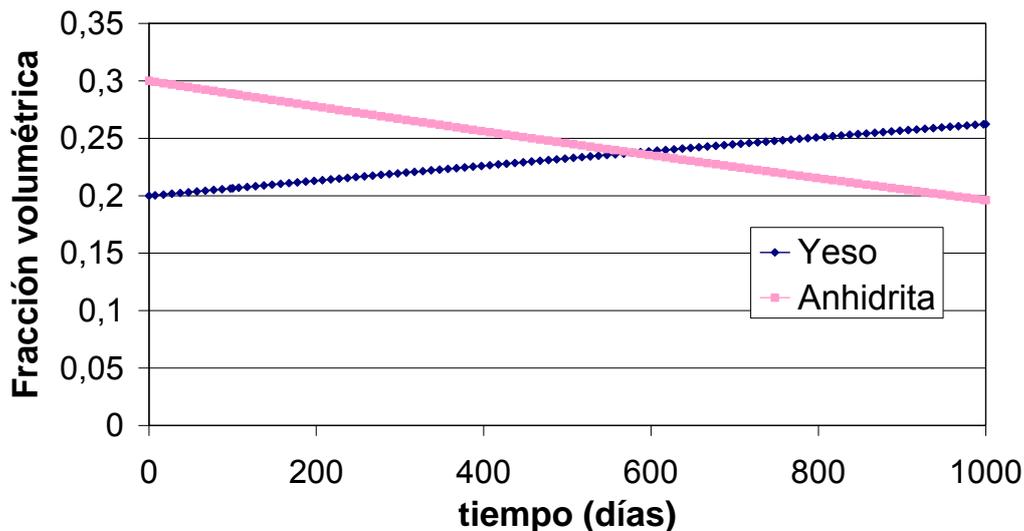


Figura 22: Evolución en el tiempo de las fracciones volumétricas de yeso y anhidrita.

En esta modelación, el cálculo de las deformaciones debidas al crecimiento de cristales, se ha realizado mediante la ecuación (7) con un valor máximo de γ igual a 1. La Figura 23 muestra la evolución de los desplazamientos verticales en un punto situado en la solera del túnel. Los resultados corresponden a un punto situado en el centro del contorno superior de la columna de terreno modelada. Los levantamientos calculados, considerando que se produce crecimiento de cristales por sobresaturación debido a la disolución de anhidrita, son mayores que los levantamientos calculados considerando que la precipitación de cristales de yeso se produce debido a la evaporación de aguas sulfatadas (Fig. 19). Ahora los levantamientos calculados son similares a las medidas "in situ" efectuadas en la solera, antes de las obras de reparación del túnel.

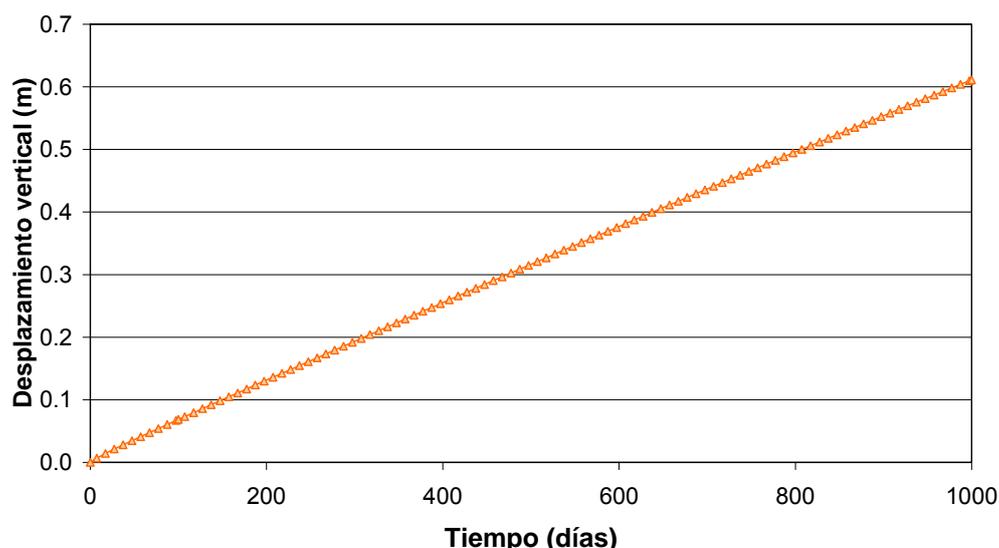


Figura 23: Desplazamiento vertical en el tiempo de un punto de la solera del túnel.

En el estudio del fenómeno de levantamientos de solera ocurrido en el túnel de Lilla debido al crecimiento de cristales de yeso, se debe tener en cuenta conjuntamente los dos mecanismos descritos de formación de cristales, (i) crecimiento de cristales de yeso debido a la evaporación de aguas sulfatadas, y (ii) crecimiento de cristales yeso como consecuencia de la sobresaturación de aguas sulfatadas debido a la disolución de la anhidrita presente en el macizo rocoso. Sin embargo, el análisis efectuado indica que el primer mecanismo proporciona hinchamientos de un orden de magnitud inferior a los correspondientes al segundo mecanismo. Por otra parte el segundo mecanismo conduce a levantamientos más próximos a los observados “in situ”.

5 REFUERZO DEL TÚNEL DE LILLA

5.1 Criterios para el análisis y diseño

Debido a la incertidumbre en el comportamiento a largo plazo de los sostenimientos flexibles, el túnel se reforzó adoptando una sección circular diseñada de acuerdo al principio de sostenimiento rígido. La hipótesis de base para el análisis y diseño fue la definición de la condición de carga máxima, variando el sector de acción de las presiones radiales totales. Las presiones de cálculo se seleccionaron a partir de las medidas de campo en las secciones instrumentadas de prueba: 4,5 MPa para la contrabóveda y 2,5 MPa para la bóveda (Marí y Pérez, 2003; Alonso y Berdugo, 2003).

La estructura se analizó en deformación plana a partir de una sección perpendicular al eje longitudinal del túnel. El sistema estructural analizado consistía en un anillo (1 m de espesor) sometido a los efectos del suelo expansivo. En este modelo no se producen flexiones longitudinales pues se considera que las presiones son constantes a lo largo del túnel. El revestimiento se simuló mediante una estructura de barras cuyos extremos se apoyaban en muelles que representaban el terreno.

La rigidez equivalente de estos muelles elásticos se calculó como el producto del coeficiente de balasto y del área de influencia de los muelles (distancia entre nodos x 1 m del túnel en dirección longitudinal). Los coeficientes tangenciales y radiales de balasto del suelo (334000

y 111330 kN/m³, respectivamente) correspondían a los valores propuestos por Alonso y Sagaseta (2003), que adoptan un módulo elástico característico del suelo de 250000 kN/m².

Dado que el revestimiento sufre en teoría flexo-compresión, la magnitud del ángulo que configura el sector crítico de la acción de presiones radiales totales no puede obtenerse sin un análisis previo de la dependencia de la fuerza axial y del momento flector con el ángulo del sector donde se aplica la carga (Fig. 24a). A partir de este análisis de sensibilidad se obtuvo el refuerzo de acero necesario (Fig. 24b). Se adoptó un revestimiento con un hormigón de 80 MPa de resistencia característica y acero B500S (Marí y Pérez, 2003). La Figura 24b indica que se obtiene la cantidad máxima total de refuerzo de acero (4,7%) para un ángulo de 60° del sector de aplicación de la presión de hinchamiento. Conocido este dato se estudiaron tres hipótesis de condiciones de carga sobre la sección del túnel (Fig. 25): (i) carga simétrica sobre contrabóveda, (ii) carga asimétrica sobre contrabóveda y (iii) carga asimétrica sobre la bóveda.

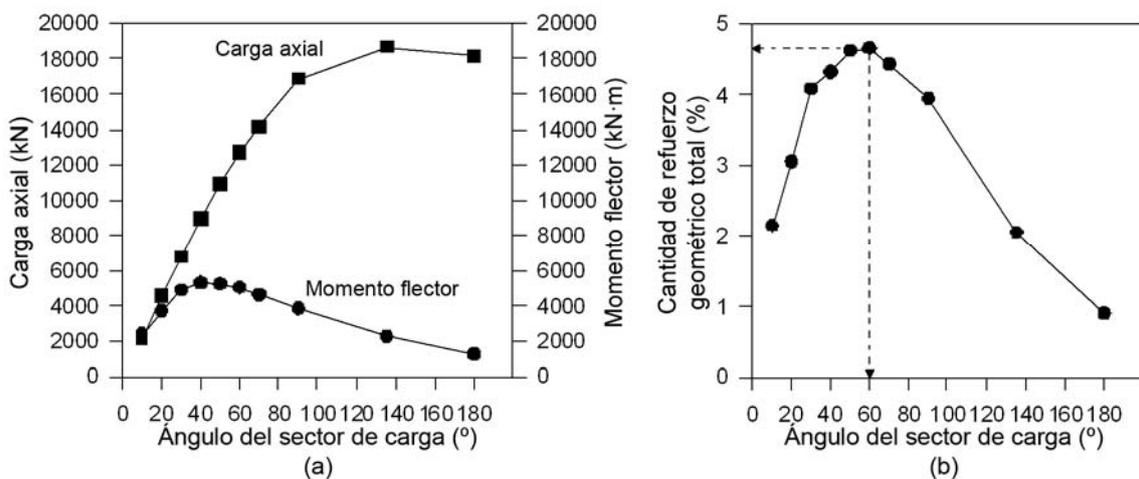


Figura 24: (a) Dependencia de la fuerza axial y el momento flector en el ángulo del sector de carga, (b) dependencia de la cantidad total de refuerzo geométrico en el ángulo del sector de carga (Marí y Pérez, 2003).

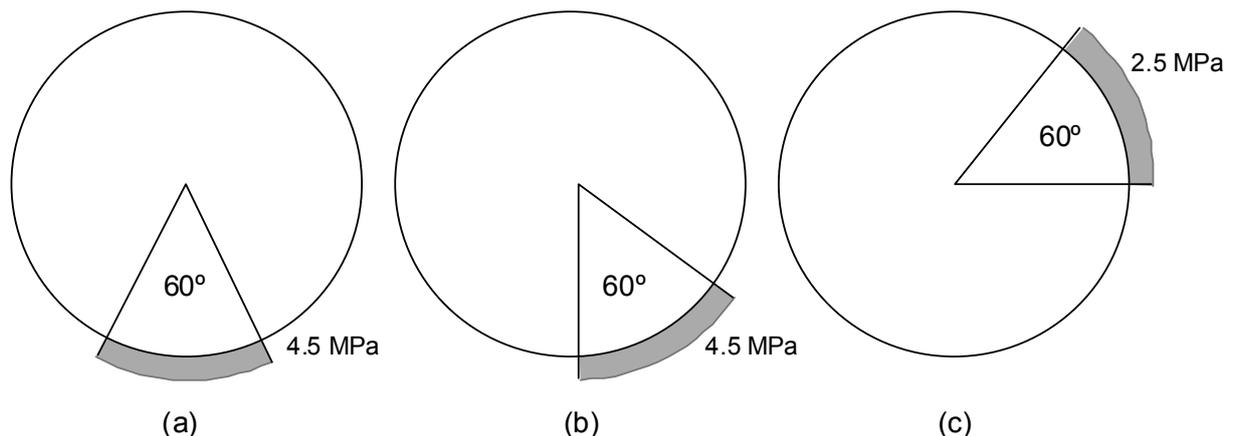


Figura 25: Hipótesis que conduce a las condiciones de carga extremas adoptadas para el diseño del túnel de Lilla.

Los análisis estructurales se llevaron a cabo mediante el código CONS, desarrollado por Marí y Pérez de la UPC. A partir de los cálculos de Marí y Pérez (2003), se definió una sección transversal óptima para reforzar el túnel de Lilla (Fig. 26).

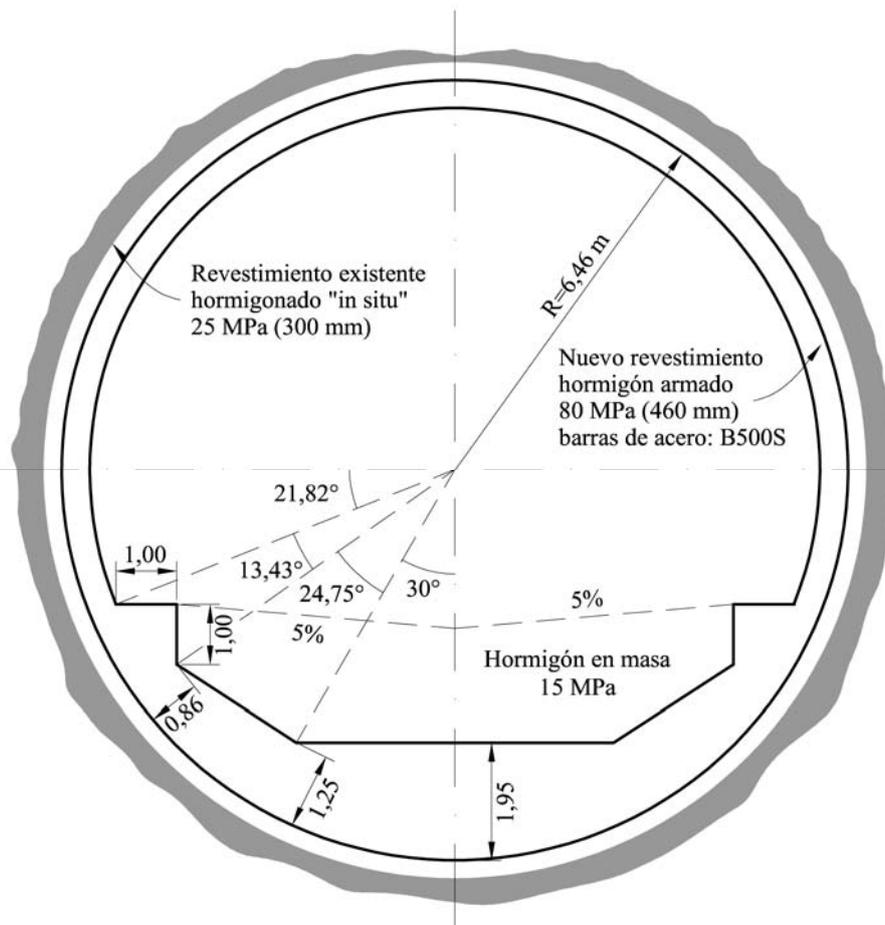


Figura 26: Sostenimiento rígido adoptado para el refuerzo del túnel de Lilla (Marí y Pérez, 2003).

5.2 Método de construcción

El refuerzo del túnel de Lilla con el nuevo sostenimiento rígido circular se llevó a cabo entre julio de 2004 y octubre de 2005. La construcción de la nueva sección se dividió en dos fases principales: (i) la excavación y construcción de la contrabóveda y (ii) el revestimiento de la bóveda. 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 y con secciones circulares (secciones de prueba), 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.

Para minimizar el deterioro de la roca debido a la excavación, la sección circular se excavó mediante martillos neumáticos y rozadoras. Los tramos excavados se sellaron con hormigón proyectado reforzado con fibras de acero para evitar cambios significativos en el contenido de agua de la roca y para garantizar el sostenimiento temporal de la excavación. El túnel no se impermeabilizó con geotextiles ni mediante cualquier otro tipo de material sintético. En un sector del túnel los encofrados para la contrabóveda se prefabricaron fuera del túnel en módulos de 2,4 m de largo y se introdujeron después en el túnel con grúas especiales. En el otro sector el armado se instaló "in situ". Los rendimientos constructivos fueron similares.

La sección circular se reforzó con una capa inicial de 8 barras por metro ($\varnothing = 32$ mm), y una segunda capa similar. Además, se instalaron cercos tanto de corte como longitudinales. El



Figura 28: Detalles del armado utilizado en el refuerzo del túnel de Lilla.

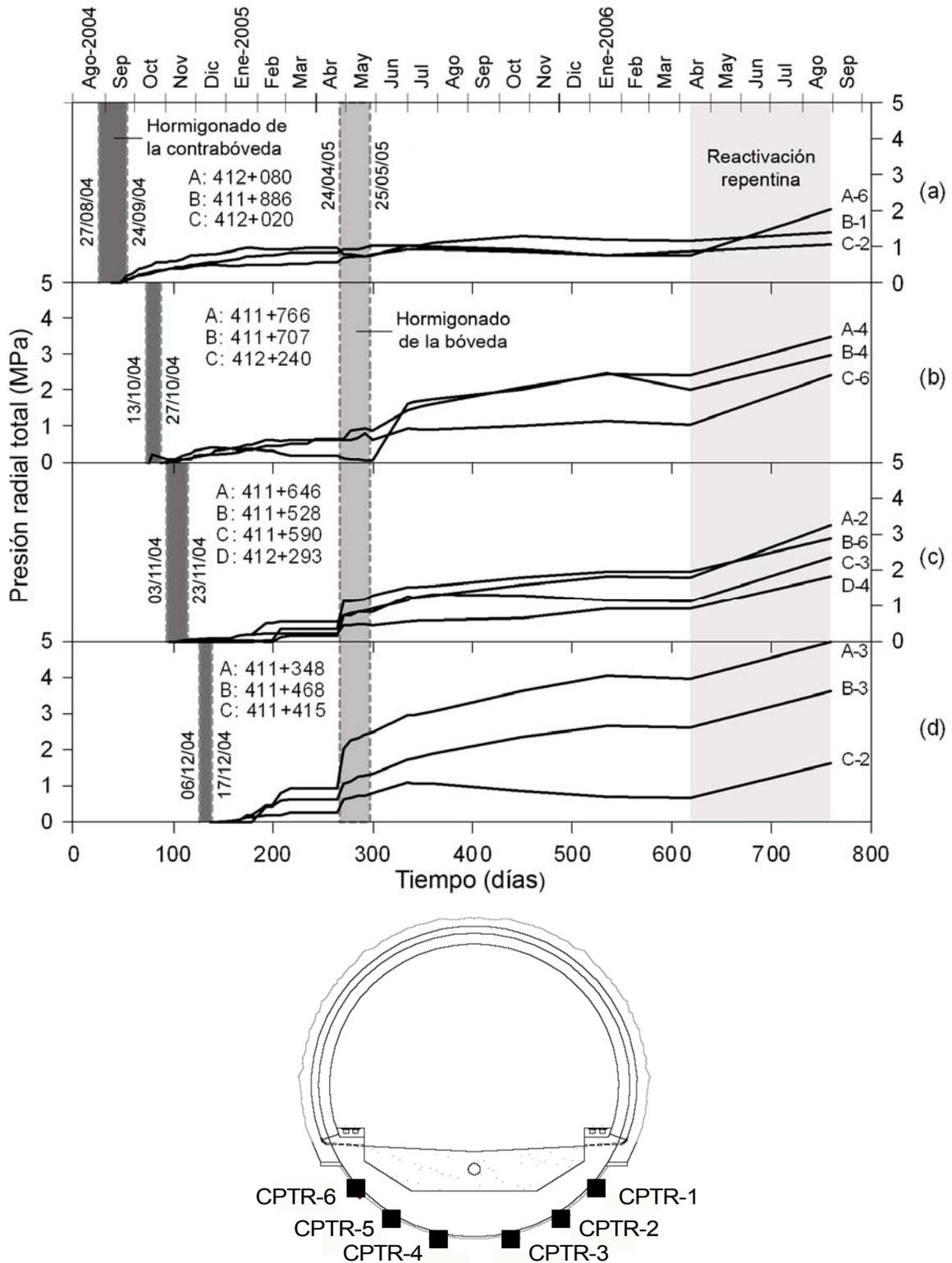


Figura 30: Evolución de las presiones radiales totales en la contrabóveda del túnel reforzado.

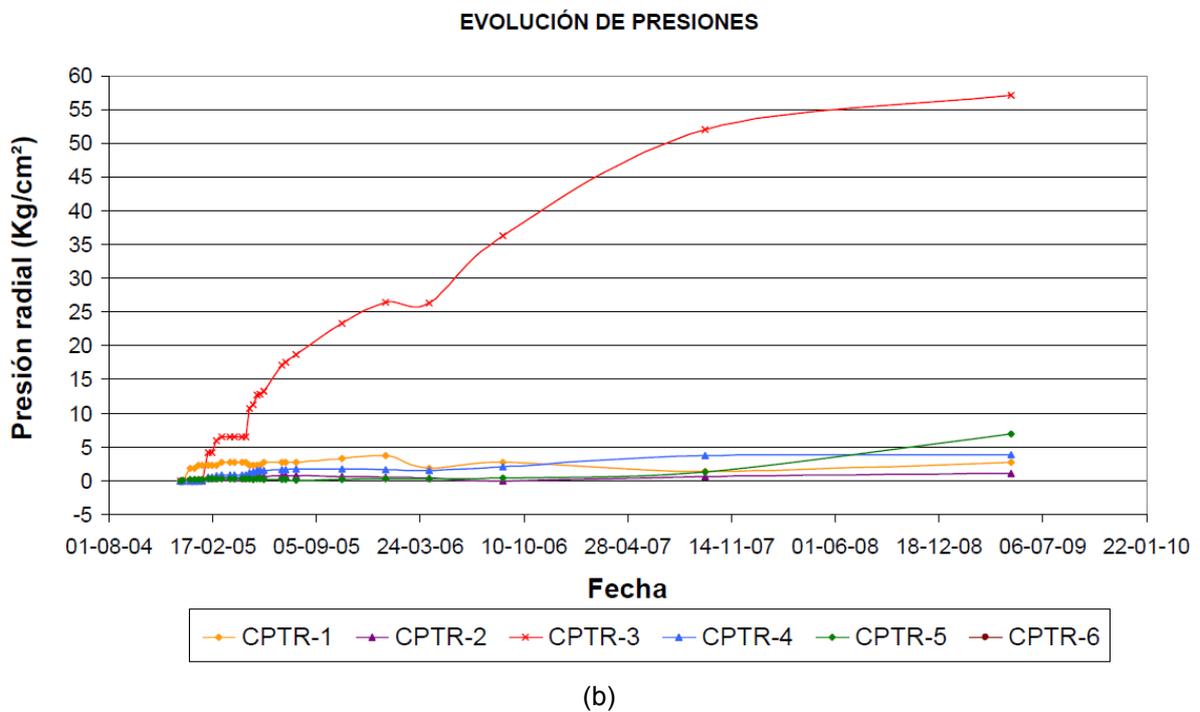
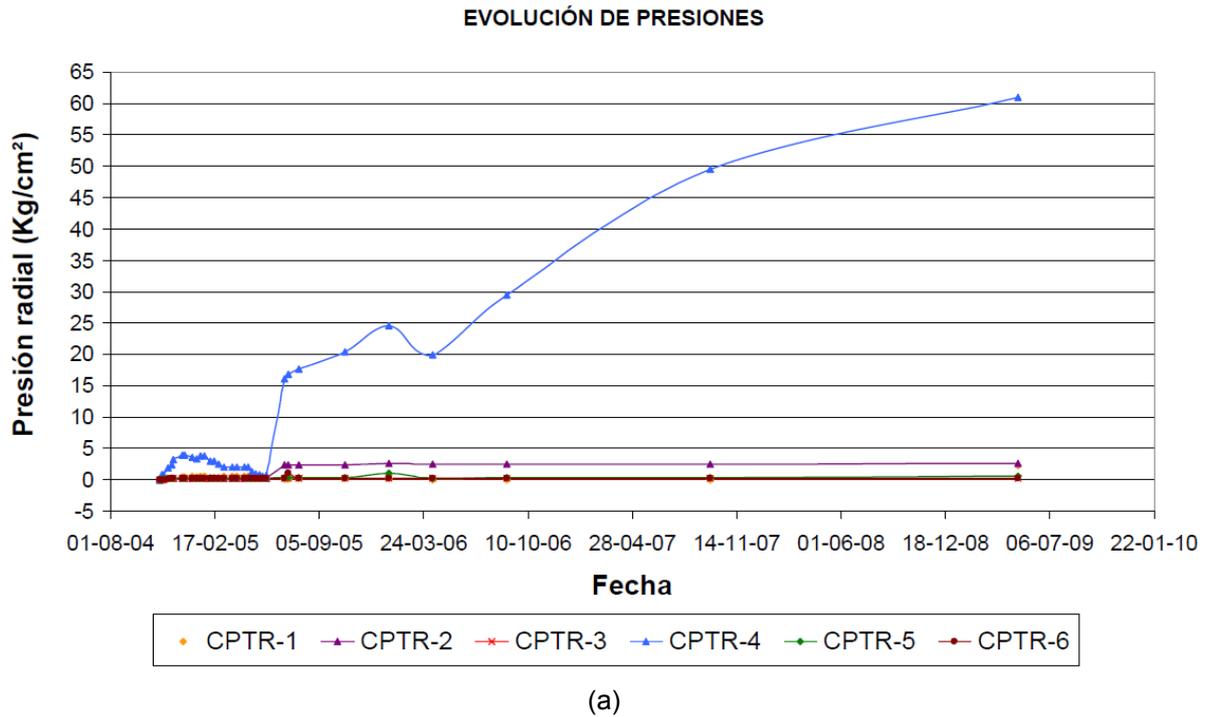


Figura 31: Evolución en el tiempo de las presiones radiales totales registradas por células de presión total radial instaladas en la contrabóveda en una sección de estudio (a) 411+707, (b) 411+468

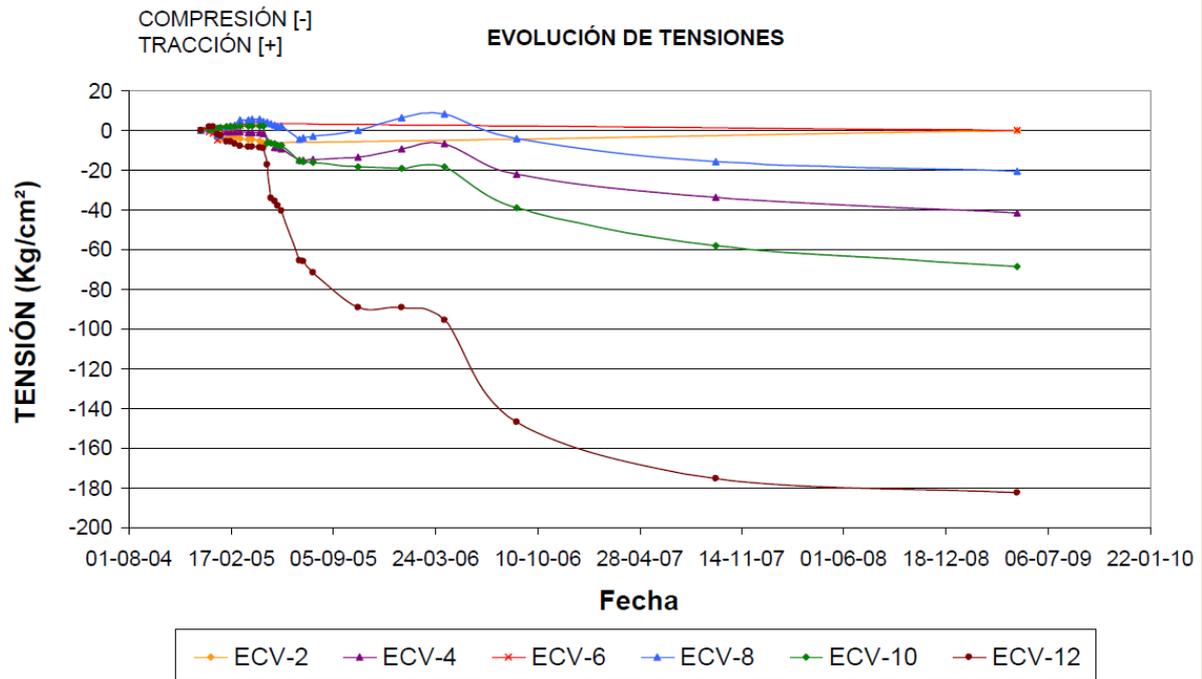


Figura 32: Evolución en el tiempo de las tensiones medidas en la sección 411+528 mediante extensímetros de cuerda vibrante instalados en la armadura del intradós de la contrabóveda

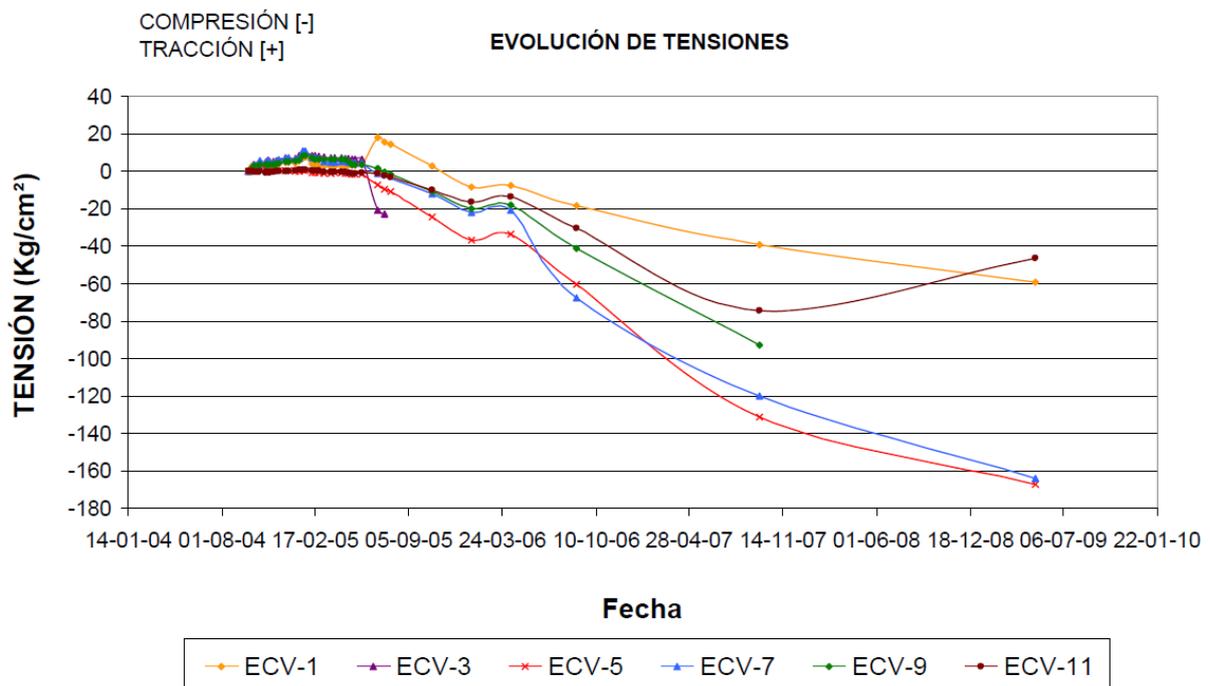


Figura 33: Evolución en el tiempo de las tensiones medidas en la sección 412+020 mediante extensímetros de cuerda vibrante instalados en la armadura del trasdós de la contrabóveda

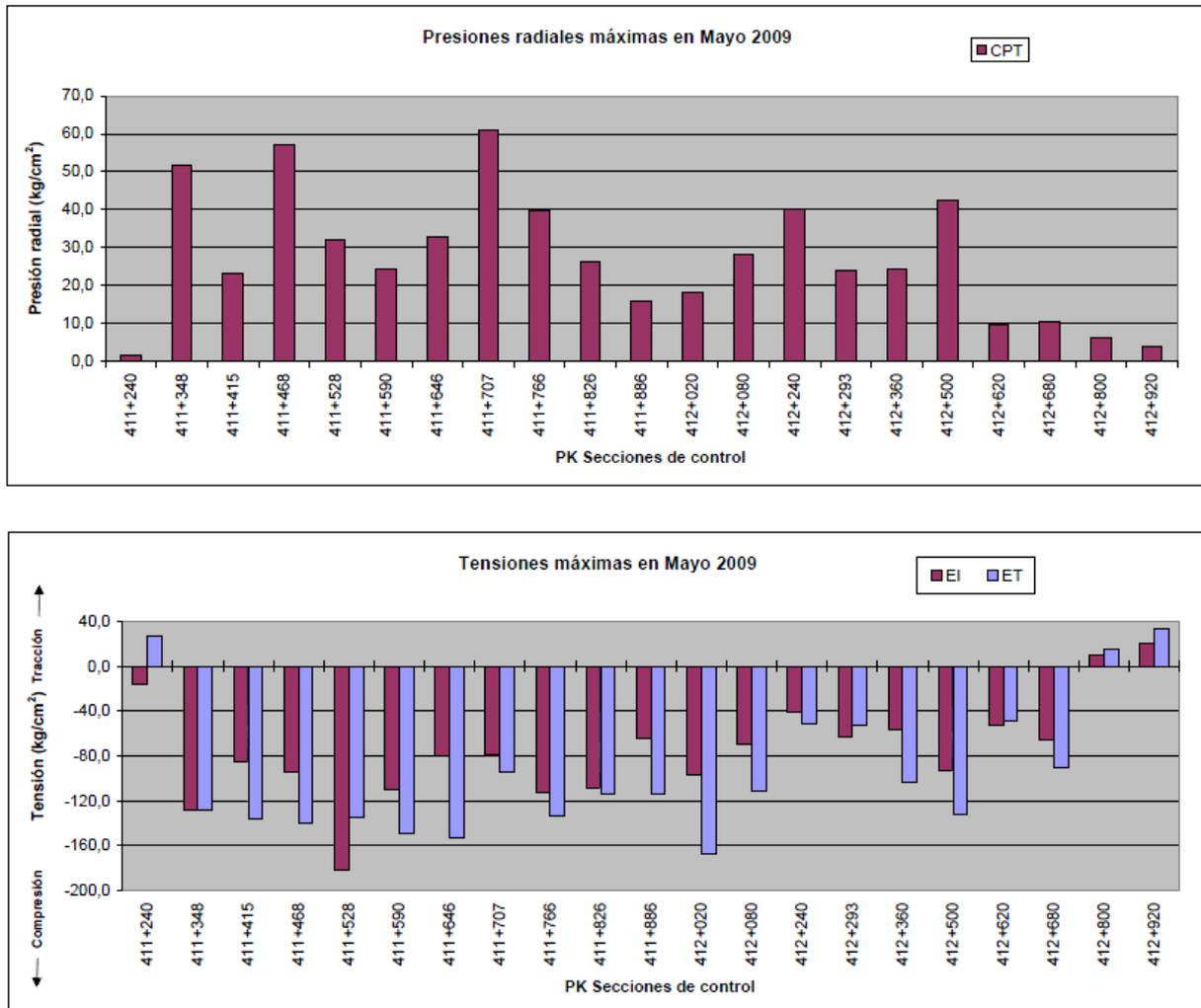


Figura 34: Valores máximos de presiones radiales y tensiones en la armadura (en el trasdós, ET, y en el intradós, EI) medidos en la contrabóveda del túnel, para cada una de las secciones de instrumentación del túnel de Lilla.

6 CONCLUSIONES

Se han resumido los principales aspectos fenomenológicos del hinchamiento observado en el túnel de Lilla y se han subrayado los papeles que tanto la composición química como la degradación de los materiales expuestos juegan en la respuesta expansiva. Se han presentado los conceptos que explican las características esenciales del comportamiento expansivo de las rocas que contienen sulfatos. Se enfatiza la importancia de las condiciones que llevan a la sobresaturación del agua subterránea. La humedad relativa (es decir, la succión de agua) de la atmósfera del túnel controla la evaporación del agua en las interfaces y ello conduce a la sobresaturación del agua en el terreno y al depósito de cristales de yeso. Sin embargo, en presencia de anhidrita, su disolución y posterior cristalización como yeso es probablemente el fenómeno más relevante para explicar el hinchamiento. En general los cristales se depositan en grietas o discontinuidades existentes o inducidas por la excavación del túnel. Estos conceptos parecen concordar con las observaciones de campo.

En el túnel de Lilla se ha comprobado que en el tramo que sufrió el fenómeno expansivo se daban dos circunstancias, ausentes (o al menos mucho menos marcadas) en el tramo que no sufrió daños: la presencia dominante de anhidrita y la fracturación más intensa de la roca.

Por tanto, se reduce el riesgo de que aparezcan fenómenos de hinchamiento si se evita:

- La presencia de agua en el interior del túnel. En Lilla se observó que la entrada de agua por uno de los emboquilles produjo la saturación de la roca expuesta durante la excavación de la solera. Posteriormente, el secado de la roca por evaporación produjo levantamientos importantes. Este mecanismo se ha comprobado en laboratorio
- La circulación de agua en el macizo rocoso. En general todo lo que conduzca a un aumento de la permeabilidad incrementará el riesgo de que el agua del macizo se mueva y se inicien los procesos resumidos anteriormente. La excavación del túnel relaja las tensiones iniciales y produce la apertura de diaclasas o discontinuidades existentes, incrementando la permeabilidad media. En rocas arcillosas de calidad media o baja, los cambios tensionales pueden producir daño a la roca por destrucción de la cementación. Una consecuencia directa de este daño es el incremento de la permeabilidad.
- La creación de espacios en la roca (nuevas fisuras, apertura de las existentes), que permitan la cristalización del yeso.

A pesar de lo anterior, subsisten incertidumbres en la comprensión de los fenómenos de hinchamiento y del control que pueden ejercer otras variables no mencionadas, algunas de tipo químico (por ejemplo el papel de otras sales en la precipitación de yeso) o físico (la tipología de los depósitos de anhidrita y yeso y algunas características como su superficie expuesta, por unidad de masa). Por ello se recomienda que, en la medida de lo posible, las decisiones importantes de proyecto se tomen a la luz de la evidencia que pueda conseguirse en la propia obra, para incorporar, de esta manera, las condiciones propias del macizo atravesado y de la forma de ejecución de la excavación.

Una sección de excavación más reducida o evitar la excavación mediante explosivos provoca una descompresión de la roca de alcance más limitado y el menor diámetro permite resistir con menos revestimiento las presiones de hinchamiento, en caso de que se produzcan.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer a la Administradora de Infraestructuras Ferroviarias de España (ADIF) por su colaboración y asistencia técnica en la preparación de este trabajo.

REFERENCIAS

- ADIF (2006). Línea de Alta Velocidad Madrid-Zaragoza-Barcelona-Frontera Francesa, Tramo: Lleida – Martorell, Subtramo IV-b. Refuerzo del revestimiento en los Túneles de Lilla, Camp Magré y Puig Cabrer (Tarragona).
- Alonso, E.E. y Berdugo, I.R. (2003). L.A.V. Madrid-Barcelona-Frontera Francesa, Tramo Lleida-Martorell, Subtramos IV-V. Informe Geotécnico Preliminar. Túneles de Lilla, Camp Magré y Puig Cabrer: 32 pp.
- Alonso, E.E. y Sagaseta, C. (2003). *Informe previo sobre los problemas derivados de la expansividad del terreno en los túneles de Lilla, Camp Magré y Puig Cabrer*. Documento preparado para la

- Dirección Facultativa de la Línea de Alta Velocidad Madrid – Barcelona – Frontera Francesa, Tramo Lleida-Martorell, Subtramos IV – V.
- Delage, P., Howat, M.D. y Cui, Y.J. (1998). The relationship between suction and swelling properties in a heavily compacted unsaturated clay. *Engineering Geology* 50: 31-48.
- DIT-UPC, "CODE_BRIGHT. A 3-D program for thermo-hydro-mechanical analysis in geological media. User's guide", Barcelona: Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE), (2000).
- Kontrec, J., Kralj, D. y Brecevic, L. (2002). Transformation of anhydrous calcium sulphate into calcium sulphate dihydrate in aqueous solutions. *Journal of Crystal Growth* 240(1-2): 203-211.
- Krause, H. (1977). Zur geologie und statistik des tunnelbaus in Baden-Württemberg unter besonderer berücksichtigung der Keupertunnel, Jh. Geol. Landesamt, Baden-Württemberg.
- Marí, A. y Pérez, G. A. (2003). Refuerzo del revestimiento de los túneles de Lilla y Camp Magré para la Línea de Alta Velocidad Madrid-Zaragoza-Barcelona-Frontera Francesa. Tramo Lleida-Martorell. Provincia de Tarragona.
- Nagel, D. (1986). Sohlhebungen in den Keupertunneln von Baden-Württemberg, Tunnelbau, Kontakt & Studium, Band 184: 110-125.
- Spaun, G. (1974). *Über die Ursachen von Sohlhebungen in Tunneln des Gipskeupers, Festschrift Leopold Müller, Karlsruhe.*
- Tang, A.M. y Cui, Y.J. (2005). Controlling suction by the vapour equilibrium technique at different temperatures and its application in determining the water retention properties of MX80 clay. *Can. Geotech. J.* 42: 287-296.
- Wittke, W. y Pierau, B. (1979). Fundamentals for the design and construction of tunnels in swelling rocks. *Proc. Int. Congr. on Rock Mechanics*, Montreux, 2: 719-729.