



ANNA
Ramon

Doctora ingeniera de Caminos,
Canales y Puertos
Investigadora en el Centro
Internacional de Métodos
Numéricos en Ingeniería –
Universitat Politècnica de Catalunya



EDUARDO
Alonso

Doctor ingeniero de Caminos,
Canales y Puertos
Catedrático de Ingeniería del
Terreno en la Universitat Politècnica
de Catalunya



SEBASTIÀ
Olivella

Doctor ingeniero de Caminos,
Canales y Puertos
Catedrático de Ingeniería del
Terreno en la Universitat Politècnica
de Catalunya

Modelación numérica

de túneles excavados en rocas sulfatadas

RESUMEN

Las expansiones ocurridas en el túnel de Lilla son el resultado del crecimiento de cristales de yeso en discontinuidades. Se describe un procedimiento de análisis numérico para el diseño de un túnel en roca anhidrítica expansiva. El modelo incorpora un acoplamiento hidro-mecánico y el transporte de sales disueltas en el agua intersticial e incluye el daño generado en la roca tras la excavación del túnel, la precipitación de cristales en discontinuidades y la dependencia entre las deformaciones de hinchamiento y la masa precipitada de yeso. La respuesta del modelo es coherente con las medidas de campo disponibles.

PALABRAS CLAVE

Túneles, rocas sulfatadas, expansión, anhidrita, cristales, yeso

ABSTRACT

Expansions occurred in Lilla tunnel are the result of gypsum crystal growth in discontinuities. A numerical analysis procedure for the tunnel design in expansive anhydritic rock is described. The model incorporates a hydro-mechanical coupling and the transport of dissolved salts in groundwater and includes the damage generated in the rock after the excavation of the tunnel, the precipitation of crystals in discontinuities and the dependency between swelling deformations and the precipitated mass of gypsum. The model response is coherent with the available field measurements.

KEYWORDS

Tunnels, sulphated rock, expansion, anhydrite, crystals, gypsum

1 Introducción

Los túneles excavados en formaciones geológicas ricas en anhidrita pueden experimentar levantamientos severos que normalmente se manifiestan en la solera del túnel. Después de la instalación del revestimiento, las presiones de hinchamiento medidas en las células de carga son a menudo altas o muy altas (uno o varios MPa). Durante décadas se han descrito casos históricos de esta fenomenología principalmente en el Keuper en Europa Central (Grob, 1976; Henke, 1976; Einstein, 1979, 1996; Steiner, 1993; Amstad and Kovári, 2001; Kovári & Descoeudres, 2001; Wittke-Gattermann & Wittke, 2004; Anagnostou, 2007; Alonso et al., 2013).

El macizo rocoso excavado en el túnel de Lilla, que se analizará aquí, es una roca Terciaria que presenta unas características (matriz arcillosa, proporciones de anhidrita y yeso variables y una historia de deformaciones tectónicas) que es común en las rocas del Keuper.

Los métodos de análisis publicados para el diseño de un túnel en terreno expansivo incorporan una ley de hinchamiento que relaciona la tensión de confinamiento y la deformación de hinchamiento obtenida a partir de ensa-

yos edométricos de hinchamiento libre (Huder & Amberg, 1970). Kóvari et al., (1988), Wittke & Rißler, (1976); Gysel, (1987) y Anagnostou, (1995), describen contribuciones en este sentido. Algunos artículos describen procedimientos acoplados flujo-deformación que pueden incluir tiempo, referirse a condiciones anisotrópicas y reproducir trayectorias de tensiones esperadas tras las excavaciones de túneles (Anagnostou, 1993; Heidkamp and Katz, 2004; Wahlen and Wittke, 2009; Schädlich et al., 2013, Barla, 2008). Kramer and Moore (2005) describen el comportamiento de roca expansiva mediante modelos viscoelásticos.

Los procedimientos de cálculo desarrollados para rocas arcillosas expansivas no sulfatadas encuentran dificultades importantes para analizar los hinchamientos relacionados con la anhidrita. En las rocas sulfatadas las deformaciones de hinchamiento son principalmente una consecuencia de la precipitación de cristales de yeso en soluciones acuosas (Ramon and Alonso, 2013; Alonso et al., 2013). Esta reacción química se describe mediante ecuaciones cinéticas, que requieren información sobre la superficie de anhidrita y yeso expuesta al agua, las tasas de masa de anhidrita disuelta y yeso precipitado, las concentraciones de sulfato e iones existentes en el agua del macizo y la concentración de saturación del yeso y la anhidrita. Las "leyes de hinchamiento" propuestas para

las rocas arcillosas expansivas no son adecuadas para describir el hinchamiento inducido por los sulfatos y se requieren alternativas realistas.

En la roca arcillosa sulfatada del túnel de Lilla (Alonso et al., 2007) el hinchamiento fue atribuido a la precipitación de yeso a partir de soluciones sulfatadas sobresaturadas en el agua del macizo. La primera hipótesis explorada para explicar la sobresaturación fue la evaporación del agua en la interfase roca-túnel-atmósfera (Alonso and Olivella, 2008). Sin embargo, la predicción numérica de las deformaciones basada en este mecanismo mostró que difícilmente la evaporación produce las expansiones de gran magnitud observadas.

El caso del viaducto de Pont de Gardí (Alonso and Ramon 2013; Ramon and Alonso 2013) fue una confirmación de campo de que la precipitación de yeso no requieren ningún proceso de evaporación. El agua, en presencia de anhidrita, alcanza condiciones de sobresaturación con respecto del yeso. Esta observación condujo a un modelo computacional para el fenómeno expansivo, que fue descrito en Ramon et al. (2009). Ramon and Alonso (2013) describen una formulación generalizada, incluida en el código de Elementos Finitos flujo-deformación CODE_BRIGHT (2017)

La figura 1 ilustra el concepto clave. El agua en una roca arcillosa densa circula predominantemente a lo largo de fisuras, naturales o inducidas. La anhidrita expuesta en fisuras se disuelve y crea una solución sobresaturada capaz de precipitar yeso, especialmente si se encuentran cristales de yeso en las inmediaciones. La figura 2 muestra el crecimiento de cristales de yeso en forma de aguja en una discontinuidad abierta.

Este artículo describe las hipótesis del modelo desarrollado y el análisis numérico del túnel de Lilla durante la excavación inicial. Los registros del hinchamiento de la solera se compararán con los cálculos. El modelo es una evolución de desarrollos previos con el objetivo de abordar fenómenos descritos anteriormente.

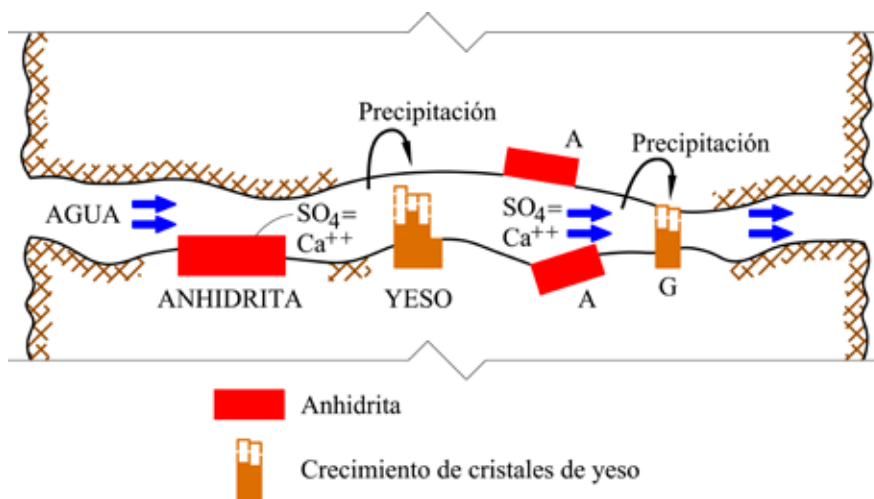


Fig. 1. Representación conceptual del mecanismo de expansión debido a la disolución y precipitación de minerales sulfatados en discontinuidades

2 Descripción del modelo

Se distinguen dos escalas en el medio poroso continuo que representa el macizo rocoso. La escala mayor requiere la formulación de ecuaciones de balance clásicas para la masa de las partículas sólidas, agua y gas en poros. El flujo de líquido transporta solutos y su balance también se ha formulado. Las condiciones de equilibrio estáticas completan la formulación. La escala local incluye el comportamiento mecánico de la roca y un conjunto de fenómenos adicionales, que reproducen la disolución/precipitación de anhidrita y yeso y su efecto en la roca.

Ramon and Alonso (2013) formularon las ecuaciones de balance y equilibrio. Esta sección presenta la modelización de los fenómenos locales.

Daño de la roca

El daño de la roca está asociado al desarrollo de fisuras. En el modelo, cuando la deformación de tracción principal mayor calculada alcanza un valor crítico predeterminado, se "inserta" una apertura plana virtual en un elemento finito continuo. En la aplicación más simple del método el efecto de la apertura de una fractura en un elemento finito dado se extiende a todo el elemento y la permeabilidad se modifica siguiendo una ley cúbica.

La apertura de discontinuidades se explica por a) Cambios de tensión efectiva debido a la excavación del túnel y los subsiguientes cambios en la presión de poros y las condiciones de contorno y b) Precipitación de yeso.

La precipitación de yeso requiere condiciones de sobresaturación en el agua del macizo. La precipitación de cristales solo es posible en cavidades o grietas abiertas con una apertura mínima. La distribución de poros de la roca inalterada de Lilla muestra un rango único de poros muy pequeños en el rango 2 -10 nm. Charola et al. (2007) resaltan la tendencia del yeso a acumularse y generar tensiones internas en la roca, lo que favorece el deterioro. Ellos describen los cristales observados en microscopio y mencionan tamaños en el rango de las micras.

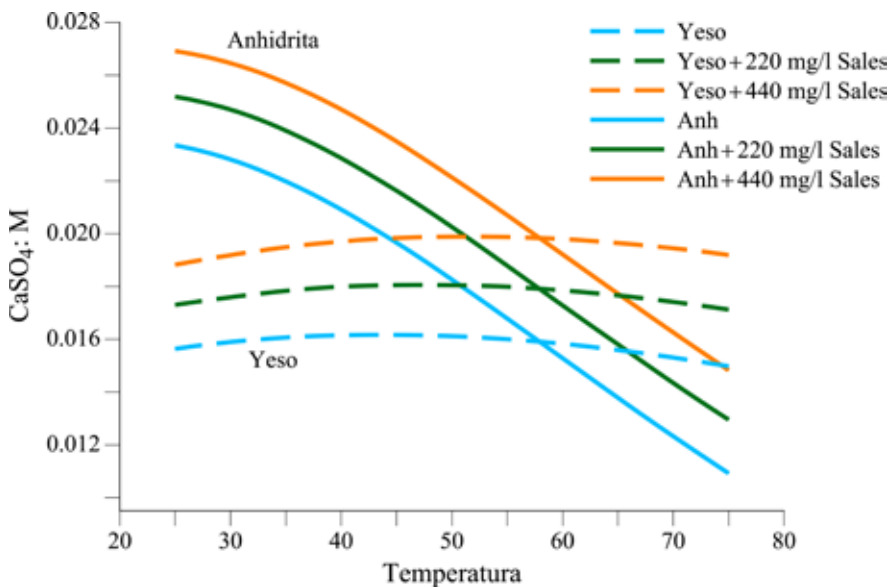


Fig. 2. Crecimiento de cristales de yeso en la superficie de una discontinuidad de una muestra de roca recuperada del túnel de Lilla

Fig. 3. Solubilidades de anhidrita y yeso para diferentes temperaturas y diferentes contenidos de la sal NaCl disuelta en el agua

La masa de anhídrita y yeso disuelta o precipitada en el tiempo se calcula mediante ecuaciones cinéticas en función de: el grado de sobresaturación del agua en sulfatos respecto el yeso y la anhídrita, que depende de la temperatura y de la tensión aplicada sobre los cristales (Scherer 1999), un coeficiente cinético que incluye la superficie específica del mineral sulfatado y una constante que describe la velocidad de disolución/precipitación de la masa de yeso y anhídrita.

El efecto del contenido de sal en el agua sobre las concentraciones de equilibrio de yeso y anhídrita se aproximó mediante la realización de cálculos de interacción química con la ayuda del programa PHREEQC (Parkhurst and Appelo, 1999). El aumento de la concentración de sal (NaCl) incrementa la concentración de equilibrio del yeso y de anhídrita en proporciones similares (figura 3). La implicación es que el riesgo de precipitación de yeso en presencia de anhídrita no cambia mucho cuando otras sales se incluyen en el análisis. En el análisis de Lilla descrito más adelante la temperatura de la roca del túnel se fijó en 15°C de acuerdo a medidas de campo. Por tanto, el yeso precipita y la anhídrita se disuelve (figura 3).

Masa de yeso precipitada y deformación de la roca

El crecimiento de cristales de yeso en poros y fisuras puede conducir a un aumento de volumen mayor que el volumen de yeso precipitado. La figura 1 ilustra esta idea.

Oldecop and Alonso (2012) y Ramon and Alonso (2013) propusieron una transformación de la masa de cristales precipitada en deformación de la roca:

$$(1) \quad \frac{d\varepsilon_i}{dt} = \frac{\gamma_i}{\rho_{\text{yeso}}} \frac{dm_{\text{yeso}}}{dt}$$

donde γ_i es un coeficiente que mide el efecto de “esponjamiento” de la precipitación en la masa de roca a lo largo del eje x_i . El análisis de ensayos descritos por Huber et al., (2015) sugiere que el efecto de la tensión puede aproximarse mediante,

$$(2a) \quad \gamma_i = \gamma_{\text{max}} e^{-b\sigma'_i} \text{ para } \sigma'_i > 0$$

$$(2b) \quad \gamma_i = \gamma_{\text{max}} \text{ para } \sigma'_i = 0$$

donde b es un parámetro del modelo.

3 Análisis numérico

El túnel de Lilla se excavó en los años 2001-2002 mediante perforación y voladura en dos fases: avance y destroza. Tenía una sección transversal en herradura con un área de 117 m², una longitud de 2034 m y un recubrimiento variable entre 32 y 110 m. El túnel atraviesa una roca arcillosa sulfatada del Eoceno con importantes plegamientos y fallas.

La roca arcillosa excavada contiene illita y paligorskita (50 %-70 %), anhídrita (7 %-50 %), yeso (0-7 %) y dolomita y cuarzo en menores proporciones.

Inicialmente el sostenimiento de la excavación del túnel consistió en una capa de hormigón proyectado y hormigón in-situ de 300 mm de espesor, que incluía una losa plana en la solera. Inmediatamente después de la finalización del hormigonado se midieron levantamientos severos en el periodo octubre 2002-diciembre 2003. Se instalaron micrómetros deslizantes y se recuperaron registros de roca en sondeos perforados desde la solera del túnel.

Posteriormente la sección en herradura original se transformó en una sección circular con un revestimiento de hormigón de alta resistencia fuertemente armado. El túnel se puso en servicio en diciembre de 2006. Alonso et al. (2013) describieron este caso en detalle.

Este artículo examina el comportamiento inicial del túnel en el periodo 2002-2003. Se observó una fuerte variabilidad de la magnitud del hinchamiento en sentido longitudinal y transversal. Esta respuesta heterogénea se atribuye a la distribución irregular de la concentración de anhídrita y a detalles de la fracturación de la roca natural, muy afectada por la actividad tectónica intensa. La sección de referencia analizada está situada en el PK 411+600. Además de perfiles verticales de las propiedades de la roca (figura 4), están disponibles medidas de levantamientos en las inmediaciones de esta sección.

La figura 5 muestra la geometría y las condiciones de contorno usadas en los

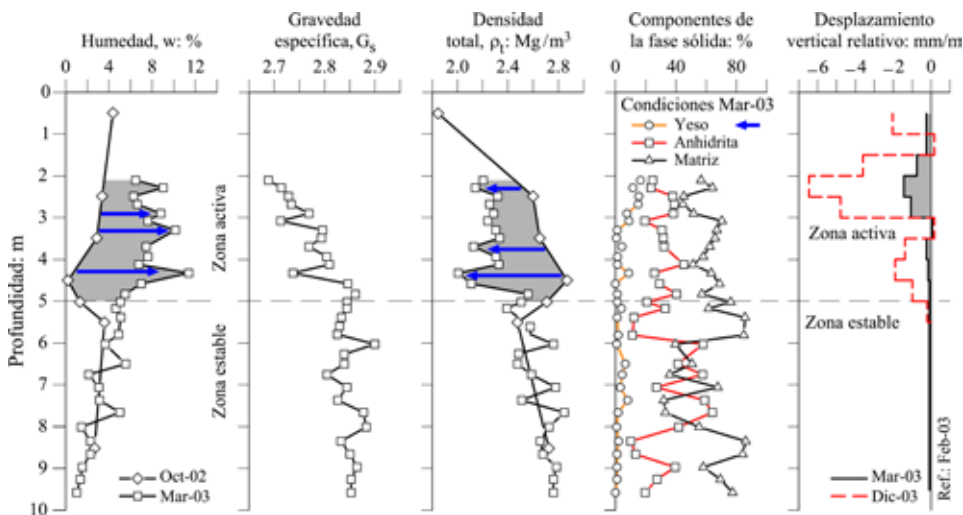


Fig. 4. Propiedades geotécnicas y mineralógicas de la roca y desplazamientos verticales medidos mediante extensómetro continuo en la sección 411+600 del túnel de Lilla (Alonso et al., 2013)

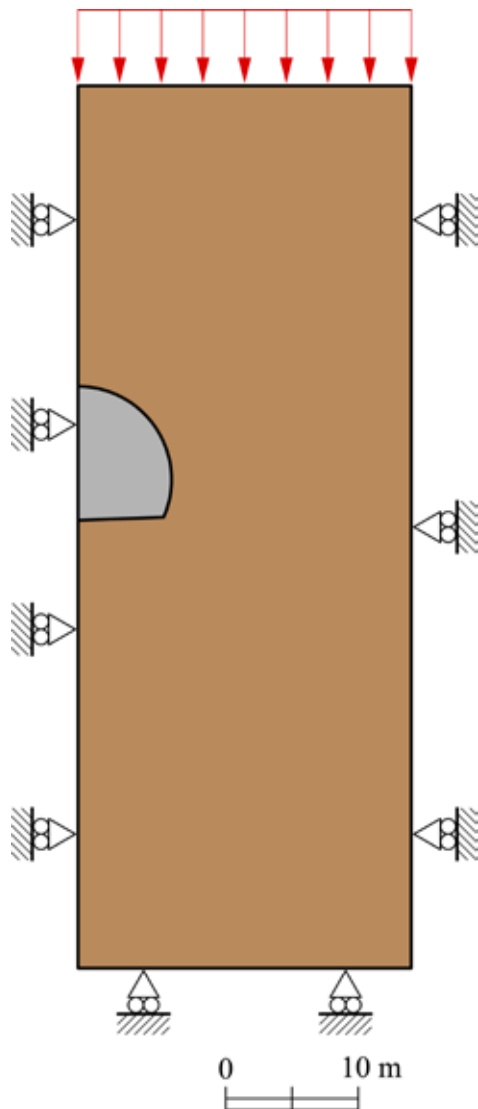


Fig. 5. Geometría y condiciones de contorno del dominio de análisis

Fig. 6. Levantamientos calculados en el centro de la solera del túnel y medidas de campo en secciones con solera plana (2002-2003)

cálculos en condiciones de deformación plana. Se adoptó un comportamiento elástico para la matriz rocosa y un valor de $K_0=2$ a la vista de la tectónica intensa en la zona.

Se estimó una permeabilidad intrínseca de $K=1 \times 10^{-14} \text{ m}^2$ para la roca. En el modelo de juntas se adoptó una apertura inicial nula, un umbral cero de la deformación de tracción y un espaciamiento entre planos de 50 mm a partir del examen visual de los testigos de roca recuperados. Se limitó la apertura máxima de fracturas a 2 mm para evitar permeabilidades altas no realistas. Un análisis de las deformaciones calculadas en el límite inferior de la zona activa proporcionó un valor umbral de apertura de fractura que permite el crecimiento de cristales de yeso de 88.5 μm .

Los valores iniciales de los contenidos de masa de yeso y anhídrita, 10 % y 40 %, se estimaron de los análisis mineralógicos de los testigos recuperados (figura 4).

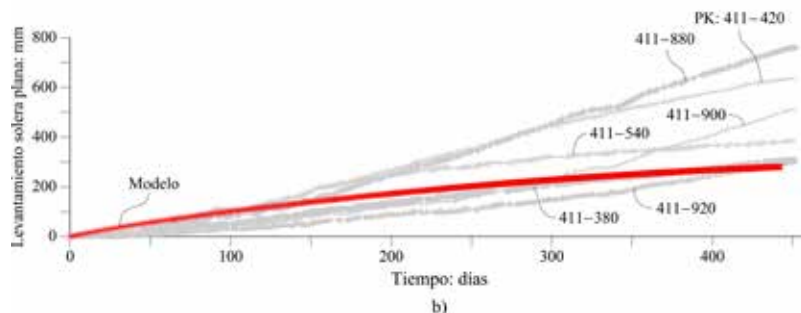
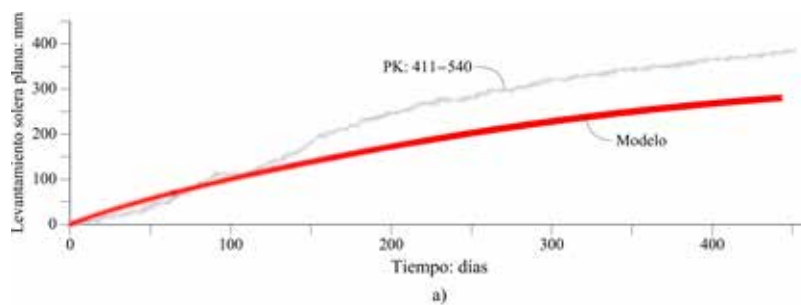
4 Predicciones del modelo

Los desplazamientos verticales medidos en el eje de la solera, en el PK 411+540, se comparan con los cálculos

en la figura 6a. El PK 411+540 es el más cercano al PK 411+600 donde se dispone de medidas de levantamiento del suelo. El acuerdo es razonablemente bueno durante los primeros cuatro meses pero el levantamiento medido acelera durante los dos meses siguientes y vuelve a velocidades más lentas a tiempos mayores. La figura 6b proporciona una imagen más completa del comportamiento de la simulación. El levantamiento calculado se compara con seis registros de levantamiento medidos en un tramo de 540 m (del PK 411+380 al PK 411+920). Las predicciones siguen aproximadamente la tendencia media durante la primera parte del tiempo de registro y subestiman las medidas de campo a tiempos mayores.

La heterogeneidad de campo explica parte de las discrepancias. La aceleración de los desplazamientos verticales en tiempos concretos sugiere que la degradación de la roca fue capaz de aumentar las reacciones cinéticas de precipitación/disolución, aumentando la superficie expuesta de anhídrita.

El efecto confinante de los hastiales explica la forma abombada del levantamiento calculado (figura 7). No está disponible ninguna nivelación de precisión a lo largo del ancho de la solera del túnel pero las formas abombadas se observaron "in situ".



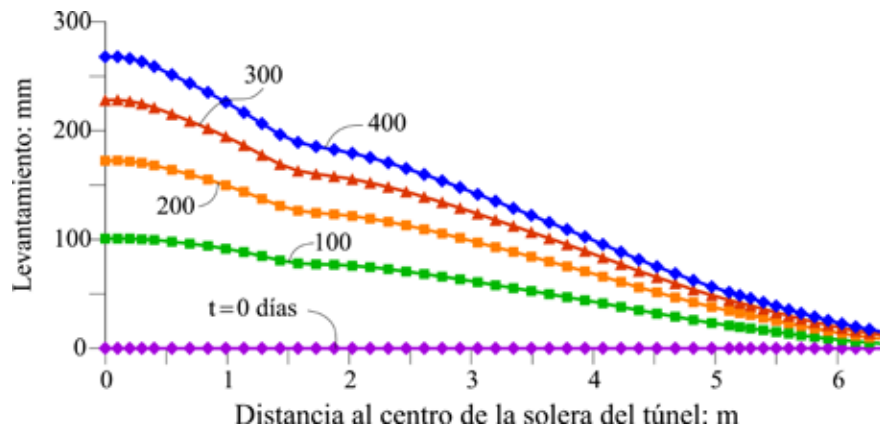


Fig. 7. Distribución de los levantamientos calculado a lo ancho de la solera del túnel debido a precipitación de yeso. t=0 días corresponde al inicio de la cristalización después de la excavación del túnel

Fig. 8. Distribución de la magnitud de las deformaciones verticales calculadas después de 365 días del inicio de la cristalización del yeso



5 Conclusiones

Las contribuciones de varios grupos de investigación durante la pasada década han permitido un mejor entendimiento de los fenómenos físicos y químicos que desencadenan la expansividad observada en túneles excavados en formaciones anhidríticas. El modelo de Elementos Finitos descrito en este artículo representa los aspectos fundamentales de los mecanismos básicos. El hinchamiento se atribuye a la precipitación de yeso a partir de soluciones sulfatadas sobresaturadas. La sobresaturación en sulfatos requiere la presencia de agua y anhídrita.

Las ecuaciones cinéticas describen las velocidades de precipitación y disolución de anhídrita. La experiencia previa en la modelación de un caso de levantamiento singular (Pont de Candi) proporcionó los parámetros cinéticos. Un aspecto clave del problema es la transformación de los cristales de yeso precipitado en deformaciones de la roca. Este aspecto requiere una atención adicional debido a su relevancia. La interpretación de ensayos publicados proporcionó información sobre el “esponjamiento” y los efectos de las tensiones en la relación entre la deformación inducida y la masa de yeso precipitada.

La excavación de túneles y el hinchamiento posterior en rocas arcillosas sulfatadas conduce a la acumulación de daño, que es atribuido en el modelo a la generación de fisuras que fracturan la roca. Este mecanismo se representa en

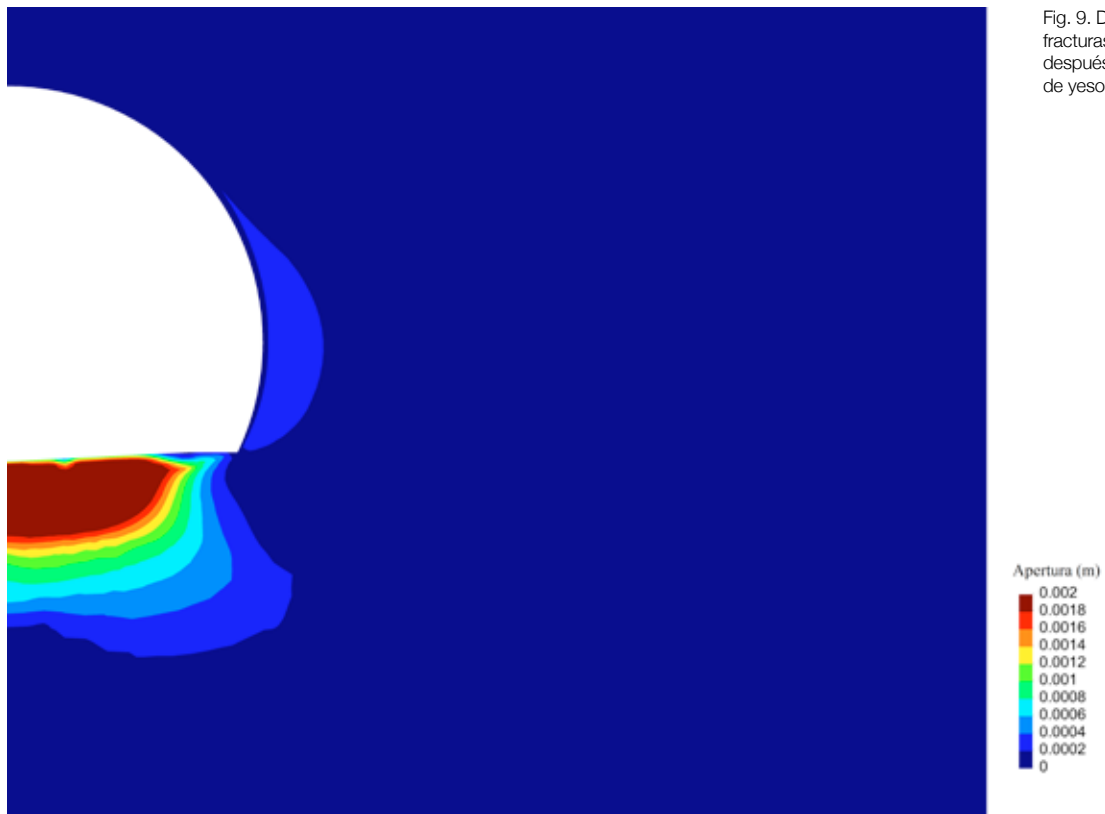
La porosidad final promedio de anhídrita en la zona activa (en la profundidad de 0.25-5m) se predice bien en los cálculos. El contenido de yeso calculado es algo mayor que las determinaciones de laboratorio.

Los mapas bi-dimensionales de algunas variables al final del periodo de 365 días proporcionan información adicional. Se calculan deformaciones verticales de 15-20 % a poca profundidad en el eje del túnel (figura 8). Las deformaciones disminuyen hacia los hastiales debido al efecto de las tensiones verticales crecientes.

La transformación de anhídrita en yeso está limitada por el umbral de apertura de fracturas impuesto para la cristalización

de yeso. La figura 9a indica las aperturas calculadas y el efecto del confinamiento bajo hastiales. La permeabilidad intrínseca calculada en la zona activa (figura 9b) varía entre 10^{-8} y 10^{-9} m². Decrece rápidamente en el contorno inferior hacia el valor escogido para la roca inalterada. La permeabilidad en la zona activa aumenta en seis órdenes de magnitud. No hay medidas disponibles en Lilla pero Butcher et al. (2011) mencionan un aumento similar en la permeabilidad alrededor de túneles excavados en rocas sulfatadas. El aumento calculado de apertura de fractura se limitó a 2 mm, un valor que se alcanza, al final de la simulación (un año), en los 2 m superiores de la zona expansiva.

Fig. 9. Distribución de la (a) apertura de fracturas (m) y (b) permeabilidad (m²) después de 365 días de cristalización de yeso



(a)



(b)

el modelo mediante una fractura virtual "embebida" en los elementos finitos que se activa a partir de las deformaciones de tracción calculadas. La apertura de grietas tiene dos efectos diferentes: aumenta rápidamente la permeabilidad de la roca alrededor del túnel y facilita la cristalización de sulfatos.

Los fenómenos y mecanismos detallados forman la base de una versión de CODE_BRIGHT capaz de modelizar la construcción de un túnel en formaciones anhidricas.

El modelo se aplicó para simular el comportamiento de un caso bien documentado: el túnel de Lilla. La información de campo, concretamente los registros de hinchamiento observados durante más de un año y la distribución en profundidad de las fracciones volumétricas de yeso y anhídrita se ha comparado con los cálculos. El análisis numérico proporcionó también información sobre la evolución de la distribución espacial de fracturas y la permeabilidad de la roca.

La variabilidad observada de las medidas de campo tanto en desplazamientos como en presiones contra el revestimiento del túnel (Alonso et al., 2013) sugiere que los mecanismos de crecimiento de cristales requieren más observaciones de campo. Detalles de la formulación descrita tales como la identificación de los parámetros cinéticos, el umbral de apertura de fracturas para permitir la precipitación de cristales, el criterio de apertura de fracturas y el papel del daño de la matriz rocosa, requiere estudios adicionales. ☎

REFERENCIAS

- Alonso, E. E. & Olivella, S. (2008). Modelling tunnel performance in expansive gypsum claystone. Proceedings of the 12th Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG), Goa, 891-910 (CD-ROM).
- Alonso, E. E. and Ramon, A. (2013). Heave of a railway bridge induced by gypsum crystal growth: field observations. *Géotechnique* 63, No. 9, 707 – 719, [http://dx.doi.org/10.1680/geot.12.P.034]
- Alonso, E. E., Berdugo I., R., Tarragó, D. & Ramon, A. (2007). Tunnelling in sulphate claystones. Invited Lecture. Proc. 14th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Madrid, 1, 103-122.
- Alonso, E.E., Berdugo, I.R. and Ramon, A. (2013). Extreme expansive phenomena in anhydritic-gypsiferous claystone: the case of Lilla tunnel. *Géotechnique* 63 No. 7, 584 – 612, [http://dx.doi.org/10.1680/geot.12.P.143]
- Amstad, C. & Kovári, K. (2001). Untertagbau in quellfähigem fels. Zürich, Switzerland: Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK) and Bundesamt für Strassen (ASTRA).
- Anagnostou G (1995) Seepage flow around tunnels in swelling rock. *Int J Numer Anal Meth Geomech* 19(10):705-724.
- Anagnostou, G. (1993). A model for swelling rock in tunnelling. *Rock Mech. Rock Engng* 26, No. 4, 307-331.
- Barla, M. (2008). Numerical simulation of the swelling behaviour around tunnels based on special triaxial tests. *Tunnelling and Underground Space Technology* 23 (2008) 508-521.
- Butscher, C., P. Huggenberger, E. Zechner, and H. H. Einstein (2011), Relation between hydrogeological setting and swelling potential of claysulfate rocks in tunneling, *Eng. Geol.*, 122(3-4), 204-214.
- Charola, A. E., Pühringer, J. and Steiger, M. (2007). Gypsum: a review of its role in the deterioration of building materials. *Environ. Geol.* 52: 339-352.
- CODE_BRIGHT (2017). CODE_BRIGHT User's guide, Dept. of Geotechnical Engineering and Geosciences, UPC, Barcelona. edu/recerca/webg/code_bright
- Einstein, H. H. (1979). Tunneling in swelling rock. *Underground Space* 4, No.1: 51-61.
- Einstein, H. H. (1996). Tunneling in difficult ground: swelling behaviour and identification of swelling rocks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 29, No. 3, 113-124.
- Grob, H. (1976). Swelling and heave in swiss tunnels. *Bulletin - Association of Engineering Geologists* 13: 55-60.
- Gysel, M. (1987). Design methods for structures in swelling rocks, Proc. 6th Int. Congress of ISRM, Montreal, Canada.
- Heidkamp H, Katz C (2004) The swelling phenomenon of soils: Proposal of an efficient continuum modelling approach. In: Schubert W (ed) EUROCK 2004 & 53rd Geomechanics Colloquium, Salzburg, Austria, October 6th-8th 2004, VGE
- Henke, K.F. (1976). Magnitude and rate of heave in tunnels in calcium sulphate bearing rocks. *Bulletin International Association of Engineering Geologists* 13, 61-64.
- Huder, J. & Amberg, G. (1970). Quellung in Mergel, Opalinuston und Anhydrit. *Schweizerische Bauzeitung*, Jhrg. 88, 43.
- Kovári, K. & Descoedres, F. (2001). Tunnelling Switzerland. Swiss Tunnelling Society, Swiss. ISBN 3-9803390-6-8.
- Kovári, K., Amstad, C. & Anagnostou, G. (1988). Design/construction methods: tunnelling in swelling rocks. In Key questions in rock mechanics (Proc. of the 29th U.S. Symp. Rock Mech. Minnesota) (eds. P. A. Cundall, R. L. Sterling and A. M. Starfield), pp. 17-32. Rotterdam, the Netherlands: Balkema.
- Kramer, G. J. E., & Moore, I. D. (2005). Finite element modelling of tunnels in swelling rock. In Proceedings of the K.Y. Lo Symposium, London, Ontario, Jul 7-8 (pp. 1-37). Retrieved from <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.543.4557>
- Oldecop, L. & Alonso, E. E. (2012). Modelling the degradation and swelling of clayey rocks bearing calcium-sulphate. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 54, 90-102.
- Parkhurst, D. L. & Appelo, C. A. J. (1999). User's guide to PHREEQC (version 2): A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations, Water-Resources Investigations Report 99-4259. Denver, CO, USA: Earth Science Information Center, US Geological Survey.
- Ramon, A and Alonso, E. E. (2013). Heave of a railway bridge: modelling gypsum crystal growth. *Géotechnique* 63, No. 9, 720 – 732, [http://dx.doi.org/10.1680/geot.12.P.035].
- Ramon, A, Olivella, S and Alonso, E.E. (2009). Swelling of a gypsiferous claystone and its modelling, In: Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Alexandria, 1, 730-733.
- Schädlich B, Marcher T, Schweiger HF (2013) Application of a constitutive model for swelling rock to tunnelling. *Geotech Eng* 44:47-54.
- Scherer, G.W. (1999). Crystallization in pores. *Cement and Concrete Research* 29: 1347-1358.
- Steiner, W. (1993). Swelling rock in tunnels: rock characterization, effect of horizontal stresses and construction procedures. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstrs*, 30, No. 4, 361-380.
- Wahlen R, Wittke W (2009) Kalibrierung der felsmechanischen Kennwerte für Tunnelbauten in quellfähigem Gebirge (Calibration of the rock mechanical parameters for tunnels in swelling rock). *Geotechnik* 32:226-233
- Wittke, W. & Reißler, P. (1976). Bemessung der Auskleidung von Hohlräumen in quellendem Gebirge nach der Finite Element Methode. Veröffentlichung des Inst. für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Verkehrswasserbau der RWTH Aachen 2.
- Wittke-Gattermann, P. & Wittke, M. (2004). Computation of strains and pressures for tunnels in swelling rocks. *Tunnelling and Underground Space Technology* 19: 422-423.