

Filtración hacia túneles en medios fracturados: Simulación dinámica del avance de la excavación

Jorge Molinero Huguet

Lic. en Ciencias Geológicas. Postgrado en Hidrología Subterránea. Becario de Investigación.

E.T.S. Ing. Caminos, Canales y Puertos. Universidad de A Coruña.

Francisco Javier Samper Calvete

Dr. Ingeniero de Caminos. Catedrático de Universidad.

E.T.S. Ing. Caminos, Canales y Puertos. Universidad de A Coruña.

Rubén Juanes Silva

Ing. de Caminos, Canales y Puertos. M.Sc. Becario de Investigación.

Universidad de California en Berkeley.

RESUMEN

La descarga de aguas subterráneas hacia túneles en rocas fracturadas constituye un factor importante tanto para la velocidad de avance como para la seguridad de la perforación. El descenso de los niveles freáticos producidos por este tipo de obras subterráneas puede ocasionar además problemas geotécnicos y medioambientales. En el presente trabajo se presenta el modelo numérico realizado para simular el impacto de la construcción de un túnel sobre el sistema hidrogeológico de la isla de Åspö (Suecia). Dicho túnel fue construido como parte de un laboratorio subterráneo en el marco de proyectos de investigación relacionados con el almacenamiento geológico profundo de residuos radiactivos. La extensa base de datos disponible en este ejemplo brinda una excelente oportunidad para la validación de modelos numéricos de flujo de agua subterránea en medios fracturados. El modelo numérico se ha resuelto con el código TRANMEF-3D, desarrollado en la Universidad de A Coruña. Este código permite considerar condiciones de contorno internas variables en el tiempo para simular de forma dinámica el proceso de construcción de un túnel. Para visualizar el efecto dinámico del avance del túnel se ha generado una animación a la que el lector interesado puede acceder por internet.

ABSTRACT

Groundwater inflows in tunnels constructed in fractured rock may constitute a potential safety hazard and control the rate of advance of tunnel driving. Drawdowns produced by tunnel construction may also have geotechnical and environmental impact. In this article we present a numerical model carried out to simulate the impact of tunnel construction on the groundwater system of Åspö Island (Sweden). This tunnel was constructed as part of an underground laboratory within the framework of research programs on radioactive waste disposal. The large amount of data available for this example provides an excellent opportunity to validate current numerical models of groundwater flow through fractured media. The numerical model has been solved by using TRANMEF-3D, a computer code developed at the University of A Coruña, which is able to incorporate inner time-varying boundary conditions. By using this option it is possible to simulate the tunnel construction dynamics. An Internet available animation has been generated in order to visualize the dynamic effect of the tunnel advance.

FILTRACIÓN HACIA TÚNELES: ANTECEDENTES

La descarga de agua subterránea afecta a la velocidad de avance de la construcción de un túnel y supone un riesgo potencial de dicho tipo de obra. La experiencia indica que una gran parte de las dificultades importantes que surgen en la construcción de túneles está directa o indirectamente relacionada con el agua (E. Alonso, Curso de Túneles de la E.T.S.I. de Caminos de Barcelona, notas de clase). Jansson (1979) muestra el importante incremento del coste de excavación asignable a la presencia de agua en macizos fracturados. Desde un punto de vista cuantitativo, al proyectar una obra de tunelación se plantean las siguientes cuestiones relativas a la hidrogeología de la formación atravesada por el túnel:

- ▼ 1) La magnitud del máximo caudal que fluirá a través de las paredes y la cara del túnel.
- ▼ 2) El periodo de tiempo en el que se mantendrá ese máximo caudal.
- ▼ 3) La variación del caudal a lo largo del tiempo
- ▼ 4) El tiempo a partir del cual se alcanza un estado con una descarga subterránea estabilizada.

Por otra parte, el drenaje natural que se produce a favor de las obras subterráneas provoca descensos en el nivel freático del entorno de dichas obras. El conocimiento de la evolución de los niveles es importante para evaluar el impacto geotécnico (descensos importantes pueden provocar problemas de subsidencia en el terreno) y medioambiental (posibles afecciones a cursos fluviales, explotaciones de aguas subterráneas, humedales, etc.).

Por analogía con la hidráulica de captaciones, el drenaje estacionario por unidad de longitud de túnel (q) en un macizo rocoso homogéneo e infinito puede calcularse mediante la solución analítica propuesta por Goodman et al. (1965):

$$q = \frac{2\pi K H_0}{2.3 \log(2H_0/r)} \quad (\text{Ecuación 1})$$

donde K es la conductividad hidráulica, r es el radio del túnel y H_0 es la profundidad desde el nivel freático hasta el centro del túnel. Esta ecuación se conoce la literatura científico-técnica de túneles como "la fórmula del pozo grande" (Galperin et al., 1993).

Partiendo de la Ecuación 1, Galperin et al. (1993) proponen una serie de fórmulas para calcular el caudal drenado por un túnel en problemas con límites conocidos (tanto de nivel constante como impermeables).

El descenso de nivel piezométrico (s) causado por un dren de radio (r_d) mucho menor que su longitud a una distancia L , se puede calcular mediante la siguiente fórmula (Custodio, 1983a):

$$s = \frac{q}{2\pi K} \left[\frac{\pi L}{b} - \ln \left(\frac{2\pi r_d}{b} \sin \frac{\pi a_1}{b} \right) \right] \quad (\text{Ecuación 2})$$

donde q es el caudal total (procedente de ambos lados del dren), b es el espesor del acuífero y a_1 es la distancia desde el centro del dren hasta la base impermeable (límite inferior) del acuífero.

Goodman et al. (1965) proponen un método gráfico para el cálculo transitorio de la evolución temporal de la descarga de agua subterránea a través de las paredes de un túnel. Estos autores resolvieron el problema numéricamente y generalizaron la solución por medio de una familia de curvas adimensionales que relacionan los niveles frente a la distancia respecto al frente del túnel, para una serie de valores del producto de la conductividad hidráulica por el tiempo (Kt).

La evolución transitoria del caudal drenado por un túnel en un acuífero recargado por agua de lluvia se puede calcular analíticamente con la solución presentada en Custodio (1983a), que se obtiene al aplicar un método de cambios sucesivos en el estado estacionario que permite aproximar el régimen transitorio en acuíferos libres (Lembke, 1886):

$$q(t) = H_0 \sqrt{\frac{0,5KW}{1 - \exp\left(-\frac{6W}{H_0}t\right)}} \quad (\text{Ecuación 3})$$

donde t representa el tiempo y W es el posible aporte de agua de lluvia (LT^{-1}). Esta ecuación es válida para un túnel situado sobre el límite inferior (impermeable) del acuífero. Esta ecuación se puede generalizar al caso en el que el túnel se encuentre a una cierta altura sobre la base impermeable (H_{0d}), o bien que H_{0d} y H_0 sean variables (Bear et al., 1968; Custodio, 1983a).

En macizos cristalinos fracturados el cálculo de los caudales drenados por un túnel es más complejo, fundamentalmente por el hecho de que en ese tipo de medios el flujo suele concentrarse a través de vías preferentes (zonas de fractura), algunas de las cuales pueden pasar desapercibidas en los estudios previos a la ejecución de la obra. Excluyendo estas vías preferentes de flujo (fallas y accidentes tectónicos de escala cartográfica), Hurr y Richards (1966) encuentran que para terrenos ígneos y metamórficos, los caudales drenados dependen del grado de fracturación del macizo, de la interconexión entre las redes de fracturas así como de su continuidad espacial.

Siguiendo la clasificación propuesta por Berkowitz et al. (1994), el estudio del flujo subterráneo a través de medios fracturados se puede abordar mediante tres posibles enfoques:

▼ 1) Modelos continuos que consideran la totalidad del medio fracturado como un medio poroso equivalente. Esta aproximación es válida siempre y cuando sea posible definir un volumen elemental representativo (VER) para el problema de interés. Por lo tanto, estos modelos son aplicables dependiendo de la escala del problema y del grado de interacción existente entre las fracturas y los bloques rocosos.

▼ 2) Modelos de redes de fracturas discretas que consideran los procesos de flujo y transporte en fracturas aisladas, despreciando la contribución de los bloques rocosos (matriz). Este enfoque ha proporcionado avances muy importantes en el conocimiento de los fenómenos de flujo y transporte en medios fracturados (Berkowitz, 1994). Su principal limitación radica en la definición geométrica de las redes de fracturas. Para solucionar este problema geométrico se suele recurrir a simulaciones estocásticas (habitualmente condicionadas a datos de campo) o bien a la combinación de sistemas determinísticos con sistemas estocásticos. Un caso particular de este tipo de enfoque es el conocido como modelo de redes de canales (Moreno, 1998).

▼ 3) Modelos híbridos que consisten en una conceptualización intermedia entre los dos enfoques anteriores. Este enfoque incorpora el tratamiento discreto de las fracturas más importantes junto con el tratamiento continuo (como medio poroso equivalente) del resto del dominio.

INTRODUCCIÓN AL LABORATORIO SUBTERRÁNEO DE ÄSPÖ

El Laboratorio Subterráneo de la isla de Äspö (Äspö HRL) constituye una parte fundamental del trabajo que se está realizando en Suecia para la futura construcción de un almacenamiento geológico profundo de residuos radiactivos de alta actividad. En otoño de 1986, SKB (la empresa sueca encargada de la gestión de los residuos radiactivos) inició los trabajos de campo para la ubicación de un laboratorio subterráneo en la comarca de Simpevarp dentro del término municipal de Oskarshamn situado en el S.E. de Suecia y, tras las etapas de revisión y aprobación, los trabajos de construcción de las instalaciones comenzaron en otoño de 1990.

El principal objetivo del laboratorio es llevar a cabo los trabajos de investigación, desarrollo y demostración que permitan concluir la idoneidad y viabilidad de la construcción de un almacenamiento profundo de residuos radiactivos en un medio granítico fracturado. Para alcanzar dicho objetivo, se están realizando tareas de investigación en geotecnia, hidrogeología e hidroquímica.

Los trabajos del laboratorio subterráneo se dividieron en tres fases principales:

▼ 1) La fase de preinvestigación (1986-1990), en la que se situó la localización del laboratorio, se describieron las

condiciones naturales y se realizaron predicciones de la geología, hidrogeología y geoquímica respecto a lo que se debería observar durante la fase de construcción.

▼ 2) La fase de construcción (1990-1995), en la que se realizaron ensayos y experimentos en paralelo a las actividades propias de la obra de ingeniería. Durante esta fase se excavó el túnel hasta una profundidad de 450 m y se construyeron las instalaciones superficiales y los edificios de investigación (Äspö Research Village).

▼ 3) La fase de operación, que comenzó en 1995 y continúa en la actualidad. En esta fase se están realizando un gran número de experimentos in situ con los que se pretende mejorar el conocimiento actual sobre los procesos que, a priori, se entiende que serán más relevantes para el diseño y evaluación de la seguridad de una instalación subterránea de estas características.

En paralelo a las actividades descritas anteriormente, en el año 1992 se constituyó la denominada "Task Force on Modeling of Groundwater flow and Transport of Solutes" con la finalidad de fomentar la interacción entre las diferentes organizaciones internacionales participantes en el Laboratorio Subterráneo, en las áreas de modelización conceptual, matemática y numérica del flujo subterráneo y el transporte de solutos en medios fracturados. España participa en dicho foro a través de la Empresa Nacional de Residuos Radiactivos, S.A. (ENRESA), cuya representación fue otorgada al Grupo de Hidrología Subterránea de la Escuela de Caminos de la Universidad de La Coruña.

Las actividades científicas relacionadas con el Laboratorio Subterráneo de Äspö han permitido la obtención de una extensa base de datos, quizá sin precedentes en el mundo, que permiten el estudio en detalle del impacto producido por la ejecución del túnel sobre el sistema hidrogeológico circundante.

En este artículo se resume la metodología y los principales resultados obtenidos en la modelización numérica del comportamiento hidrogeológico del medio subterráneo durante y después de la construcción del túnel de acceso al Laboratorio Subterráneo de Äspö.

SITUACIÓN GEOGRÁFICA Y GEOLÓGICA

La isla de Äspö se encuentra situada en la parte sur oriental de Suecia a unos 400 km al sur de Estocolmo (Figura 1). El laboratorio se localiza en la comarca de Simpevarp en las proximidades de la central nuclear sita en el municipio de Oskarshamn. Geográficamente, la isla de Äspö forma parte de un archipiélago costero granítico en el Mar Báltico, cuyas islas están separadas de la Península Báltica por brazos marinos muy someros (estuarios).

Las instalaciones del laboratorio subterráneo constan de un túnel de 3600 m de longitud que va desde la superficie hasta los 450 m de profundidad, con un primer tramo recto y un

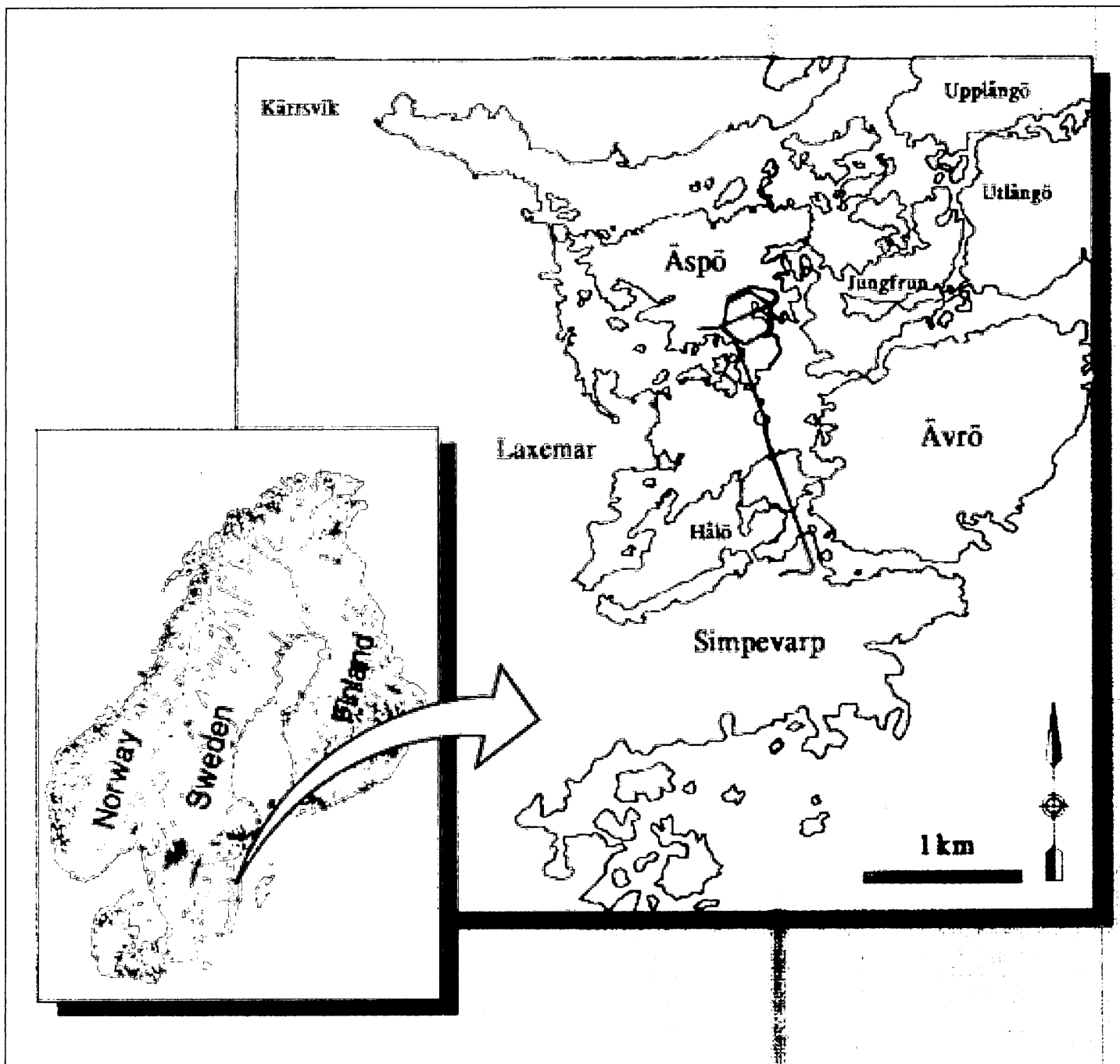


Figura 1. Situación geográfica de la isla de Äspö. Proyección superficial de la traza de túnel. El túnel comienza en Simpevarp, continúa en profundidad por debajo del Mar Báltico (tramo recto) y finaliza con el tramo espiral debajo de la isla de Äspö. (Rhén et al. 1997 a).

segundo tramo de geometría espiral (Figura 2). Encima de este segundo tramo espiral, sobre la superficie de la isla de Äspö, se encuentran los edificios e instalaciones de investigación que están conectados con el túnel por medio de un ascensor (Figura 2).

Geológicamente, el laboratorio se encuentra enmarcado en la amplia región del Cinturón Porfírico-granítico Transescandinavo. Esta zona se caracteriza por un amplio número de maci-

zos básicos alineados en la dirección E-W, dentro de los cuales existen cuerpos irregulares de vulcanitas, xenolitos y diapiros graníticos semicirculares. La isla de Äspö constituye el afloramiento de uno de estos diapiros graníticos que está formado mayoritariamente por lo que se conoce en sentido amplio como Granitos de Smålan. Estos granitos estrictamente forman un complejo de diversas litologías de unos 1700-1800 millones de años de antigüedad.

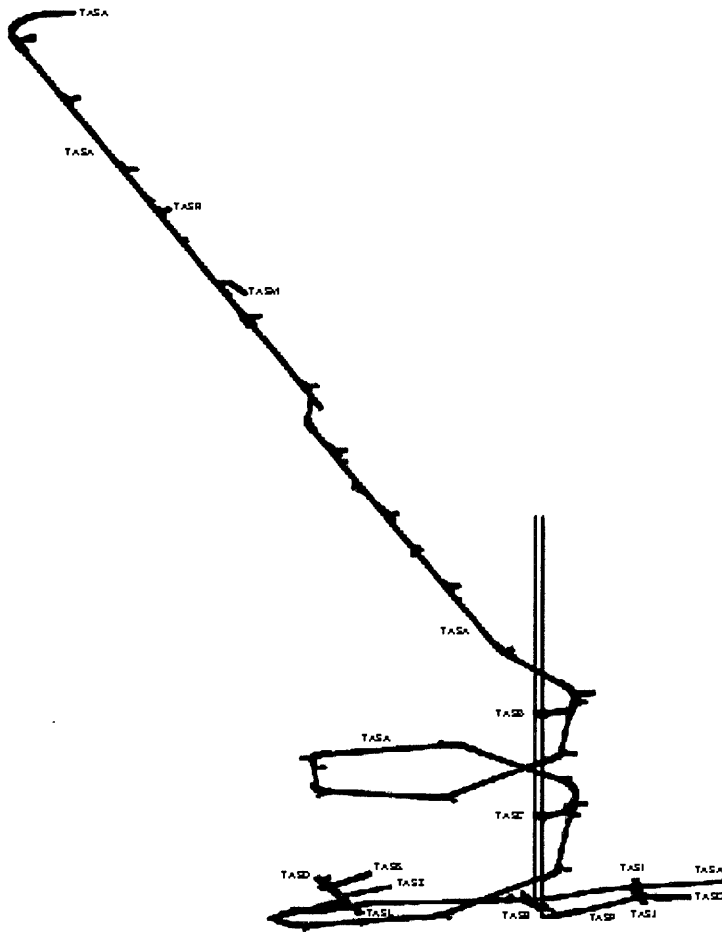


Figura 2. Esquema tridimensional del túnel del laboratorio subterráneo de Äspö. La parte espiral del túnel se encuentra justo debajo de la isla de Äspö y está conectada con las instalaciones superficiales por medio de un ascensor.

Los estudios geológico-estructurales de la zona de Äspö muestran la existencia de más de 20 grandes zonas de fractura que presentan un amplio rango de orientaciones. La mayoría de ellas son zonas de deformación semidúctil precámbrica reactivadas en etapas tectónicas posteriores, en las cuales se produjo la deformación frágil (Rhén et al. 1997 b).

HIDROGEOLOGÍA

La superficie topográfica de la isla de Äspö es suave y ondulada, con una altura máxima de 14 m sobre el nivel del mar. No existen arroyos perennes en la isla y el agua de lluvia es drenada rápidamente al mar por escorrentía superficial o bien subsuperficialmente a través de los sedimentos y turberas (Rhén et al. 1997 b). La precipitación media anual es del orden de 675 mm de los cuales el 18% cae en forma de nieve. La evapotranspiración potencial es de 616 mm año⁻¹ y la real de 490 mm año⁻¹ (Rhén et al. 1997 b). No existen datos de esco-

rentía superficial en la isla de Äspö, pero en la zona cercana de Simpevarp se estima que el valor medio anual es de 150-200 mm, lo cual deja un escaso margen para el valor de la recarga al acuífero.

En la zona del entorno del laboratorio subterráneo de Äspö las principales zonas de fractura son las que controlan la recarga, la descarga y el flujo subterráneo (Smellie y Laaksoharju, 1992).

El nivel freático en condiciones naturales oscila entre 0 y 4 m sobre el nivel del mar reproduciendo de forma suavizada la topografía. La construcción del túnel provocó un descenso importante de los niveles del agua subterránea, con máximos de hasta 100 m. Los niveles piezométricos han permanecido aproximadamente estables desde la conclusión del túnel en febrero de 1995 (Rhén et al. 1997 b).

El modelo conceptual hidrogeológico a escala local propuesto por Rhén et al. (1997 b) se construye utilizando dos conceptos geométrico-hidrogeológicos fundamentales que se ilustran en la Figura 3:

▼ 1) **Dominios hidráulicos conductores.** Son grandes planos con propiedades hidráulicas diferentes a las de las rocas que los rodean. Generalmente coinciden con las principales zonas de fractura definidas por el modelo geológico-estructural, aunque en algunos casos se identificaron a partir de evidencias estrictamente hidrogeológicas (ensayos hidráulicos de interferencia y ensayos de trazadores).

▼ 2) **Dominios hidráulicos rocosos.** Son grandes volúmenes con propiedades hidráulicas diferentes a los dominios que los rodean. Estos dominios fueron definidos a partir de criterios geológico-litológicos y evidencias hidrogeológicas (interpretación de ensayos hidráulicos).

Los trabajos de caracterización hidrogeológica de la zona proporcionaron un extensa base de datos hidrogeológicos. La transmisividad media de los dominios hidráulicos conductores es del orden de $10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ con un valor máximo de $3 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. El valor medio de la conductividad hidráulica de los dominios hidráulicos rocosos es de $3 \times 10^{-10} \text{ ms}^{-1}$. Teniendo en cuenta que el espesor de los dominios hidráulicos conductores varía entre 10 y 50 m, se puede concluir que las zonas de fractura son entre 3 y 4 órdenes de magnitud más permeables que el resto del macizo granítico.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El exhaustivo trabajo de caracterización hidrogeológica llevado a cabo en la isla de Äspö permitió elaborar un robusto y detallado modelo geológico-geométrico, en el que se ubica la localización precisa de una serie de zonas de fractura que concentran la mayor parte del flujo subterráneo (Rhén et al., 1997

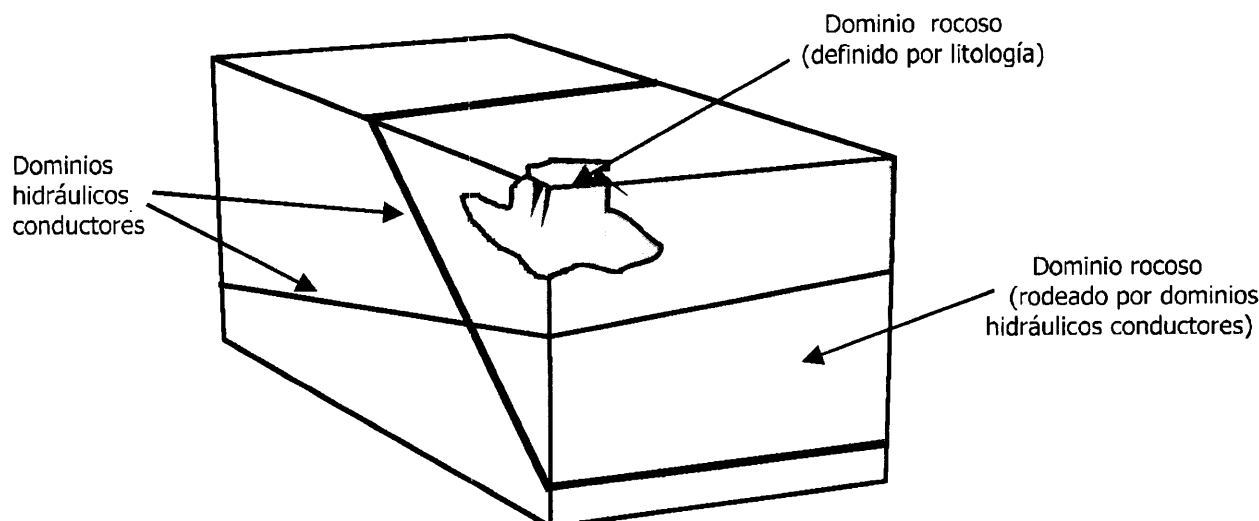


Figura 3. Descripción esquemática de los dos conceptos geométrico-hidrológicos fundamentales en los que se basa el modelo hidrogeológico de la isla de Åspö: dominios hidráulicos conductores y dominios hidráulicos rocosos.

b). El modelo numérico de flujo que se presenta a continuación se basa en el modelo conceptual de fracturas discretas. El modelo consta de 20 dominios hidráulicos conductores bidimensionales dentro de un dominio tridimensional de 2 x 2 km en planta y 1 km de profundidad (Figura 4). Sólo 11 de las fracturas intersectan el túnel, aunque existen 29 intersecciones túnel-fractura puesto que el tramo espiral del túnel intersecta algunos planos de fractura varias veces a diferentes profundidades.

Es bien conocido que en zonas costeras y en condiciones naturales las variaciones de la densidad del agua afectan de manera importante al flujo de agua (Custodio, 1983b). Sin embargo, en el entorno del túnel de Åspö los gradientes hidráulicos son tan fuertes que parecen irrelevantes los efectos producidos por las variaciones de densidad. Hautojärvi et al. (1994) modelizaron la influencia de la construcción del túnel en el sistema hidrogeológico de una fractura intersectada por el túnel a 70 m de profundidad y concluyeron que una vez alterado el sistema de flujo por el efecto del túnel, los efectos de las variaciones de la densidad del agua (debidos a los cambios de salinidad) en las presiones intersticiales son inapreciables. Por ello, en nuestro modelo numérico se ignoraron las variaciones espaciales de la densidad y se trabajó con niveles piezométricos sin corrección por salinidad.

La ecuación general del flujo subterráneo de agua se obtiene a partir de la Ley de Darcy y de la ecuación de la conservación de la masa (Custodio, 1983c; Samper, 1994):

$$\nabla \cdot (K \nabla h) + w = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (\text{Ecuación 4})$$

siendo $\nabla \cdot ()$ el operador divergencia, ∇ el operador gradiente, K el tensor de conductividad hidráulica, h el nivel piezométrico, w el término fuente/sumidero, S_s el coeficiente de almacena-

miento específico y t el tiempo. Esta ecuación se resuelve con sus correspondientes condiciones en los límites o contornos (Γ) del dominio de flujo que pueden ser de los siguientes tipos (Juanes y Samper, 2000 a):

▼ 1. Dirichlet o nivel impuesto:

$$h(x, y, z, t)|_{\Gamma} = H \quad (\text{Ecuación 5})$$

▼ 2. Neumann o caudal impuesto:

$$K \nabla h \cdot n|_{\Gamma} = Q \quad (\text{Ecuación 6})$$

▼ 3. Cauchy o mixta:

$$K \nabla h \cdot n|_{\Gamma} = \alpha(H - h) + Q \quad (\text{Ecuación 7})$$

siendo H y Q el nivel piezométrico y el caudal impuesto, α el coeficiente de goteo y n el vector unitario perpendicular al contorno y dirigido hacia fuera del dominio.

Cabe destacar que los dos primeros tipos de condiciones de contorno son casos particulares de la condición de tipo mixto, ya que:

- Cuando $\alpha \rightarrow \infty$: $h = H$ y,
- Cuando $\alpha \rightarrow 0$: $(K \nabla h) \cdot n = Q$

La deducción completa de las ecuaciones de flujo de agua en acuíferos y su solución numérica ha sido ampliamente descrita en la literatura científica. Se remite al lector interesado a los trabajos de Custodio (1983c) y Samper (1994).

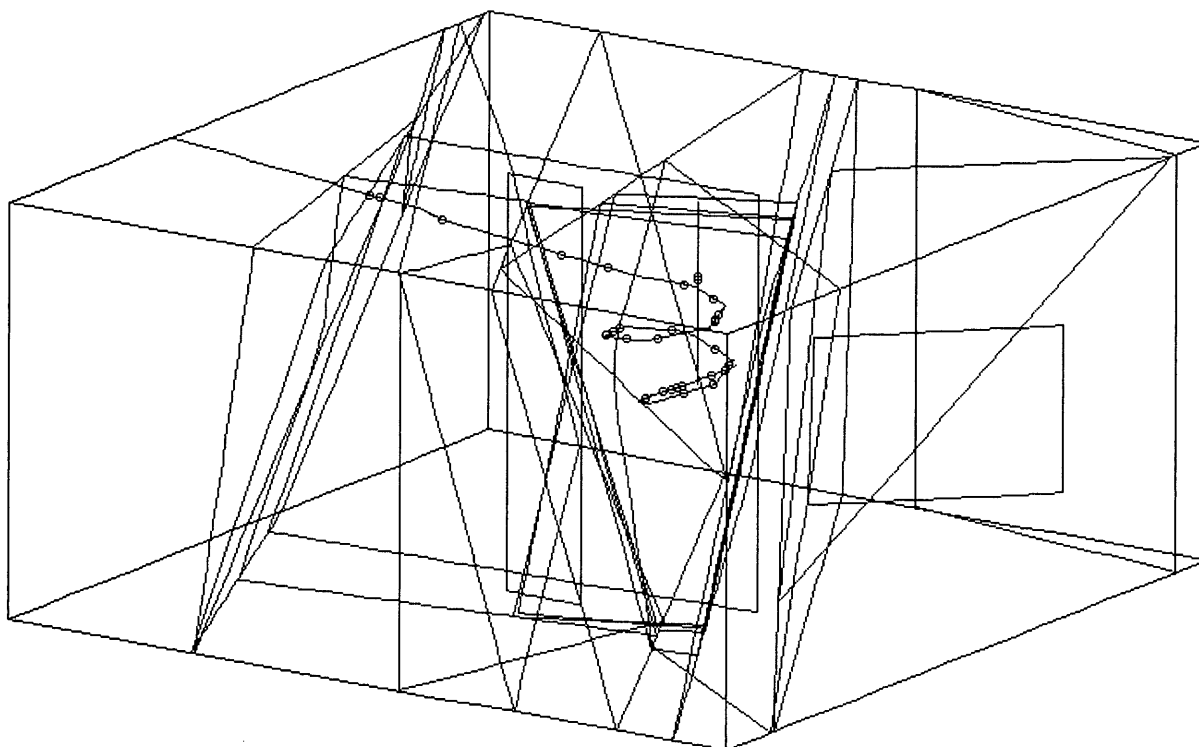


Figura 4. Geometría del problema. En la figura se representan los 20 dominios hidráulicos conductores considerados en el modelo, el túnel, la excavación para el ascensor, así como las intersecciones entre el túnel y los dominios hidráulicos conductores (puntos).



MODELO NUMÉRICO

Herramienta numérica

Para resolver las ecuaciones numéricas del modelo se utilizó el código TRANMEF-3D (Juanes, 1997), desarrollado enteramente por el Grupo de Hidrología Subterránea de la Universidad de A Coruña. El código resuelve problemas de flujo subterráneo de agua, transporte de solutos débilmente reactivos y transporte de calor en medios fracturados, usando el Método de Elementos Finitos para la discretización espacial y de Diferencias Finitas para la discretización temporal. El programa permite utilizar simultáneamente elementos con diferente forma y dimensión, lo cual permite tratar de manera eficiente planos de fracturas y sus intersecciones dentro de dominios tridimensionales (Juanes y Samper, 2000a y b). El código ha sido ampliamente verificado. Su excelente eficiencia numérica ha sido puesta de manifiesto por Juanes y Samper (2000 b).

Discretización espacial

Para la discretización espacial del problema se generó una malla de elementos finitos en los dominios hidráulicos con-

ductores, las intersecciones entre dominios y los límites externos del bloque tridimensional. También se discretizó el túnel y la perforación realizada para la ubicación del ascensor. La malla de elementos finitos resultante contiene 12.847 nudos y 14.273 elementos, la mayoría de ellos bidimensionales (cuadrangulares y triangulares) para las zonas de fractura. El resto son elementos unidimensionales para las intersecciones, el túnel y el ascensor. La Figura 5 muestra la discretización espacial de los dominios hidráulicos conductores. Las discretizaciones espaciales de las intersecciones entre dominios hidráulicos conductores, del túnel y del ascensor se muestran en la Figura 6.

Discretización temporal

El modelo realizado cubre un periodo 2013 días, comprendido entre el 27 de junio de 1991 y el 1 de enero de 1997. Se utilizaron intervalos temporales de 1 día excepto para los periodos en los que el túnel intersectó los dominios hidráulicos conductores, en los que se redujeron hasta un valor de 0.1 días.

Condiciones iniciales y de contorno

Como condiciones iniciales del modelo se supuso una condición hidrostática. Para facilitar el preproceso del modelo, la

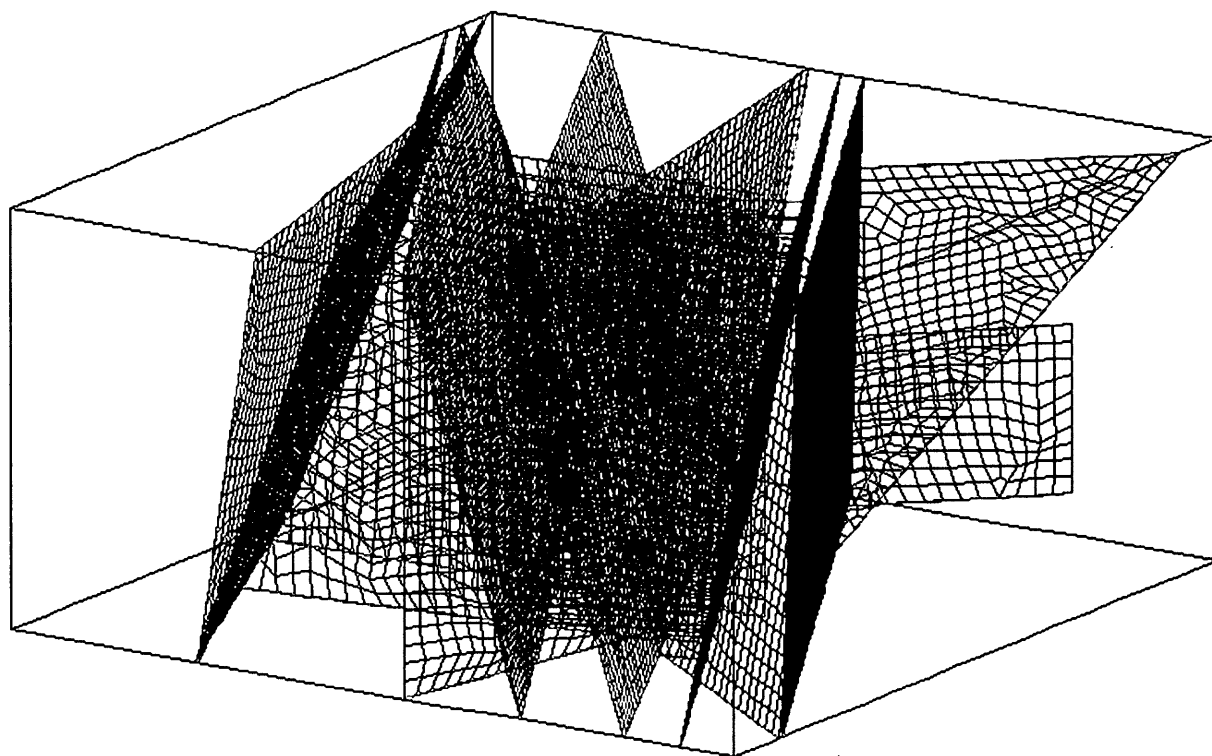
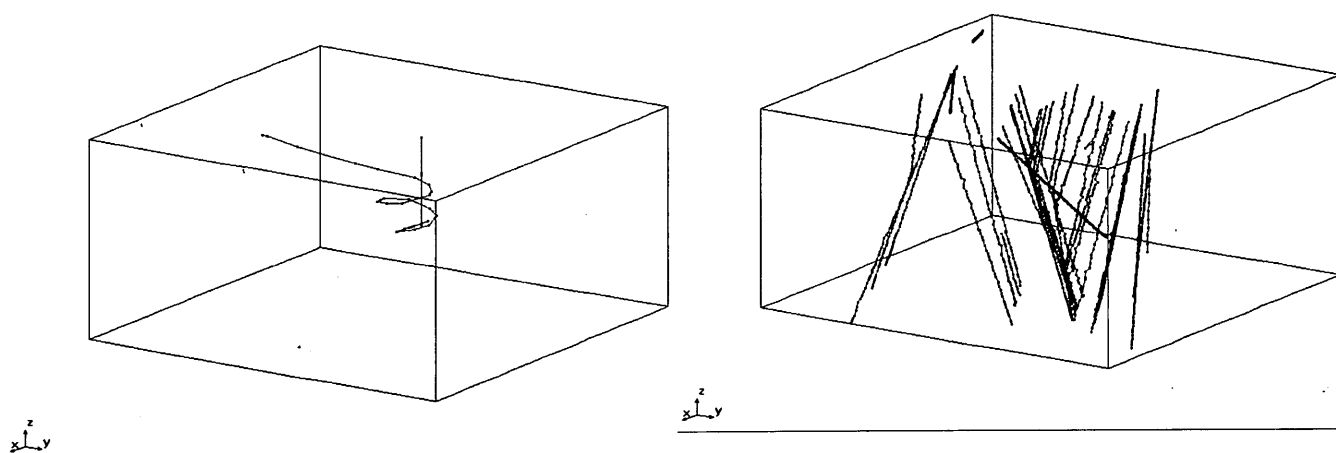


Figura 5. Malla de elementos finitos bidimensionales para los dominios hidráulicos conductores.

Figura 6. Elementos finitos unidimensionales del túnel, el ascensor y las intersecciones entre los dominios hidráulicos conductores.



cota de referencia para el cálculo de niveles piezométricos se colocó a 1000 m por debajo del nivel del mar (en la base del dominio modelizado). Por lo tanto, el campo de niveles piezométricos iniciales adopta un valor homogéneo en todo el dominio igual a 1000 m.

Para resolver el modelo numérico se utilizaron las siguientes condiciones de contorno:

▼ 1) Contornos laterales: condición Dirichlet con un nivel piezométrico impuesto de 1000 m.

▼ 2) Contorno inferior: condición Neumann con caudal nulo (contorno impermeable).

▼ 3) Contorno superior ocupado por el Mar Báltico: condición Dirichlet con un nivel piezométrico de 1000 m.

▼ 4) Contorno superior ocupado por tierras emergidas: recarga areal impuesta igual a 5 mm año⁻¹

▼ 5) Contornos internos (túnel y ascensor): Condición mixta con coeficientes de goteo variables en el tiempo de acuerdo con funciones preestablecidas, que se explican con detalle a continuación.

La elección de las condiciones de contorno internas para los elementos de la malla que representan el túnel es un paso crucial en el proceso de modelización. Supongamos un punto p dentro del espacio tridimensional considerado en el modelo. En el caso de que el punto p coincida con la trayectoria de la construcción del túnel tendremos que:

▼ a) Antes de ser intersectado por el túnel el nivel piezométrico del punto p tendrá un valor que dependerá de la evolución hidrogeológica del sistema, es decir, el punto p no constituirá un contorno interno del modelo.

▼ b) Después de ser intersectado por el túnel, el punto p estará a presión atmosférica y, su nivel piezométrico será igual a la cota del punto respecto al plano de referencia adoptado para la piezometría. En este caso, el punto p pasa a ser un contorno interno del modelo, cuya condición será de nivel piezométrico impuesto igual al nivel resultante de suponer presión atmosférica.

Por lo tanto, para poder simular el proceso transitorio del avance de la construcción del túnel, es necesario disponer de un algoritmo numérico que permita variar las condiciones de contorno a lo largo del tiempo de la simulación. Esta opción fue implementada en TRANMEF-3D utilizando una condición

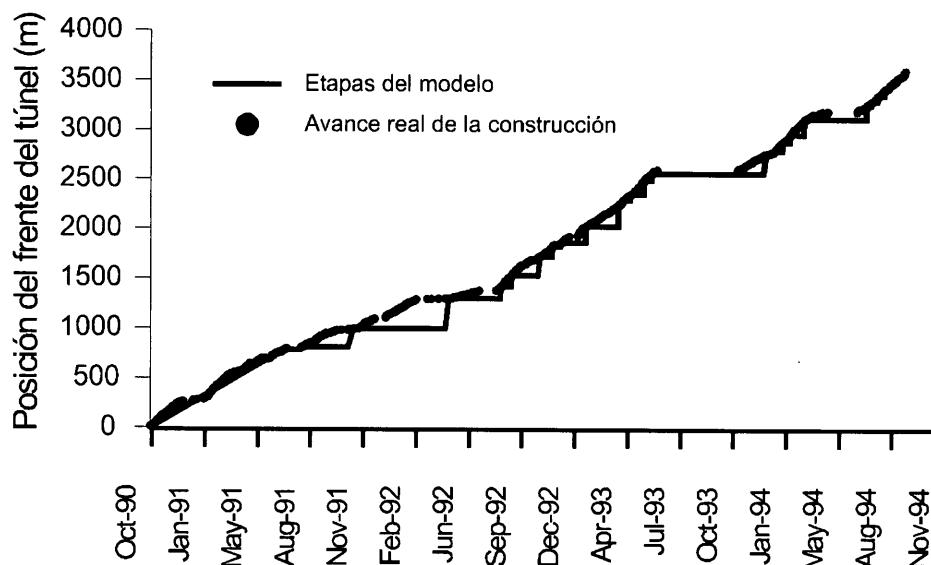


Figura 7. Comparación entre el avance real de la construcción del túnel (puntos) y las 29 etapas consideradas para su simulación con el modelo numérico (línea).

de contorno de tipo mixto, y asociando una función de tiempo al coeficiente de goteo (α). De esta forma, utilizando una función de tiempo adecuada se consigue que el coeficiente de goteo adopte un valor nulo para los tiempos anteriores al paso del túnel por el punto p , y que dicho coeficiente tienda a infinito (que adopte un valor suficientemente grande) una vez que el frente del túnel sobrepase el punto p . Por tanto, basta con definir funciones de tiempo para cada uno de los nudos de la malla por los que pasa el túnel y asignarles un nivel impuesto coincidente con su cota.

El avance de la construcción del túnel de Äspö se simuló usando 29 etapas, que se corresponden con cada tiempo en el que el túnel intersectó a los dominios hidráulicos conductores. La Figura 7 muestra una comparación entre el avance real del frente del túnel y las etapas consideradas para la simulación numérica.

RESULTADOS

La calibración del modelo transitorio de flujo constituyó la parte más laboriosa de todo el proceso de modelización, debido a la complejidad geométrica y a la gran cantidad de datos de campo disponibles. La calibración del modelo se realizó mediante la comparación de los valores calculados con los datos disponibles en 29 puntos de observación, en los que se cuenta con caudales registrados en diferentes tramos del túnel y con niveles piezométricos medidos en tramos aislados de sondeos perforados desde la superficie. Las Figuras 8 y 9

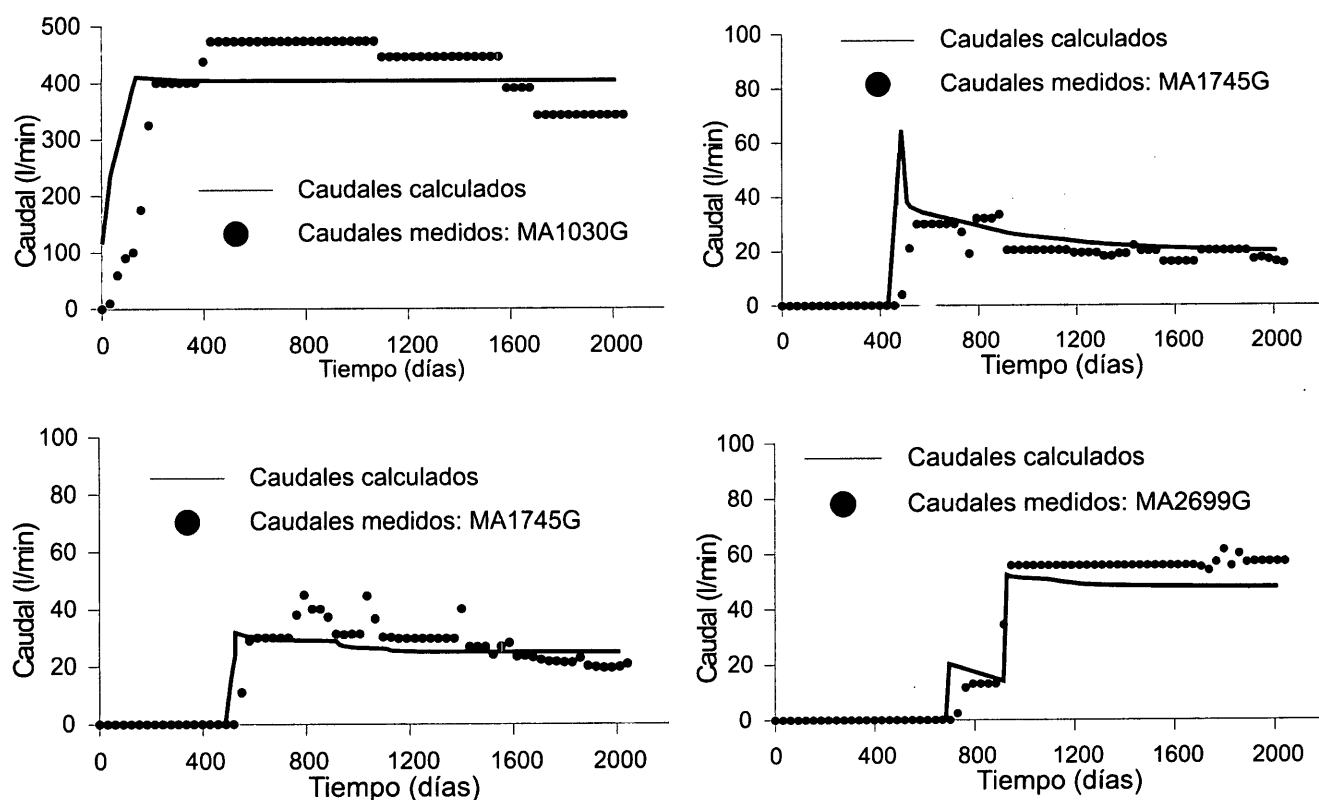


Figura 8. Comparación entre los caudales calculados y los medidos en 4 secciones de control del túnel de Äspö. La referencia del punto de control denota metros desde la entrada del túnel.

muestran la comparación entre los resultados calculados con el modelo y los datos de caudales y niveles piezométricos, en algunos de los 29 puntos de observación disponibles.

Se determinaron los errores, o diferencias entre los valores calculados y los medidos, a lo largo del tiempo en los 29 puntos de control disponibles. El cálculo de los errores se realizó mediante la siguiente expresión:

$$dh(\text{abs}) = \frac{\sum_{i=1}^n |h_1^m - h_1^c|}{n} \quad (\text{Ecuación 8})$$

donde n es el número de puntos de observación en los que se comparan los datos medidos con los resultados del modelo, h es el nivel piezométrico, el superíndice m representa los valores medidos y el superíndice c representa los valores calculados. El cálculo de las desviaciones entre valores medidos y calculados a lo largo del tiempo también se realizó para los caudales de entrada al túnel, aplicando la Ecuación 8 con caudales en lugar de niveles piezométricos. La Figura 10 muestra la evolución temporal de los errores de niveles y caudales.

Los valores medios de los errores calculados para todo el tiempo simulado fueron de 3,1 m en los niveles piezométricos

(15 puntos de observación) y de 45.6 L min⁻¹ en los caudales (14 puntos de observación). Como se observa en la Figura 10, los mayores valores (relativos) de las desviaciones se producen alrededor del día 500 tanto para caudales como para niveles. Es de destacar el hecho de que a partir del día 600 se invierte la tendencia en la evolución temporal de las desviaciones (Figura 10), comenzando a decrecer las diferencias entre los valores calculados y medidos. Las desviaciones de los niveles piezométricos únicamente se calcularon durante los primeros 800 días del modelo, puesto que el resto de los datos no se utilizaron en el proceso de calibración.

Además de los datos de caudal en los puntos de observación (que están asociados a las grandes zonas de fractura), se dispone de los datos del caudal total medido en toda la longitud del túnel. La Figura 11 muestra la comparación entre el caudal medido a lo largo de todo el túnel y la suma de los caudales calculados en todos los nudos que representan el túnel en el modelo numérico.

En la Figura 11 se aprecia que el caudal calculado en el túnel es en general ligeramente inferior que el caudal medido, lo cual es razonable puesto que el modelo numérico únicamente considera las grandes zonas de fractura y, por lo tanto, no tiene en cuenta los aportes de agua que provienen de los blo-

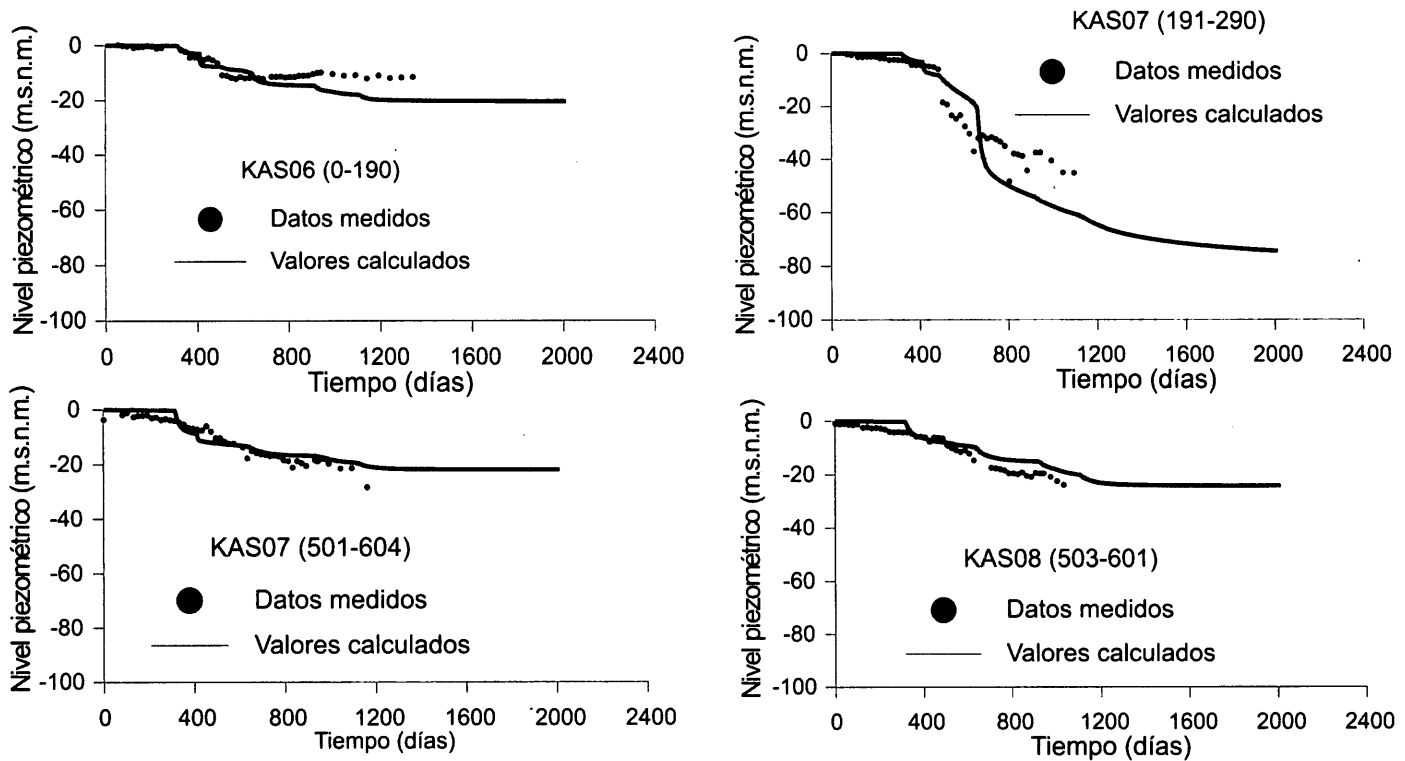


Figura 9. Comparación entre los niveles piezométricos calculados y medidos en 4 tramos de sondeos perforados desde la superficie de la isla de Aspö. En la leyenda de los gráficos se especifica la identificación de cada sondeo y la profundidad (en metros) del tramo obturado en el que se realizaron las mediciones.

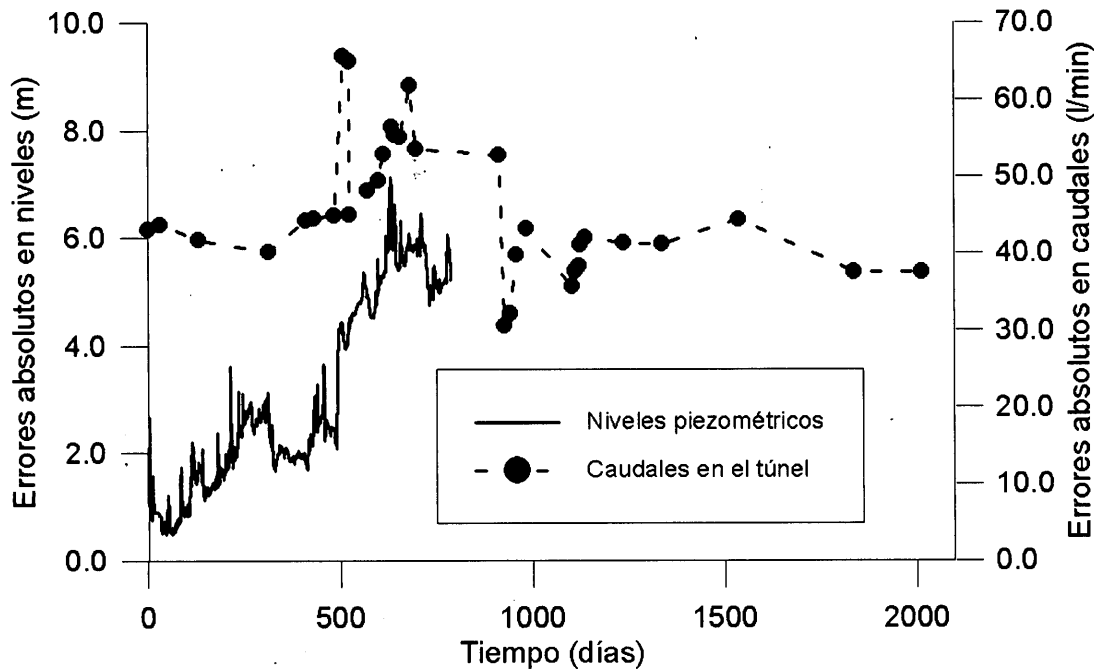
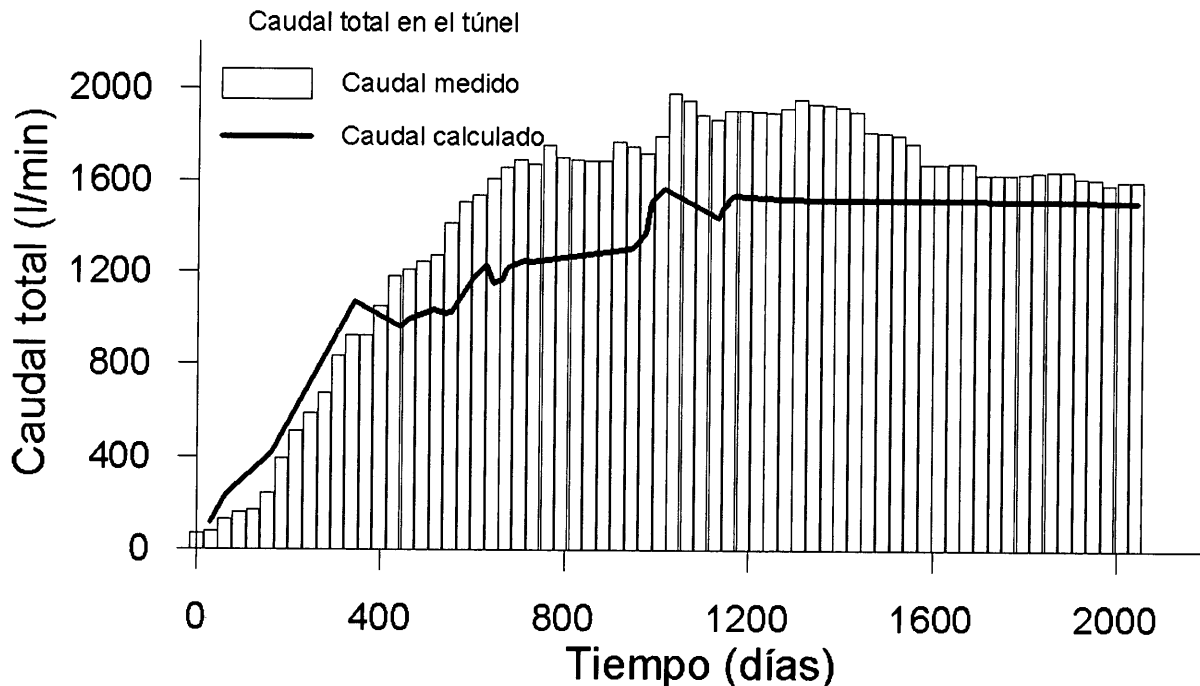


Figura 10. Evolución temporal de las diferencias (en valor absoluto) entre los valores calculados y los valores medidos de caudales y niveles en los 29 puntos de observación. El cálculo de las desviaciones se realizó aplicando la Ecuación 8.

Figura 11.
Comparación
de las
evoluciones
temporales de
los caudales
totales medidos
(barras)
y los calculados
(línea) a lo
largo de toda
la longitud
del túnel.

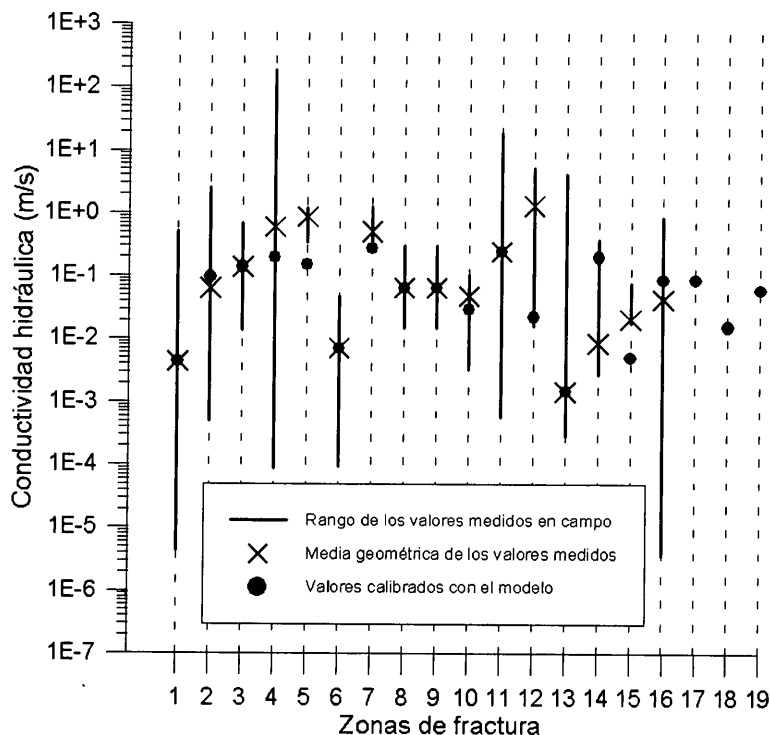


ques rocosos. La Figura 11 ilustra claramente que el modelo numérico reproduce fielmente las tendencias de los valores medidos. La contribución de los bloques rocosos puede evaluarse por diferencia entre los valores medidos y calculados. En el caso del túnel de Äspö se puede afirmar que la matriz rocosa aporta hasta un máximo del 20% del agua que entra al túnel durante el periodo transitorio (entre los días 500 y 800), y que dicho aporte de la matriz se va reduciendo paulatinamente hasta llegar al estado estacionario, en el cual las grandes zonas de fractura aportan el 95% del caudal total que fluye hacia el túnel. El análisis de estos resultados indica que los bloques rocosos presentan una cierta capacidad de almacenamiento de agua, siendo menor su capacidad para transmitirla. El almacenamiento de agua en los bloques rocosos depende fundamentalmente del número de fracturas de menor escala que existan en dichos bloques, mientras que la transmisividad está principalmente relacionada con el grado de conexión de la red de fracturación.

Los valores de conductividad hidráulica obtenidos al final de la calibración del modelo concuerdan en general con los valores obtenidos a partir de ensayos hidráulicos de campo (Figura 12).

Los valores calibrados de conductividad hidráulica para los dominios hidráulicos conductores se

Figura 12. Valores de conductividad hidráulica calibrados en el proceso de modelización y valores determinados con ensayos hidráulicos de campo. Los valores de partida utilizados en el modelo numérico fueron los correspondientes a la media geométrica de cada uno de los dominios hidráulicos conductores.



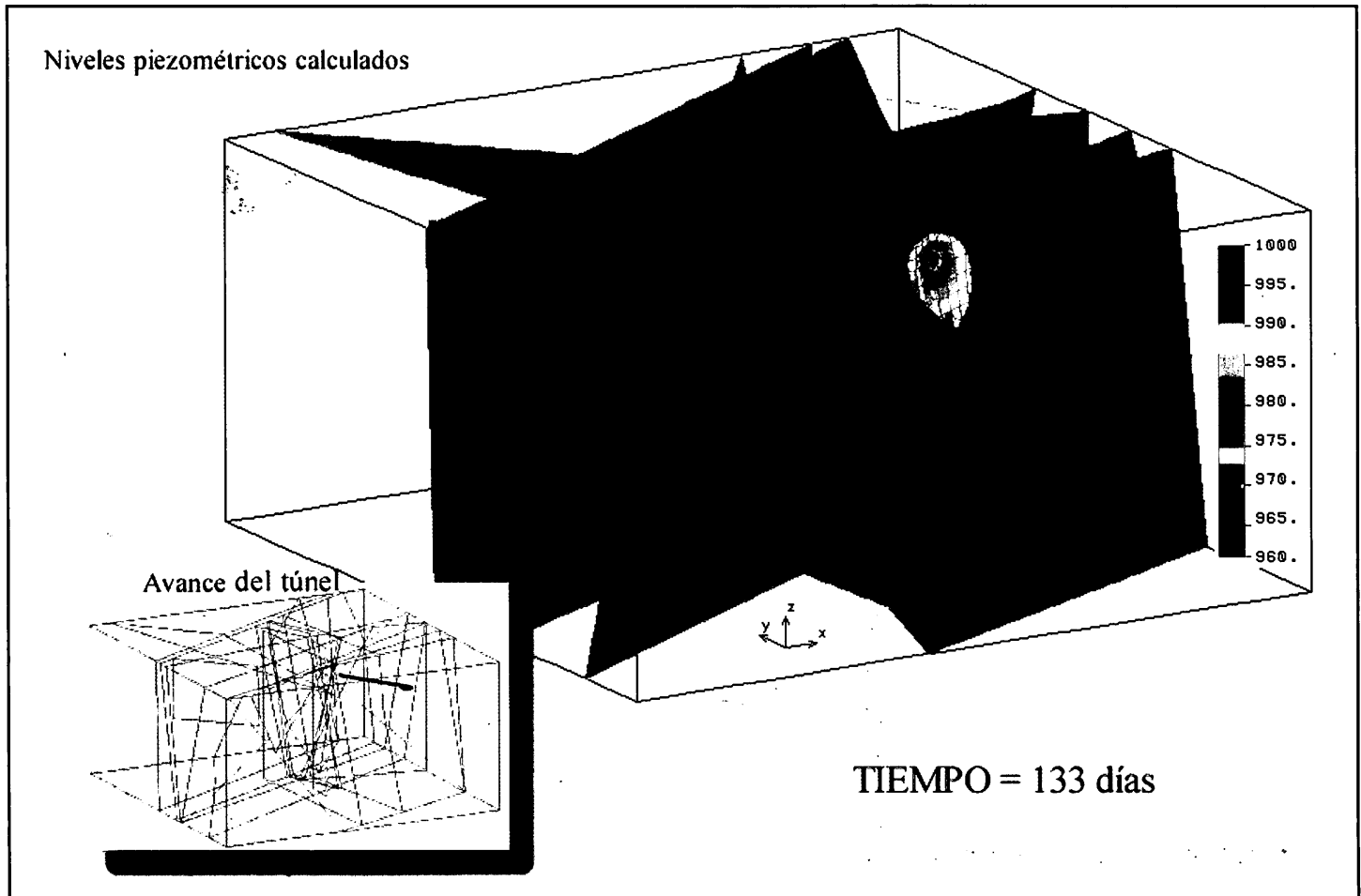


Figura 13. Niveles piezométricos calculados al cabo de 133 días con el frente del túnel situado a 992 m.

sitúan dentro del rango de los valores determinados experimentalmente por medio de ensayos de campo, excepto para dos de los dominios hidráulicos conductores (zonas de fractura 5 y 15) (Figura 12). Los valores calibrados de la conductividad hidráulica en estas 2 zonas de fractura son menores que los valores mínimos medidos por un factor de aproximadamente 2 y 3,5, respectivamente.

Las Figuras 13, 14 y 15 muestran la representación espacial de los niveles piezométricos calculados dentro del dominio tridimensional modelizado al cabo de 133, 432 y 2.013 días, respectivamente. Dichas figuras se acompañan con la posición del frente del túnel en la fecha correspondiente. Para la representación de los niveles calculados se ha girado el dominio modelizado, de manera que la orientación de las Figuras 13, 14 y 15 corresponde a la vista contraria a la utilizada en las figuras anteriores. Los resultados que se muestran en la Figura 13 corresponden a la situación en la que el frente del túnel ha avanzado 992 m de los 3.600 m de longitud final. La Figura 14 muestra los resultados calculados para el frente del túnel en la posición 1.531 m, mientras que los resultados de la Figura 15 corresponden al tiempo final del modelo (1 de enero de 1997),

es decir, 2 años y 3 meses después de haber finalizado la construcción del túnel, una vez que se ha alcanzado el estacionario de flujo. Dada la complejidad geométrica del modelo se realizó una animación de los resultados calculados, que permite visualizar tridimensionalmente el impacto hidrogeológico de la construcción del túnel. Se puede acceder a esta visualización dinámica de los resultados calculados en la siguiente dirección electrónica: <http://hydra.udc.es>. En esta dirección de internet se puede visualizar la evolución de los niveles piezométricos calculados a medida que avanza la construcción del túnel. La visualización se realizó utilizando los resultados del modelo numérico para 33 tiempos de observación previamente seleccionados, sin utilizar efectos ni transiciones, es decir, usando exclusivamente los valores calculados por el modelo numérico.

CONCLUSIONES

Se ha presentado un modelo numérico de flujo tridimensional que permite evaluar el impacto hidrogeológico producido

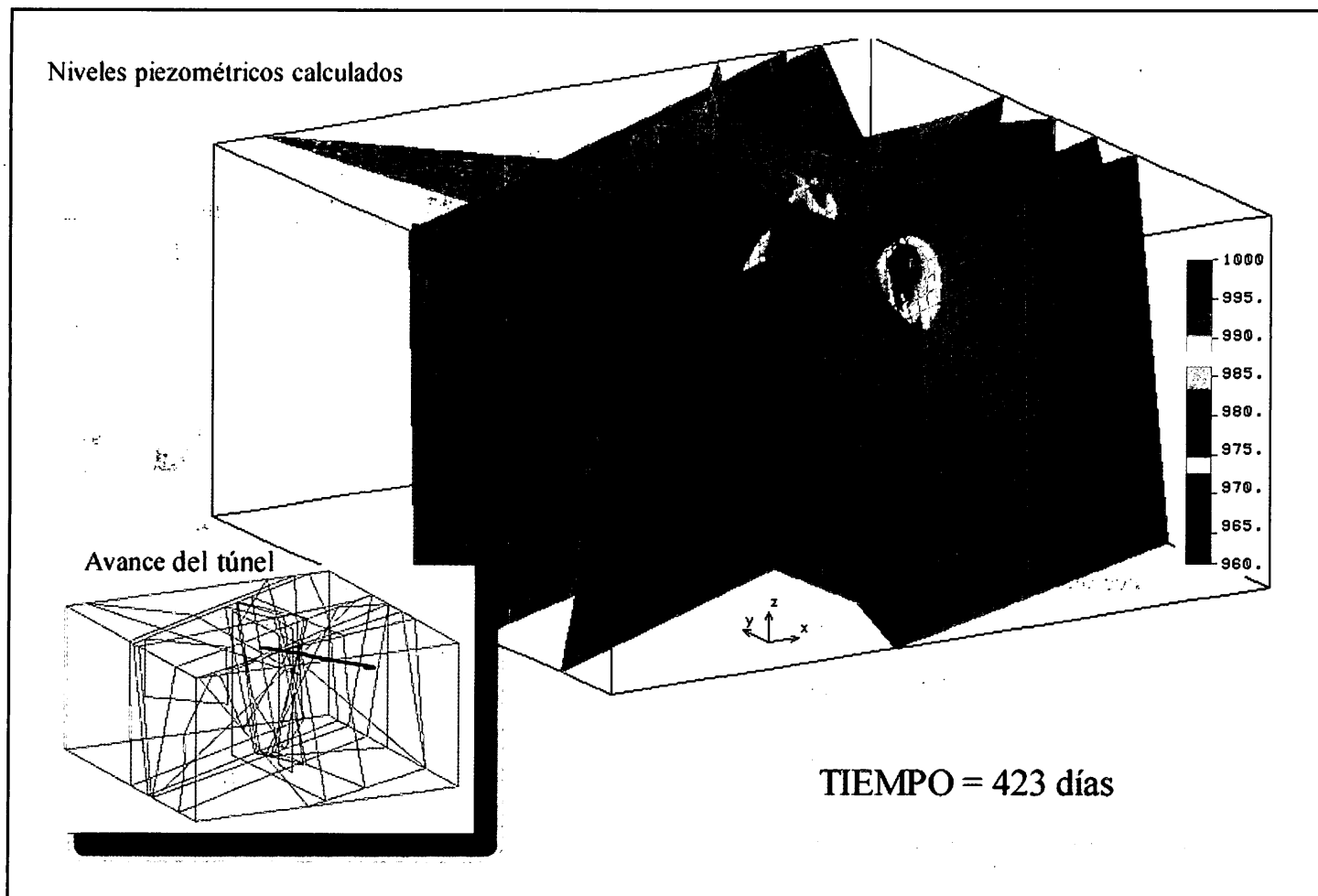


Figura 14. Niveles piezométricos calculados al cabo de 423 días con el frente del túnel situado a 1.531 m.

por la construcción del túnel del Laboratorio Subterráneo de la isla de Äspö (Suecia). El modelo numérico simula el comportamiento hidrogeológico transitorio de un macizo granítico fracturado de 2 x 2 x 1 km durante un periodo de 6 años por medio de un tratamiento discreto de las 20 zonas de fractura principales que atraviesan el macizo rocoso. La dinámica del avance de la perforación se ha simulado de manera precisa usando 29 etapas en el modelo numérico. El modelo reproduce fielmente las evoluciones temporales de las descargas de agua en el túnel así como los niveles piezométricos medidos en tramos aislados de sondeos perforados desde la superficie de la isla. El modelo numérico ha sido contrastado con un total de 29 puntos de observación y el valor medio de los errores cometidos es de 3,1 m para los niveles y de 45,6 L min⁻¹ para los caudales. Las conductividades hidráulicas calibradas se sitúan dentro de los rangos de valores determinados a partir de ensayos hidráulicos de campo, excepto para 2 de los 20 dominios hidráulicos conductores. Se ha constatado que los bloques rocosos existentes entre las principales zonas de fractura

de la isla de Äspö presentan una cierta capacidad de almacenamiento de agua aunque su capacidad transmisiva es mucho menor. Para poder predecir con precisión los caudales en las paredes del túnel es de vital importancia un buen conocimiento previo de las principales zonas de fractura (macro fracturas) más que de las características generales de la meso y micro fracturación del macizo rocoso. La capacidad del modelo numérico para reproducir las evoluciones de niveles piezométricos y caudales ha sido en gran medida posible gracias a la detallada caracterización previa de las zonas de fractura, lo que permitió construir un modelo geológico-geométrico robusto.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado en el marco de proyectos de investigación financiados por la Empresa Nacional de Residuos Radiactivos (ENRESA), dentro del Convenio Marco con la Universidad de La Coruña y la Fundación de la Ingeniería

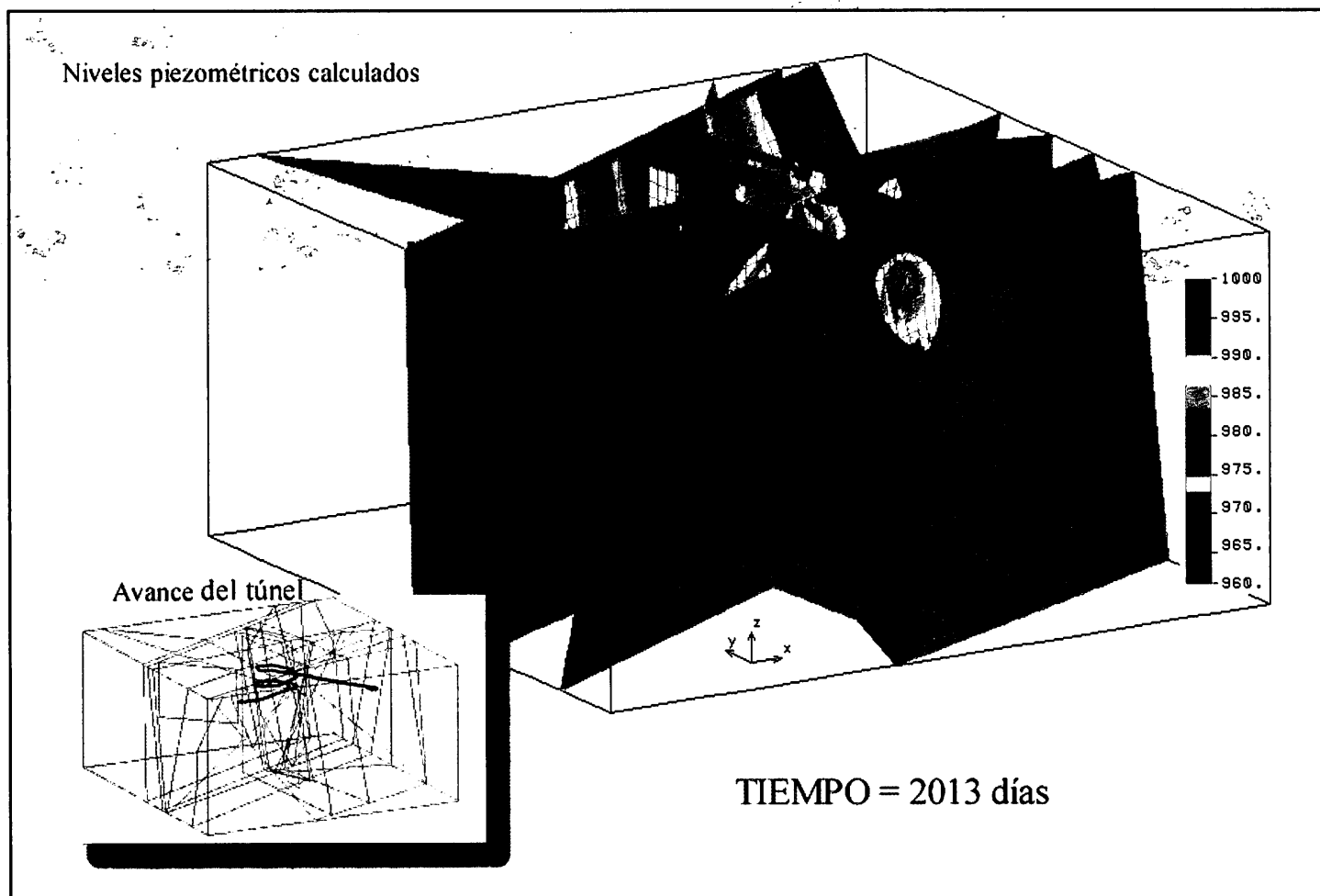


Figura 15. Niveles piezométricos calculados al cabo de 2013 días (2 años y 3 meses después de haber finalizado la construcción de los 3.600 m del túnel).

Civil de Galicia: Proyectos FEBEX (código 703231) y de Validación de Códigos (código 703334). El Proyecto FEBEX ha sido financiado en parte por la Comisión Europea (Proyecto F14W-CT95-0006). También se ha contado con financiación del proyecto de investigación de la CICYT HID98-282. Se agradece al Ministerio de Educación y Ciencia así como a la Fundación Barrié de la Maza la concesión de sendas becas de investigación al primer y tercer autor, respectivamente. El acceso y utilización de los datos del Laboratorio Subterráneo de Äspö ha sido posible gracias al acuerdo de colaboración entre ENRESA y su homóloga Sueca SKB. Los autores desean dejar constancia de su agradecimiento a todas las personas involucradas en el Laboratorio Subterráneo de Äspö y en particular a los participantes en la Task Force 5 por las facilidades para la adquisición de datos, así como por los comentarios y sugerencias para la modelización. También quieren agradecer las sugerencias aportadas por los profesores de la ETS de Ingenieros de Caminos de la Universidad de A Coruña, Luís Esteban Romera, Vicente Navarro y Luís Medina.

REFERENCIAS

- Bear, J.; Zaslavsky, D. e Irmay, S. (1968): “Hydraulics of wells. Physical principles of water percolation and seepage”. Cap 13, 395-434. UNESCO
- Berkowitz, B. (1994): “Modelling flow and contaminant transport in fractured media”. Advances in Porous Media. Chapter 6. M.Y. Corapcioglu (Ed). Elsevier
- Custodio, E. (1983a): “Hidráulica de captaciones de agua subterránea”. En: Hidrología Subterránea, Vol I, Cap 9, 614-995. Custodio, E. y Llamas, M.R. (Eds). Editorial Omega, S.A.. Barcelona.
- Custodio, E. (1983b): “Relaciones agua dulce-agua salada en las regiones costeras”. En: Hidrología Subterránea, Vol II, Cap 13, 1315-1385. Custodio, E. y Llamas, M.R. (Eds). Editorial Omega, S.A.. Barcelona.
- Custodio, E. (1983c): “Teoría elemental del flujo de agua en los medios porosos”. En: Hidrología Subterránea, Vol I, Cap 8,

445-606. Custodio, E. y Llamas, M.R. (Eds). Editorial Omega, S.A.. Barcelona.

–Galperin, A.M.; Zaytsev, V.S. y Norvatov, Y.A. (1993): *Hydrogeology and Engineering Geology*. Editorial Balkema. Rotterdam.

–Goodman et al. (1965): “Groundwater inflows during tunnel driving”. *Engineering Geology*. Vol. 2, 39-56.

–Hautojärvi, A.; Koskinen, L y Löfman, J. (1994): “Hydraulic modelling of the Large Scale Redox Experiment at Äspö HRL”. En: *Hydraulic modelling and tracer tests on the Redox Experiment in the Äspö Hard Rock Laboratory Tunnel*. E. Gustafsson (Ed). Informe Técnico de Progreso SKB PR-25-94-37.

–Hurr, R.T. y Richards, D.B. (1966): “Groundwater engineering of the Straight Creek Tunnel (Pilot Bore), Colorado”. *Engineering Geology*. Vol 3, 80-90.

–Jansson, G. (1979): “Problems associated with heavy water leakage during construction of large area tunnels in granite, limestone and chalk”. *Proc. Int. Tunnel. Symp. I*. Katamura (Ed), 187-192.

–Juanes, R. (1997): “Un código para la modelización tridimensional de flujo y transporte”. Proyecto Técnico, E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de A Coruña.

–Juanes, R. y Samper, J. (2000 a): “Una formulación general y eficiente de fracturas y condiciones de contorno en el M.E.F.: I. Aspectos teóricos”. Aceptado y pendiente de publicación en *Revista Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería*.

–Juanes, R. y Samper, J. (2000 b): “Una formulación general y eficiente de fracturas y condiciones de contorno en el M.E.F.: II. Aplicación a casos sintéticos”. Aceptado y pendiente de pu-

blicación en *Revista Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería*.

–Lembke, K.E. (1886): “Flujo de agua subterránea y la teoría de colectores de agua” (en ruso). *El Ingeniero*, Revista del Ministerio de Comunicaciones, 1886, nº2 y 1887 nº17-18.

–Moreno, L.; Tsang, Y.W.; Tsang, C.F.; Hale, F.V. y Neretnieks, I. (1988): “Flow and tracer transport in a single fracture: A stochastic model and its relation to some field observations”. *Water Resources Research*, 24 (12), 2033-2048

–Rhén, I.; Gustafson, G.; Stanfors, R. y Wikberg, P. (1997 a): “Models based on site characterization” 1986-1995. Informe Técnico SKB TR 97-06.

–Rhén, I.; Bäckbom, G.; Gustafson, G.; Stanfors, R. y Wikberg, P. (1997 b): “Results from pre-investigations and detailed site characterization”. Informe Técnico SKB TR 97-03.

–Samper, F.J. (1994): “Modelos de acuíferos”. En: *Temas actuales de hidrología subterránea*, 79-101. Universidad Nacional Mar del Plata, Argentina.

–Smellie, J.A.T.; Laaksoharju, M. y Wikberg, P. (1995): “Äspö, SE Sweden: a natural groundwater flow model derived from hydrochemical observations”. *Journal of Hydrology*, 172, 147-169. ■

NOTA: La visualización tridimensional de la evolución de niveles piezométricos en la red de fracturas se puede consultar accediendo a la dirección electrónica: <http://hydraudc.es>. En esta dirección se ha colocado una versión resumida del presente artículo incluyendo las animaciones del avance del túnel y el impacto producido en los niveles piezométricos del entorno del mismo.