

ESTUDIOS DE I+D SOBRE LA MODELIZACIÓN DE UN AGP DE RRAA, REALIZADOS EN EL DMAMI-ETSI DE MINAS (UPM)

O. CALLE - F. FLÓREZ - J.V. FRANCO - A. HIDALGO - R. MARTÍNEZ -
C. PAREDES - R. RODRÍGUEZ

Se recoge la trayectoria científica de un grupo de investigación del Departamento de Matemática Aplicada y Métodos Informáticos (en adelante DMAMI), perteneciente a la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), en el campo de la modelización y simulación numérica de procesos que tengan lugar en el entorno circundante a la localización de un almacenamiento geológico profundo (AGP) de residuos radiactivos de alta actividad (RRAA). Cada una de las líneas de investigación tratadas, se presenta a través de la breve exposición de un proyecto que aborda la temática referida a los diferentes conceptos que el AGP español contempla. Estas líneas pueden sintetizarse en tres principales. Una primera que estudia los diferentes modelos estocásticos y su uso para la simulación de la heterogeneidad y fracturación de la barrera geológica alrededor del AGP. La segunda se refiere al análisis y simulación del comportamiento térmico, hidráulico y mecánico de la barrera de ingeniería y geológica próxima. Y la tercera trata sobre la modelización y simulación de los diferentes procesos fisicoquímicos que, en cuanto al transporte por aguas subterráneas, acontecen en la migración de los radionúclidos desde un AGP hacia la geosfera.

The aim of this work is to present the scientific trajectory of a research team, from the Applied Mathematics & Computational Methods Dpt., in the numerical simulation of different problems associated with a nuclear waste disposal. This department belongs to the School of Mines of the Politechnical University of Madrid. Three different tasks involved in the performance security assessment of the spanish underground site are developed here. Through different projects related with the rock mass heterogeneity and fracture systems simulation, thermo-hydro-mechanical analysis of the dynamical behaviour in salt, clay and granite rocks, and energy and mass reactive transport to the geosphere, many problems (conceptual, physico-chemical and numerical) are boarded by this team. Many of them are founded by the Nuclear Spanish Management Agency (ENRESA), or the Nuclear Safety Spanish Conseil (CSN). Some of them are special research activities subsidized by the Knowledge General Promotion programs from the Ministry of Education and Science. Also, in the case of international intercomparison activities, European Comission foundations are provided.

Palabras Clave: agp, clipex, enresa2000, febex, hidrobap, petra, transporte reactivo, modelo fracturas discretas, termo hidro mecánica, análisis correlatorio espectral, modelización numérica.

INTRODUCCIÓN

Hace aproximadamente una quinceña de años que el DMAMI, departamento adscrito a la E.T.S. de Ingenieros de Minas de la UPM, se encuentra trabajando en tres líneas de investigación que, entre otras, abordan alguno de los múltiples problemas de modelización de procesos físico químicos en las barreras del campo próximo y los que en su seno pueden acontecer durante el planteamiento y puesta en marcha de un AGP para RRAA.

La ejecución de estas investigaciones se plantea a partir del concepto de AGP español, a través de proyectos y convenios de colaboración entre empresas de índole nacional, fundamentalmente ENRESA y CSN, quienes financian y coordinan ejecutivamente una gran parte de estos proyectos. En algunos casos, los proyectos tienen un marcado interés internacional, como ejercicios de intercomparación, experimentos de validación y verificación,

etc.; en cuyo caso, adicionalmente, son cofinanciados con fondos de la Comisión Europea. También cabe mencionar que algunas de estas investigaciones han sido financiadas por los diferentes programas sectoriales de Promoción General del Conocimiento del Ministerio de Educación y Ciencia.

La realización de estos proyectos, en muchos casos, se lleva a cabo contando con la colaboración de grupos de investigación pertenecientes a otras universidades españolas, como la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), la Universidad Complutense de Madrid (UCM), la Universidad de la Coruña (ULC), etc., en algunos casos coordinados desde el DMAMI (UPM).

Atendiendo al rango de escalas involucradas en los estudios, de mayor dimensión a menor, en la primera de las líneas se trata de definir y poner en funcionamiento diferentes metodologías de modelización y simulación estocástica de la heterogeneidad del medio circundante al almacenamiento (campo próximo y lejano). Inicialmente se constató la importancia de éste en el proyecto "Realización de un modelo hidrogeológico del área del almacenamiento de El Cabril" (1989 - 1991) para el que se desarrolló un modelo conceptual del terreno, circundante

(hidrológicamente influido) a la ubicación del almacenamiento en superficie; posteriormente, fue uno de los aspectos tratados a través de una de las áreas del proyecto "Desarrollo de modelos numéricos para la simulación de procesos que tengan lugar en la geosfera" (1993 - 1996), ambos financiados por ENRESA, estudiando los medios heterogéneos continuos. Este ha sido, además, el tema principal en el proyecto "Hidrobap" (1995 - 1998); ampliando el anterior sobre medios fracturados, y actualmente extendido en el proyecto "Hidrobap II" (1999 - 2001), donde se incorporan, en los modelos realizados, aspectos tectónicos para la génesis de discontinuidades y fracturas, ambos cofinanciados por ENRESA y el CSN.

La segunda línea, que se puede considerar en el campo próximo, afronta el análisis y la modelización del comportamiento termo-hidro-mecánico (THM) tanto de la barrera de bentonita alrededor de la cápsula o contenedor, como del macizo rocoso adyacente. Se ha trabajado sobre diferentes aproximaciones al problema mencionado, considerando diferentes ecuaciones constitutivas (modelos elásticos, elastoplásticos, con fluencia, etc.) sobre diferentes tipos de roca (aquellas que se consideran factibles en el planteamiento de un AGP, granito, arcilla y sal). Se inició ésta con la colaboración en el proyecto "Cosa" (1987 - 1999) sobre macizos salinos, posteriormente participando como equipo en los proyectos europeos "Interclay" (1991 - 1994), y "Clipex" (1997 - 2000), y nacionales "Decovalex" (1996), financiado por la OCDE/NEA, sobre estructuras arcillosas, y actualmente sobre macizos cristalinos graníticos en el proyecto "Febex I" (1994 - 1999) cofinanciado por la CE y ENRESA y "Enresa2000" (1999 - 2004) por ENRESA.

La tercera línea se lleva a cabo, en un principio, a través de la financiación por ENRESA del proyecto "Desarrollo de modelos numéricos para la simulación de procesos que tengan lugar en la geosfera" (1993 - 1996), y ulteriormente también por la CICYT-MEC con la concesión de subvenciones para los proyectos "Desarrollo de métodos y códigos de simulación numérica de procesos de transporte de contaminantes en aguas subterráneas y superficiales" (1996 - 1998) y "Simulación de procesos de transporte reactivo de contaminantes en la geosfera" (1999 - 2002). En la actualidad son ENRESA y el CSN quienes con la financiación el proyecto "Petra" (1999 - 2001) permiten su permanencia. Esta línea, por tanto, abarca la modelización y simulación de una gran

cantidad de fenómenos fisicoquímicos que ocurren durante el recorrido de los radionúclidos desde que la cápsula que los contiene los libera.

A continuación, se pasa a describir brevemente cada una de las tres líneas anteriores, a través de la presentación con más detalle de alguno de los proyectos en los que más recientemente se ha estado trabajando.

HIDROGEOLOGÍA EN MEDIOS DE BAJA PERMEABILIDAD

El Proyecto HIDROBAP es un proyecto ya finalizado. De carácter multidisciplinar, desarrollado durante tres años (Dic-1995 / Dic-1998), y cofinanciado por ENRESA y el CSN, en él participaron las universidades UPM, UPC y UCM. Su objetivo principal fue el diseño, elaboración y valoración de una metodología barata, alternativa y complementaria, basada en los Modelos de Fracturas Discretas (MFD), válida para la caracterización estructural e hidrogeológica de medios geológicos fracturados y la posterior simulación de flujo y transporte de radionúclidos en dichos medios. La zona de aplicación de la metodología desarrollada fue el stock granítico de El Berrocal, en la provincia de Toledo (España).

Este objetivo se justificó en la necesidad de estudiar y caracterizar rocas de baja permeabilidad para la ubicación de un AGP de RRAA. Su espectro de aplicación no se limita a este objetivo, ya que existen muchos emplazamientos de instalaciones nucleares españolas ubicadas en este tipo de rocas, como son: el Cabril, minas de uranio, fábricas de concentrado, etc.

Creación y diseño del modelo conceptual. Calibración del modelo.

La estructura del Proyecto se organizó en cuatro etapas metodológicas generales. En una primera etapa consistió en la caracterización de las propiedades geológicas e hidrogeológicas con las que definir los parámetros característicos del modelo, mediante técnicas estructurales (análisis poblacional de fallas, cartografía estructural), geoquímicas (emanometría) y petrológicas (termocronometría por fallas de fisión, termobarometría con inclusiones fluidas y geocronología K-Ar de rocas de falla). Con esto se llegó a la conclusión de que existen cinco familias de fracturas (A, B, C, D y E) asociadas a dos eventos tectónicos bien diferenciados, y otra pseudo horizontal.

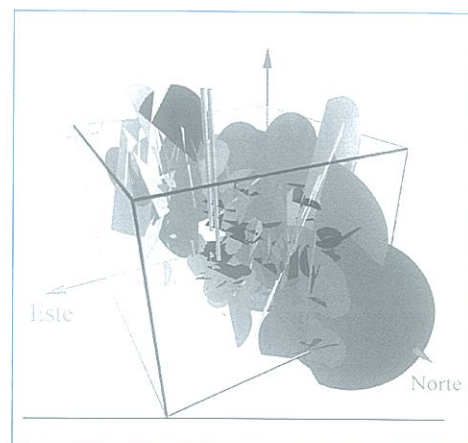


Figura 1.- Modelo de la red de fracturación efectiva a escala del S-16 (bloque de 600x600x600 m).

Con esta información se definieron las funciones de distribución estadística de las propiedades correspondientes, que fueron, para cada familia (esférica de orientaciones, de los tamaños de las trazas, del soporte de simulación, y de transmisividades que se asignará a cada fractura). Además se determinó la densidad volumétrica invariante de fracturación. A partir de

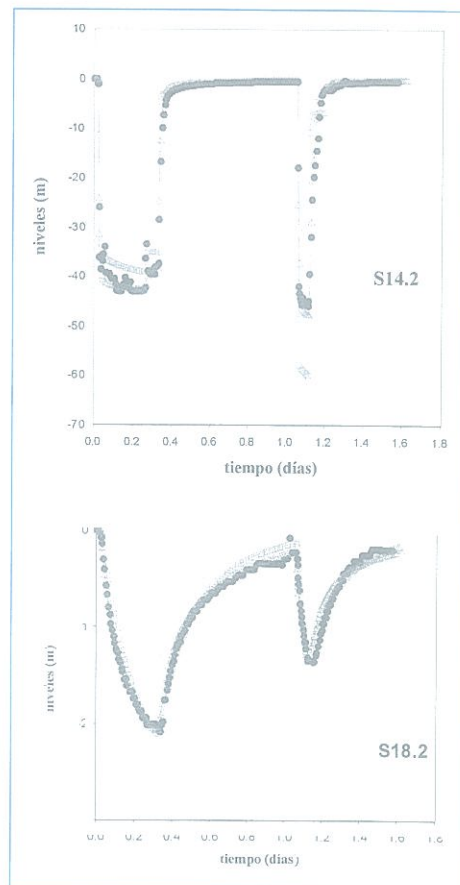


Figura 2.- Hidrogramas de decensos medidos (●), calculados en HIDROBAP (○) y en El Berrocal (□) en los tramos S-14.2 (tramo de bombeo) y S-18.2 (tramo de observación).

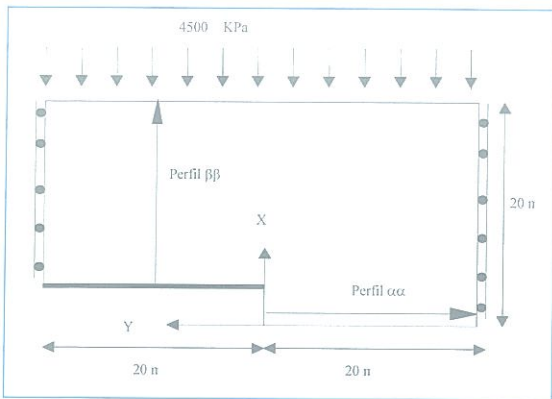


Figura 3.- Geometría, condiciones iniciales y condiciones de contorno.

éstas, se generaron estocásticamente, una serie de redes de fracturación según un esquema de Monte Carlo, a tres escalas de trabajo: dos escalas cartográficas (1:10.000 y 1:2.000) y una escala local (escala de un sondeo vertical, el sondeo S-16, de 600 m). Sobre cada una de ellas, se definió una red efectiva de flujo hidrogeológico, discriminada de la red de fracturación.

A continuación, se abordó la modelización del flujo hidrogeológico a través de la red conductiva de fracturas (red de percolación) que se extrajo de la red de fracturas generada a partir del MFD, simulándose mediante la utilización de un método de elementos finitos 1D. En la cuarta etapa se efectúa la calibración, aprovechando los ensayos de interferencia entre dos sondeos próximos al sondeo S-16 (sondeos S-14 y S-18 del Proyecto El Berrocal). En la figura 1 se representa una de las posibles generaciones de redes de fracturas a la escala del sondeo S-16, correspondiente a la red efectiva de flujo hidrogeológico donde, figuran los sondeos S-14 y S-18 como dos tubos. Los resultados de los descensos observados en los sondeos S-14 y S-18, según el modelo de HIDROBAP, se presentan en la figura 2, frente a los descensos reales y a los calculados en el Proyecto El Berrocal.

Resultados obtenidos

Como resumen de los mismos, indicar que la metodología de simulación y calibración hidrogeológica, para medios de baja permeabilidad, desarrollada en el Proyecto HIDROBAP, se ha demostrado como efectiva y útil a la hora de estimar las propiedades hidrogeológicas de un macizo granítico fracturado, con una alta densidad de fracturación y a escalas muy diversas. Además de ser lo suficientemente robusta como para que, a partir de una cantidad de información relativamente

escasa (comparativamente con la complejidad de un medio heterogéneo, anisótropo y fracturado), extraída de la superficie y de un solo sondeo, se puedan ajustar las propiedades hidrogeológicas (transmisividad y coeficiente de almacenamiento) con la interpretación de un ensayo de interferencia. La calidad obtenida es comparable a la de un modelo poroso continuo 3D, más costoso numéricamente y que precisa más información.

MODELIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO THM

Modelización Mediante Métodos Numéricos De La Excavación De La Galería De Conexión Del Laboratorio Del Proyecto Clipeix.

En este epígrafe se presenta el trabajo desarrollado en el marco del proyecto europeo CLIPEX. Este proyecto está coordinado por ENRESA y cofinanciado por la Comisión Europea. En él participan los siguientes grupos: SCK-CEN, G3S, Geocontrol, Niras-Ondraf y la UPM a través del DMAMI.

El objetivo fundamental de este pro-

yecto es realizar la modelización de la excavación de la galería de conexión del laboratorio subterráneo de Hades (Mol, Bélgica) y estudiar el comportamiento de los materiales una vez finalizada la misma. Además, se realiza un ejercicio de comparación de todos los resultados obtenidos por los diferentes participantes en el proyecto. La formación que alberga la galería es el macizo arcilloso de Boom, en Hades.

Para llevar a cabo la modelización de la excavación de la galería se ha considerado ésta como una cavidad cilíndrica en medio de un macizo arcilloso homogéneo e isótropo. Se han supuesto condiciones de axisimetría (según eje Y), deformación plana, no existencia de drenaje –dada la baja permeabilidad de la arcilla de Boom ($k=4 \cdot 10^{-12}$ m/s)– y un ratio tecnológico de avance de la excavación de 2 m/día. También se ha tenido en cuenta la descompresión de la masa de arcilla cerca del frente de la excavación.

A medida que avanza la excavación se incorpora un sostenimiento de acero para impedir que la convergencia de la arcilla cierre el túnel. El contacto del sostenimiento con la arcilla del macizo se ha realizado con elementos de contacto. El modelo constitutivo empleado para describir el comportamiento de la

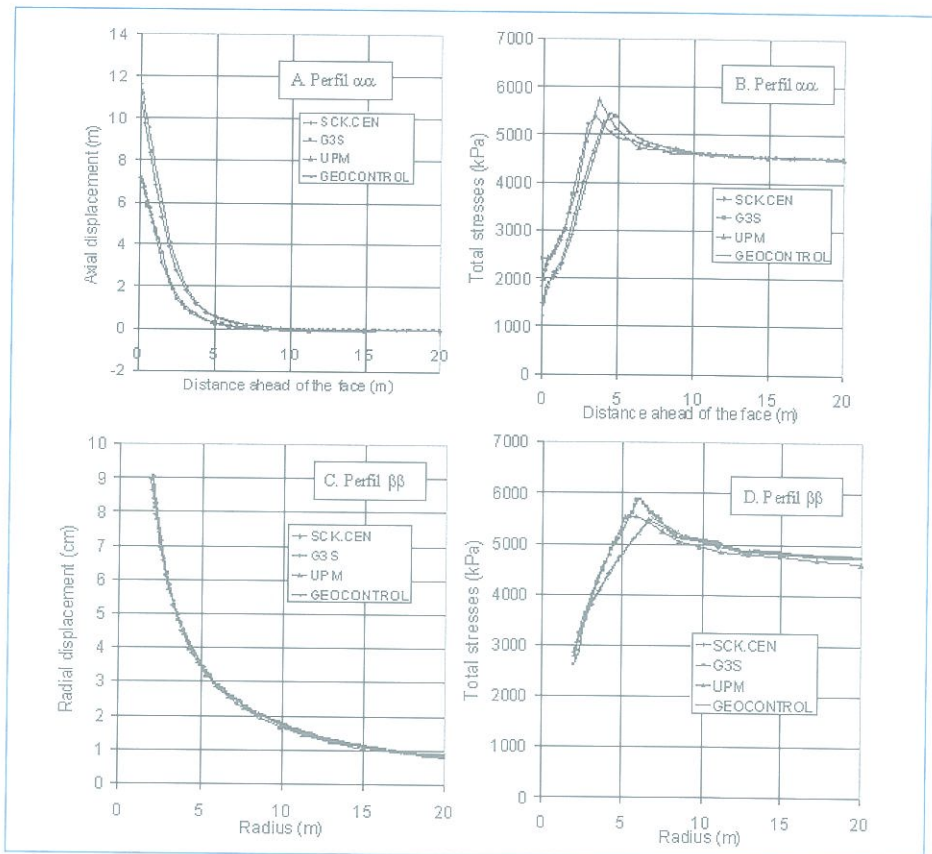


Figura 4.- A: desplazamiento axial, perfil αα. B: tensiones totales, perfil αα. C: desplazamiento radial, perfil ββ. D: tensiones totales, perfil ββ.

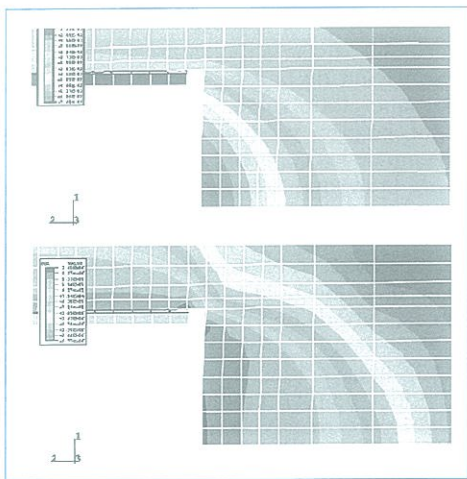
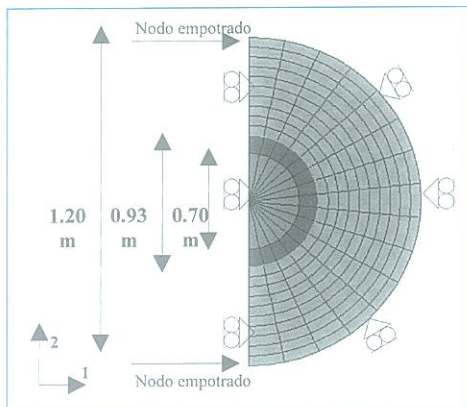


Figura 5.- Frente del túnel. A: desplazamiento axial; B: presión de poro.

Figura 6.- Geometría, mallado, condiciones de contorno y materiales implicados (del interior al exterior: residuos-rojo-, cápsula-azul- y bentonita-naranja-).



arcilla ha sido el de Cam-Clay modificado, suponiendo un comportamiento elástico para el acero y elastoplástico para la arcilla. La figura 3 muestra el dominio del problema una vez finalizada la perforación, así como las condiciones iniciales y de contorno.

A continuación se muestran algunos de los resultados obtenidos en los análisis para los perfiles $\alpha\alpha$ y $\beta\beta$ (figuras 4 A, B, C y D). Los resultados representados son los desplazamientos (en cm) y tensiones totales (en KPa) correspondientes a todos los participantes del proyecto.

Las figuras 4 A y B muestran dos detalles del mallado obtenidos para el desplazamiento axial (figura 5 A) y las presiones de poro (figura 5 B) una vez finalizada la excavación. En ellas se puede apreciar la descompresión sufrida por la arcilla en el frente de la excavación, el pequeño hueco resultante entre el macizo y el revestimiento y el drenaje de la arcilla en el frente de excavación, debida a la descompresión de la misma.

Como conclusión se puede destacar el buen comportamiento del material

durante la excavación y después de realizada la misma y la gran uniformidad existente entre los resultados obtenidos por todos los participantes en el ejercicio de modelización del proyecto CLIP-EX.

Evaluación del hundimiento de la cápsula de residuos por la fluencia de la Bentonita

El epígrafe que se presenta se enmarca en el proyecto ENRESA2000, que tiene por objetivo el estudio del campo cercano en un AGP en granito. El asentamiento de la cápsula es un problema muy complejo, que implica un acoplamiento de fenómenos térmicos, hidráulicos y mecánicos en la bentonita, ya que, además de los esfuerzos mecánicos que se producen asociados al peso de la cápsula, este material experimenta una hidratación en la zona de contacto con la roca encajante y un calentamiento en la zona de contacto con la cápsula. El trabajo desarrollado muestra los resultados obtenidos de una de las modelizaciones numéricas realizadas, con el objeto de evaluar el hundimiento a largo plazo (los análisis comprenden un intervalo de tiempo de 10000 años) de la cápsula de residuos radiactivos, causado por la fluencia de la bentonita, material de relleno y sellado que rodea a la misma, en la galería de almacenamiento emplazada en un macizo granítico.

Se presenta como ejemplo en la figura 6 una simulación simplificada (en 2D) de las deformaciones por fluencia de la bentonita y está basado en las siguientes hipótesis de partida:

- Inicialmente la bentonita está saturada sin cambio de volumen excepto por el cierre de las juntas existentes entre los bloques de bentonita compactada y, además, ejerce una presión de hinchamiento.
- Las deformaciones por fluencia de la bentonita ocurren bajo condiciones de volumen constante (no drenado).
- Las propiedades de fluencia de la bentonita dependen de: las tensiones cortantes inducidas en la arcilla por el peso propio de la cápsula, la resistencia cortante de la arcilla no drenada, la temperatura de la bentonita.

La simulación numérica del asentamiento de la cápsula se ha realizado mediante un análisis viscoelástico a temperatura media de la bentonita de 70°C.

La figura 7 presenta un diagrama de desplazamientos (dirección y sentido) de todos los nodos correspondientes a la bentonita; en el se puede observar la fluencia -y recolocación- de la misma

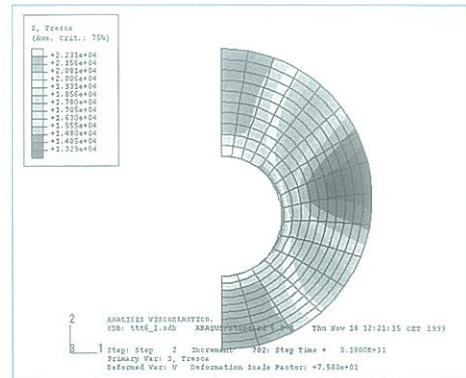


Figura 8.- Contorno de tensiones de Tresca.

a través de un movimiento antihorario, causado por el peso propio de la cápsula de residuos.

El hundimiento de la cápsula por la fluencia de la bentonita es muy pequeño (desplazamiento vertical de $1.81E-3$ m), produciéndose el hundimiento en el primer año del almacenamiento y disminuyendo a partir la velocidad de deformación, llegando prácticamente a anularse. El estado tensional resultante en el material de relleno y sellado se puede observar en la figura 8, donde el equivalente de tensiones de Tresca nos muestra las zonas de mayor cortante en la arcilla.

Análisis estadístico de los datos del ensayo en maqueta del proyecto Febex

FEBEX (Full-scale Engineering Barriers Experiment) es un proyecto de investigación en el ámbito de la gestión de residuos cofinanciado por la CE y ENRESA, en desarrollo desde 1994. El trabajo se lleva a cabo conjuntamente entre las siguientes instituciones: CIEMAT, AITEMIN, UPC-DIT (CIMNE), ULC, CSIC-Zaidín y UPM-DMAMI por parte de España; ANDRA y GRS por parte de Francia; y GRS por parte de Alemania.

El propósito de FEBEX es el estudio del comportamiento de componentes del campo próximo de un AGP de RRAA en roca cristalina. El experimento consta de tres partes: 1) un ensayo "in situ" desarrollado en Grimsel (Suiza), en condiciones naturales y a escala real; 2) un ensayo en "maqueta" acometido por España (CIEMAT), a escala casi real (Figura 9); 3) un conjunto de ensayos complementarios de laboratorio. El experimento está basado en el concepto de almacenamiento español en roca cristalina: las cápsulas metálicas con el residuo son depositadas horizontalmente en galerías, rodeadas por una barrera de arcilla formada por bloques fabricados con bentonita compactada de alta densidad.

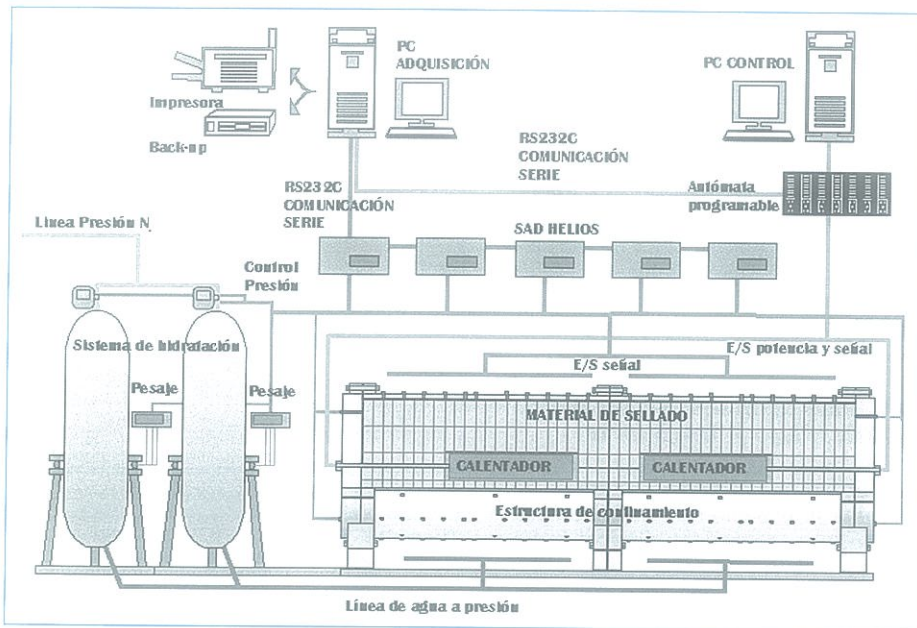


Figura 9.- Esquema del ensayo en "maqueta", ubicado en el CIEMAT.

El trabajo desarrollado en el DMA-MI, a partir del año 1997 hasta la actualidad, ha consistido en la aplicación del análisis correlatorio y espectral (ACS) de series temporales al estudio de los datos registrados en el ensayo en "maqueta" del experimento FEBEX. Dicho experimento consiste en un ensayo de calentamiento, realizado en el CIEMAT (Madrid) con condiciones de control conocidas, en el que se tratan de reproducir el estado termo-hidro-mecánico de un AGP de RRAA.

Tras el pretratamiento de los datos temporales registrados por los sensores, consistente en el filtrado e interpolación de las anomalías, se ha procedido al análisis correlatorio (dominio tiempo) y espectral (dominio frecuencia) de

las citadas series (ACS). Este tipo de análisis permite obtener información sobre la respuesta impulsional del sistema, sobre la estructura de la serie temporal y de sus múltiples relaciones entrada-salida. Con el análisis ACS simple se trata de distinguir las características propias de cada serie, tales como la existencia de autocorrelación, ergodicidad, ciclos, tendencias, etc. El análisis ACS cruzado pone en evidencia la relación causa-efecto existente entre la entrada y la salida del sistema. A continuación se resumen las principales conclusiones extraídas de los resultados:

- Mayor inercia de los sensores ubicados en los niveles centrales a la va-

riación de diversos parámetros (presión, humedad, temperatura, etc.).

- Permite la detección de sensores averiados o que han falseado las mediciones, tales como algunos de presión total, que al no estar bien conectados a la bentonita están midiendo la presión de fluido.

- Anisotropía en el comportamiento de la bentonita, deducida de la separación entre las curvas de autocorrelación para un mismo nivel.

- Influencia de la temperatura superficial de la estructura metálica sobre las presiones tangenciales y radiales (correlación cruzada negativa: la presión disminuye cuando la temperatura aumenta). Esta relación inversa puede ser consecuencia de la dilatación y contracción de la estructura con la variación de la temperatura externa.

- Respuesta bien estructurada (elevada autocorrelación) a largo plazo para los sensores de presión total y de humedad relativa. A corto plazo se observa la influencia de la temperatura de la bentonita sobre la presión total.

- La correlación cruzada entre temperatura de la bentonita (señal de entrada) y la humedad relativa (señal de salida) por niveles, revela una consecuencia importante: en los niveles 2 y 4 hay una buena correlación, pero en los niveles 1 y 3 no es así. Este hecho permite suponer que existe algún fenómeno en estos dos niveles que interfiere en esta relación. Probablemente, la interferencia viene producida en el nivel 1 por la evaporación del agua, y en el nivel 3 por el correspondiente proceso de condensación.

- La potencia del calentador influye a largo plazo en la temperatura de la bentonita, mientras que a corto plazo ocurre el fenómeno inverso: es la temperatura de la bentonita la que causa las variaciones de la potencia del calentador.

Del estudio estadístico realizado se desprende un mayor grado de conocimiento de los procesos termo-hidro-mecánicos que tienen lugar en el ensayo en "maqueta" del FEBEX, y se ha probado su capacidad como una metodología efectiva para el análisis de este tipo de sistemas.

MODELIZACIÓN DE LA MIGRACIÓN DE RADIONÚCLIDOS

En esta línea de investigación se fijó como objetivo simular fenómenos de liberación y transporte de isótopos radiactivos y de calor a través de la geosfera, procedentes de un AGP de RRAA. Para ello, se consideran los diferentes

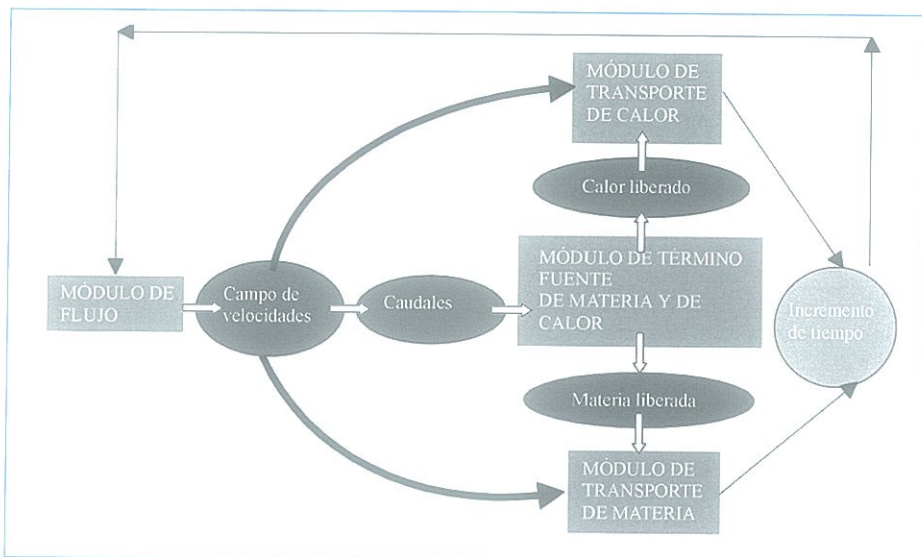


Figura 10.- Esquema del acoplamiento de los módulos desarrollados

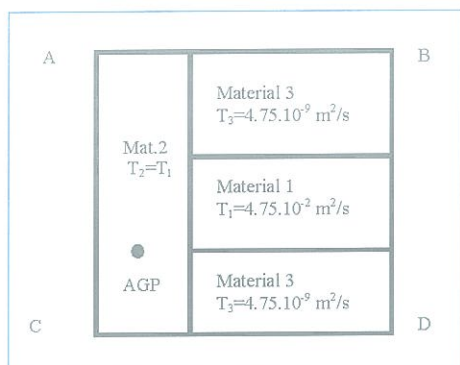


Figura 11 A.- Modelo conceptual.

Figura 11 B.- Alturas piezométricas (Unidades: $\times 10^3 \text{ m}$) en régimen permanente.

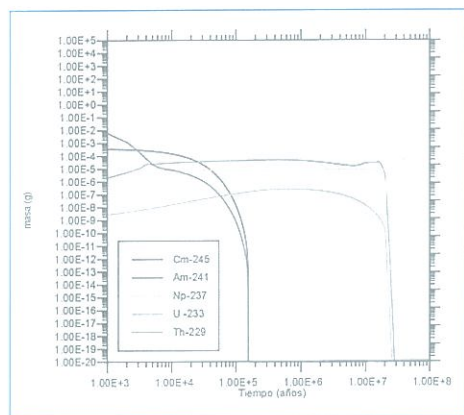
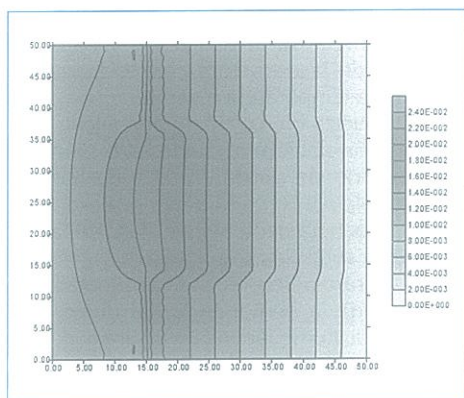
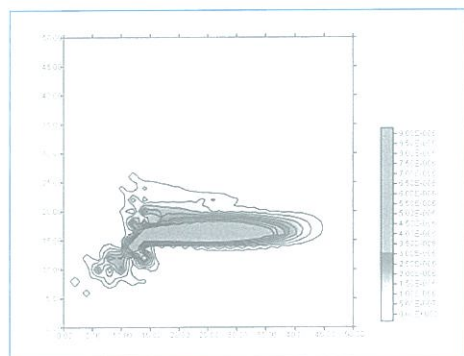


Figura 12 A.- Liberación a la geosfera de la cadena del Np-237 (unidades en gramos)

Figura 12 B.- Distribución Np-237, $t = 90000$ años (unidades en gramos)



fenómenos físicos y químicos que intervienen en el problema: flujo saturado de agua subterránea, desintegración radiactiva, lixiviación y disolución de radionúclidos en agua subterránea, generación de calor, transporte a través de la geosfera de materia y de calor, reacciones químicas. Algunos de esos fenómenos están relacionados entre sí, lo que ha permitido construir un modelo acoplado constituido por los siguientes modelos:

Modelo acoplado de Término Fuente, Flujo Y Transporte

Flujo en medio poroso saturado: Se resuelve la ecuación de flujo de agua subterránea en medios bidimensionales porosos saturados, lo que permite obtener la distribución de alturas piezométricas que, por aplicación de la ley de Darcy calcula el campo de velocidades del agua subterránea en el dominio. Ese campo de velocidades se emplea para resolver el problema de transporte de radionúclidos. La aproximación espacial de la solución de la ecuación de flujo se realiza mediante una técnica de volúmenes finitos. A partir del campo de velocidades se puede determinar el caudal que atraviesa el almacenamiento, teniendo en cuenta la sección del mismo.

Término Fuente: Se resuelve el conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias que determinan la evolución de la materia radiactiva contenida en el almacenamiento mientras se preserva la integridad de las barreras de ingeniería que lo confinan, así como la liberación de materia radiactiva a la geosfera. Dicha liberación depende del caudal de agua que atraviese el almacenamiento y de los coeficientes de solubilidad de la misma para los distintos isótopos, lo que determinará la cantidad máxima de cada uno de ellos que es capaz de disolver el agua subterránea.

Transporte de solutos: Se resuelve la ecuación diferencial de transporte en dos dimensiones espaciales, para cuya aproximación se utiliza una técnica de volúmenes finitos. Dentro de la ecuación se emplea el campo de velocidades obtenidas en el modelo de flujo anteriormente descrito. En este modelo se incorporan fenómenos de sorción no lineal.

El ejemplo que se presenta (figura 11 A) es un dominio bidimensional cuadrado de, constituido por tres transmisividades distintas (T_1 , T_2 , T_3). En un punto se sitúa un AGP. Resolviendo el módulo de flujo se obtiene la figura 11B, partiendo de una condición inicial de 25 m en AC y 0 m BD, y condiciones de contorno de flujo nulo

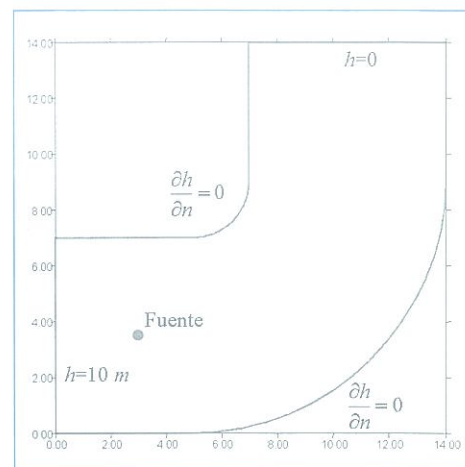
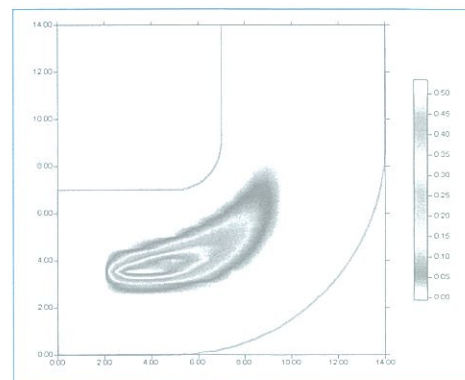


Figura 13 A.- Modelo conceptual (unidades en m).

Figura 13 B.- Distribución de la concentración de contaminante en el instante $t = 600$ s.



(Neumann homogéneas) en los lados AB y CD, altura impuesta (Dirichlet) de valor 25 m en el lado AC y altura nula en el lado BD.

En lo que se refiere al transporte de materia, las condiciones de contorno han sido de valor nulo en toda la frontera, y la condición inicial nula en todo el dominio. Se considera una inyección de materia radiactiva en el punto que se denota como AGP.

Modelos acoplados de Transporte Reactivo en la Geosfera

El objetivo general de esta línea de investigación es plantear el acoplamiento entre reacciones químicas, fenómenos de transporte de solutos y mecanismos de transferencia de calor. Los objetivos específicos de esta línea de investigación, que se desarrolla dentro del proyecto PETRA, proyecto cofinanciado por el CSN y ENRESA, en el que participan además CIEMAT y el Dpto. de Ingeniería del Terreno de la UPC, consisten en realizar, adaptar y verificar los modelos de transporte reactivo combinan aproximaciones tanto hidrogeológicas como geoquímicas para el tratamiento de los procesos de

[Pasa a la página 46]