

Enresa lanzó en 1994 el Proyecto Febex cuyos objetivos son la demostración de la viabilidad, en términos ingenieriles, el concepto de almacenamiento geológico profundo en granito y el desarrollo y validación de modelos numéricos capaces de simular el comportamiento a largo plazo de los procesos de tipo térmico, hidráulico, mecánico e hidrogeoquímico que tienen lugar tanto en la barrera de bentonita como en la roca próxima. Los resultados del ensayo, en el que participan 22 Entidades de ocho países, además de la UE, han superado las expectativas iniciales tanto en los objetivos tecnológicos como en los científicos.

# VIABILIDAD DE UN ALMACENAMIENTO GEOLÓGICO PROFUNDO EN GRANITO, DE RESIDUOS RADIATIVOS DE ALTA ACTIVIDAD

Fernando Huertas  
José Antonio Gago  
ENRESA

## El concepto de almacenamiento AGP

La política planteada por la Administración española para la gestión de los residuos de alta actividad establece, según se recoge en el Quinto Plan General de Residuos Radiactivos [1] (julio, 1999) que *“respecto a la gestión final, entre las diferentes soluciones propuestas y analizadas en foros nacionales e internacionales, la respuesta que actualmente cuenta con el mayor consenso, tanto desde el punto de vista técnico como de seguridad, es su almacenamiento en formaciones geológicas profundas”*.

Enresa, garante de dicha gestión, seleccionó y diseñó un concepto de referencia para el Almacenamiento Geológico Profundo (AGP) de los residuos de alta actividad en cada una de las formaciones geológicas consideradas como favorables: granito, sal y arcilla. Los principios básicos de selección del concepto AGP y los requisitos impuestos al diseño han sido ampliamente difundidos en informes y publicaciones técnicas de Enresa [2].

El concepto AGP-Granito define, de acuerdo con el estado actual de desarrollo científico y tecnológico, la mejor opción para aislar permanentemente del entorno humano los residuos de alta actividad producidos durante el funcionamiento de las centrales nucleares –fundamentalmente en el combustible gastado- y su ulterior desmantelamiento. En este contexto se entiende el almacenamiento definitivo como un sistema de eliminación definitiva de los residuos mediante su aislamiento en una instalación adecuada. El diseño de un sistema adecuado de aislamiento garantiza que, una vez clausurada y abandonada la instalación, no sea necesario ejercer ningún tipo de acción preventiva, correctora ni tomar medidas de mantenimiento o vigilancia.

Considerando como hipótesis una fase operacional de 40 años para las centrales nucleares, las previsiones de generación de residuos de alta actividad son las siguientes:

- 15.000 elementos de combustible equivalente del tipo PWR (reactores de agua a presión).
- 50 contenedores de vitrificados tipo *La Hague*, procedentes del repro-

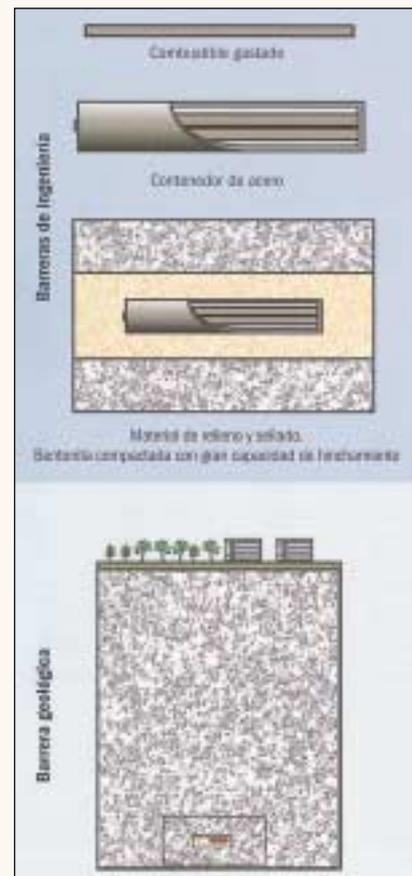
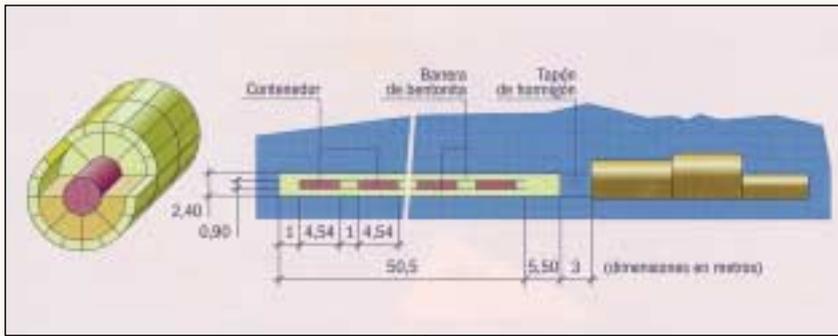


Figura 1. Sistema de barreras múltiples

cesado del combustible de la central nuclear Vandellós I.

[1] Quinto Plan General de Residuos Radiactivos. Ministerio de Industria y Energía. Julio, 1999.

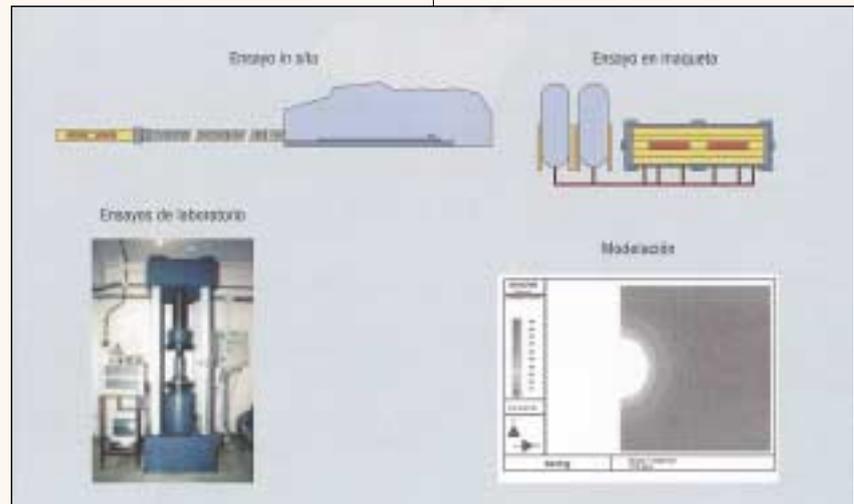
[2] Almacenamiento geológico profundo de residuos radiactivos de alta actividad (AGP). Conceptos preliminares y referencia. Enresa. Publicación Técnica 07/94.



- 4.200 m<sup>3</sup> de residuos de actividad media, no generadores de calor, que se originarán durante el desmantelamiento de las instalaciones nucleares.

El concepto AGP se fundamenta en un principio elemental de seguridad, que se utiliza frecuentemente en la ingeniería convencional y nuclear: la disposición en serie de distintas barreras que aseguran, individual o conjuntamente, la función de contención de los residuos. En el AGP el sistema de barreras múltiples (Figura 1) está constituido por tres barreras de Ingeniería (la forma fisicoquímica del residuo, la cápsula y los materiales de relleno y sellado), y una barrera natural (la formación geológica alojante).

El AGP-Granito [3] diseñado por Enresa contempla el almacenamiento de los residuos de alta actividad debidamente acondicionados en cápsulas de acero al carbono. Las cápsulas embebidas en bentonita rica en



montmorillonita, compactada a una densidad elevada, se disponen en galerías horizontales excavadas en una formación granítica a unos 500 metros de profundidad (Figura 2). Según este concepto, los 15.000 elementos de combustible equivalente se acondicionarían en 3.750 contenedores de acero al carbono (cuatro por contene-

Figura 2. Representación esquemática del AGP-Granito. Galería de almacenamiento

dor), disponiéndose en galerías horizontales de 2,4 m de diámetro. La longitud aproximada de galerías necesaria para almacenar todos los residuos asciende a unos 25 km, distribuidos en una superficie inferior a 1 km<sup>2</sup>.

Figura 3. Actividades consideradas dentro del proyecto Febex

## La demostración del concepto AGP

La verificación de la robustez de un concepto pasa por la realización de un ejercicio de demostración a escala y en condiciones lo más representativas de la realidad que razonablemente se puedan alcanzar. Consciente de ello Enresa, lanzó en 1994 el proyecto Febex (*Full Scale Engineered Barriers Experiment in Crystalline Rock*) cuyos objetivos son la demostración de la viabilidad del concepto en términos ingenieriles y el desarrollo y validación de modelos numéricos capaces de simular el comportamiento a largo plazo de los procesos de tipo térmico, hidráulico, mecánico e hidrogeoquímico que tienen lugar tanto en la barrera de bentonita como en la roca próxima. El

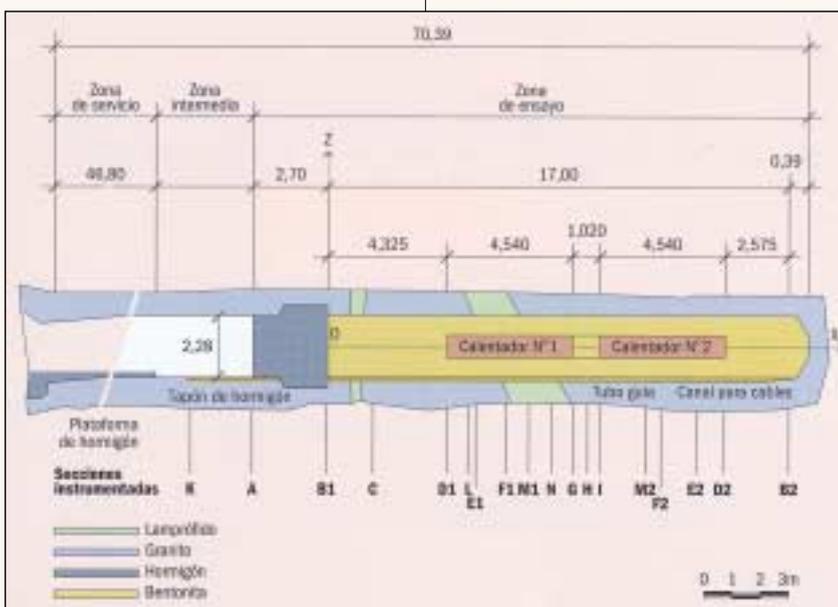


Figura 4. Proyecto Febex: representación esquemática del ensayo de calentamiento in situ

[3] Febex. Diseño final y montaje del ensayo in situ en Grimsel.

proyecto incluye una serie de actividades paralelas y complementarias, como son un ensayo en maqueta en condiciones controladas, un ensayo *in situ* en condiciones reales, diversos trabajos de laboratorio y el propio desarrollo y puesta a punto de los modelos numéricos (Figura 3).

El ensayo *in situ* del proyecto [3], reproduce, a escala 1:1 y en condiciones próximas a las reales, la realización práctica del concepto AGP-

Nagra gestiona en Grimsel (Suiza), pero se controla en su totalidad vía módem desde Madrid.

La instalación del ensayo se realizó en 1996, comenzando la fase de calentamiento en febrero de 1997, y ha estado funcionando de manera ininterrumpida y sin incidencias relevantes hasta la fecha (más de cinco años). Durante todo este tiempo, se ha generado un gran volumen de datos experimentales, que está ayudando a comprender el comportamiento de la barrera de bentonita frente a los procesos de tipo termo-hidro-mecánico (THM) que tienen lugar en el sistema y que está ayudando a poner a punto los modelos numéricos que simulan dichos procesos.

El proyecto es un experimento único en su género ya que aborda de forma integrada y a diferentes escalas los aspectos tecnológicos y científicos más relevantes de la Construcción y funcionamiento de un almacén

subterráneo de residuos. El proyecto ha despertado grandes expectativas en el ámbito internacional, siendo considerado como un referente en el sector. Una idea de la importancia de este proyecto y su relevancia internacional es que en la actualidad participan en el mismo 22 entidades de ocho países europeos. El proyecto *Febex* ha sido adjudicatario, por parte de la Comisión de la Unión Europea, en sus Programas marco IV y V (en curso), de dos contratos de financia-



Figura 5. El proyecto *Febex* ha demostrado que es factible construir la barrera de arcilla con una densidad seca especificada que permita conseguir la permeabilidad y presión de hinchamiento requeridas

ción parcial por un importe total de 5 millones de euros, que representan aproximadamente el 30% del coste total.

**Conclusiones preliminares y desmantelamiento parcial**

Del análisis de los resultados conseguidos hasta el presente se ha obtenido una serie de interesantes conclusiones [4].

Se ha demostrado la factibilidad de la construcción de las barreras de Ingeniería para el almacenamiento de los contenedores en galerías horizontales. Específicamente se ha demos-

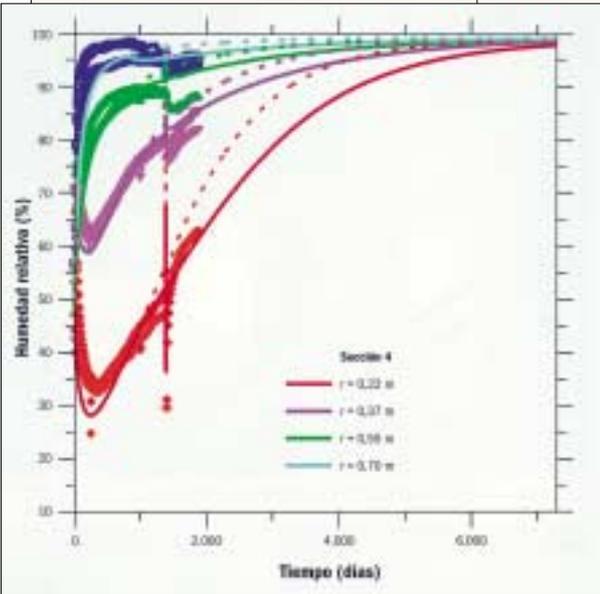
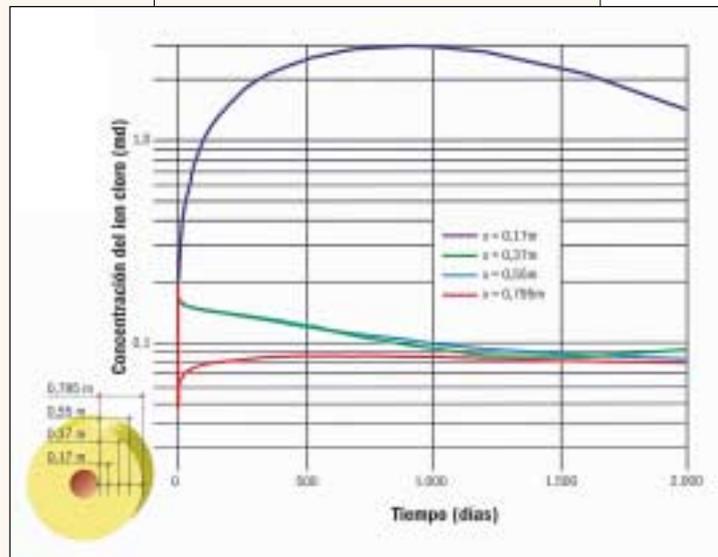


Figura 6. Predicción de la evolución de la humedad relativa en la barrera de arcilla (ensayo en maqueta)

Granito, sustituyendo en los contenedores los residuos por resistencias eléctricas que generan una potencia equivalente al calor residual de los elementos de combustible gastado. La configuración del ensayo se muestra en la figura 4. El ensayo está instrumentado con más de 600 sensores que miden en continuo la evolución de las variables representativas: temperatura, humedad, presión de poro, presiones totales y desplazamientos. El ensayo dispone también de indicadores químicos –trazadores conservativos y no conservativos- y testigos metálicos para estudiar procesos de corrosión. El ensayo se está realizando en el laboratorio subterráneo en granito que la agencia suiza

Figura 7. Predicción de la evolución de la concentración del ion cloro en la maqueta



[4] Full-scale engineered barriers experiment for a deep geological repository for high-level radioactive waste in crystalline host rock (*Febex project*). EUR 19147 EN. European Communities, 2000.

trado que es factible la fabricación y el manejo de bloques de bentonita a escala industrial, y que se puede construir la barrera de arcilla con una densidad seca especificada para conseguir la permeabilidad y presión de hinchamiento requeridas por la barrera (Figura 5)

El modelo numérico THM *Code-Bright*, desarrollado para el proyecto, es capaz de reproducir con aproximación razonable los resultados de las mediciones efectuadas en el ensayo (ambos *in situ* y maqueta) (Figura 6).

En el desarrollo de herramientas de cálculo y métodos de análisis termo-hidro-geoquímico (THG) se han hecho grandes progresos, tanto desde el punto de vista experimental como de modelado (Figura 7).

Tal como estaba previsto en la planificación del proyecto, el pasado año se procedió al desmantelamiento de uno de los calentadores del ensayo *in situ* (Figura 8) y al muestreo sistemático y exhaustivo de todos los componentes. Se han recuperado más de mil muestras entre el calentador, bentonita, roca alojante en contacto con la bentonita y sensores. El análisis de estas muestras está proporcionando una información concluyente sobre la veracidad de las mediciones que se han venido realizando durante los cinco años de operación, mediante el recalibrado de los sensores y la comparación entre los datos medidos y los resultados de análisis de muestras extraídas.

Tal y como se anticipaba, se ha podido comprobar, por ejemplo, el buen funcionamiento de la bentonita como material sellante, aun sin haber alcanzado la saturación total. La veracidad de esta afirmación se puede



comprobar en la figura 9, comparando el aspecto de una sección del ensayo recién instalada y tras cinco años de calentamiento e hidratación natural. Se observa que están cerrados todos los huecos que existían en el montaje, entre la barrera y la pared del túnel y entre rebanadas y bloques de la misma rebanada, debido al hinchamiento de los bloques por humectación, pero es diferenciable la zona más saturada de la más seca. Se aprecia claramente la influencia del tiempo en la observación del estado de la barrera de bentonita.

### Previsiones

El extraordinario funcionamiento del ensayo *in situ* esta superando, si cabe, las expectativas iniciales, tanto en cuanto a los objetos tecnológicos como a los científicos. Ante esta situación, y dado que el sector del ensayo no desmantelado sigue funcionando satisfactoriamente (la bentonita no ha sufrido alteraciones por relajación durante el desmantelamiento del primer calentador y tanto el segundo calentador como el resto

de los sensores están operativos) Enresa ha decidido prolongar la fase de hidratación y calentamiento del remanente del ensayo durante un tiempo adicional, cuya extensión vendrá en parte determinada por la vida de los componentes, fundamentalmente calentador y sensores. Una situación similar se da en el ensayo en maqueta con más del 85% de sus sensores operativos.

La decisión de prolongar el proyecto *Febex* el mayor tiempo posible se justifica por el hecho confirmado de que el tiempo es un parámetro muy importante en el conocimiento del comportamiento de la barrera de bentonita y, especialmente, en la validación de los modelos matemáticos de predicción del comportamiento THM y THG del sistema de barreras de Ingeniería y su interacción con la roca alojante.

### Reconocimientos

La realización del proyecto, bajo la dirección de Enresa, corresponde a Ciemat, Aitemin, UPC, ULC, UPM y CSIC-Zaidín.

Participan SKB, Clay Technology y VBB Viak, de Suecia; Andra, G3-S, INPL, Eurogeomat y BRGM, de Francia; Posiva y VTT, de Finlandia; Euridice GIE, de Bélgica; GRS y BGR, de Alemania; Nagra y PSI, de Suiza; y CEG-CTU, de la República Checa. El proyecto está subvencionado por la Comisión Europea bajo contrato FIKW-CT-2000-0016. ■

(De Estratos)



Figura 9. Comparación de una sección del ensayo recién instalada (izquierda) y tras cinco años de calentamiento e hidratación natural. Se observa que están cerrados todos los huecos que existían en el montaje.