

I Introducción y objetivos

I.1 Marco del trabajo y antecedentes

La energía atómica es aquélla que se libera como resultado de cualquier reacción nuclear y puede obtenerse bien por reacciones de fisión o por fusión. Éstas son reacciones que liberan una mayor cantidad de energía que las producidas en explosiones convencionales. Los reactores nucleares utilizan generalmente barras de uranio como combustible. Estas barras contienen núcleos fisiónables y pueden emplearse en un reactor nuclear para que en él se desarrolle una reacción nuclear de fisión en cadena. La energía eléctrica producida en centrales nucleares representa actualmente el 16 % de la producción mundial, Figura I.1. Actualmente existen un total de 440 reactores nucleares operativos en todo el mundo y de éstos 261 se encuentran en Europa Occidental y Estados Unidos, Figuras I.2 y I.3. Uno de los principales problemas de la utilización de estas formas de energía es la búsqueda de soluciones para almacenar y mantener aislados del ambiente los residuos resultantes del proceso de producción de energía. Los residuos se componen del combustible ya utilizado y que ha perdido su eficiencia para generar energía eléctrica debido a una disminución de su capacidad de generar reacciones de fisión. A pesar de resultar inútil para la producción de energía, el residuo se mantiene caliente y emitiendo radiaciones radioactivas durante mucho tiempo y representa un peligro potencial de contaminación para el medio ambiente. Estos residuos radiactivos de gran actividad pueden permanecer activos durante cientos y miles de años por lo que es necesario idear formas de almacenamiento y estudiar su comportamiento a largo plazo. Por estos motivos, la explotación de la fisión nuclear para la producción de energía requiere que se realicen avances en el problema de los residuos, especialmente en el problema de la aplicación industrial de soluciones técnicas para la gestión de los residuos de larga duración.

Actualmente, los elementos combustibles quemados de una central nuclear una vez descargados del reactor, son almacenados en piletas bajo agua para su decaimiento radiactivo y enfriamiento puesto que tienen alta actividad. Luego de un cierto tiempo, pueden permanecer en esas piletas o ser almacenados dentro de contenedores estancos de acero inoxidable en silos especiales de hormigón. Estos tipos de almacenamientos se consideran almacenamientos transitorios y actualmente se buscan e investigan soluciones para su almacenamiento posterior a largo plazo. Esta práctica es empleada en

todos los países implicados en la producción de energía nuclear. Cabe recordar que los elementos combustibles ya utilizados, y que hoy resultan ineficientes, representan un valioso recurso potencial para su futura reutilización como fuente de energía con el desarrollo de nuevas tecnologías.

Una de las propuestas más estudiada y aceptada como solución para el almacenamiento a largo plazo de los residuos de alta e intermedia actividad, es la construcción de depósitos subterráneos donde mantener el residuo aislado durante su vida activa. Los repositorios, o lugares de disposición final de los residuos, tienen por objetivo el aislamiento de los residuos de la biosfera y son sistemas diseñados utilizando el criterio de barreras múltiples. Se trata de barreras de ingeniería (hormigón, matrices vítreas, contenedores metálicos) y geológicas (formaciones rocosas adecuadas) independientes y redundantes de manera tal que la falla de una de ellas no comprometa la seguridad del sistema. Uno de los objetivos particulares de estos repositorios es evitar el contacto de los residuos con el agua y la contaminación de las aguas subterráneas. En este tipo de almacenamientos se construyen galerías subterráneas en profundidad (500 – 1000 m) donde se excavan nichos, horizontales o verticales, para almacenar el residuo, que constituyen la barrera geológica. El residuo se dispone en los nichos dentro de contenedores metálicos (canisters) que conforman una barrera física. Para rellenar el espacio que queda libre entre las paredes de la excavación y la pared metálica del canister se requiere de un material que constituya una verdadera barrera aislante, una barrera de ingeniería. Esta barrera debe confinar el canister y aislar el residuo evitando el flujo de contaminantes hacia el exterior de la barrera, Figura I.4.

A lo largo de los últimos 20 años, las agencias de los distintos países de la UE encargadas de estudiar la gestión de los residuos provenientes de la generación de energía atómica, han centrado su estudio en la búsqueda de soluciones para resolver el problema del almacenamiento en profundidad de estos residuos. Los distintos programas desarrollados tienen por objetivo optimizar y garantizar la validez de los sistemas diseñados y su comportamiento a largo plazo. Para ello es necesario conocer el comportamiento de cada uno de los componentes del sistema, así como del sistema en su conjunto. Los diferentes proyectos realizados incluyen extensos programas de laboratorio y ensayos a escala real. Estos ensayos permiten desarrollar modelos de comportamiento que permiten simular los distintos procesos que se producen en el

almacenamiento. Como procesos más importantes dentro de un almacenamiento se encuentran: la saturación de la barrera de ingeniería, el efecto de la corrosión del contenedor y la generación de gases, el flujo de calor a través de la barrera y su efecto en el medio geológico circundante, la liberación de radionucleidos y su incorporación al sistema hidrogeológico. Para poder validar y comprobar estos modelos de comportamiento es necesario conocer y caracterizar cada uno de los distintos procesos que ocurren en el almacenamiento y estudiar su interacción, así como la reacción de cada uno de los componentes de la barrera frente a ellos.

Las diferentes soluciones y formas de almacenamiento estudiadas varían entre sí en los siguientes aspectos:

- El tipo de formación rocosa utilizada para alojar el depósito, roca cristalina, arcillosa.
- El tipo de nicho construido, horizontal o vertical.
- El tipo de material utilizado en la barrera y en las formas de emplazamiento y sellado utilizadas para su construcción.

Como material utilizado en la construcción de la barrera de ingeniería, relleno entre el medio geológico circundante y el contenedor metálico, se han estudiado materiales constituidos mayoritariamente por bentonitas. Las bentonitas son minerales arcillosos pertenecientes al grupo de las esmectitas y su selección como material de relleno se debe fundamentalmente a las siguientes propiedades:

- Su baja permeabilidad que minimiza la movilidad del agua existente en ella.
- Su conductividad térmica que disipa el calor (principalmente en condiciones saturadas).
- Su capacidad de hinchamiento que sella las vías de acceso de agua y mejora el sellado del repositorio.
- Su superficie específica que otorga una gran capacidad para retener radionucleidos.

La Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) a través de su Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica, ha colaborado con varias de las agencias encargadas del estudio y gestión de residuos radiactivos de los distintos países de la UE. Agencias como ENRESA, ANDRA, NAGRA, SKB, SCK-CEN correspondientes a España, Francia, Suiza, Suecia y Bélgica respectivamente, han investigado diferentes propuestas para la construcción de este tipo de almacenamiento subterráneo.

La presente tesis doctoral resulta de los trabajos realizados por la UPC en el marco de su participación en el proyecto europeo Engineer Barrier Emplacement Experiment (Proyecto EB). El Proyecto EB, gestionado por ENRESA y donde también participa NAGRA, propone la construcción de un almacenamiento en profundidad en una formación geológica de roca arcillosa conocida con el nombre de Opalinus Clay. Formación que se encuentra en Mont Terri, Suiza (Thury & Bossart, 1999; AITEMIN, 2001a). En la galería del almacenamiento, se construyen nichos horizontales donde se alojan los contenedores metálicos (canister) con el residuo radiactivo. Como barrera aislante entre el contenedor metálico y la roca, se propone la utilización de una combinación de dos materiales: bloques de bentonita compactada y pellets de bentonita compactada (gránulos de alta densidad). Como antecedentes del proyecto nos encontramos con las ideas estudiadas en otros dos proyectos, el proyecto FEBEX, gestionado por ENRESA (2000) y el proyecto RESEAL (2000), gestionado por SCK-CEN. En el proyecto FEBEX, se propone la construcción de un depósito en profundidad realizado en una formación de roca granítica. El almacenamiento se realiza en nichos horizontales y como barrera aislante se utilizan bloques de bentonita compactada, Figura I.5. Dicho proyecto incluye la realización de un programa experimental para la caracterización del comportamiento Termo-Hidro-Mecánico de los bloques de bentonita y la realización de ensayos a escala real. En el caso del proyecto RESEAL se estudia el sellado de la excavación a partir de materiales de bentonita. Se realizan ensayos de campo y laboratorio utilizando dos materiales diferentes: bentonita francesa (FoCa Clay) y bentonita española (bentonita Febex). La utilización de estos materiales de bentonita, se realiza tanto en forma de bloques compactados como utilizando una mezcla de pellets y polvo. Finalmente, vale la pena mencionar otros conceptos como el estudiado por SKB en Äspö (AITEMIN, 1999), en donde se estudia el uso de una

mezcla de granito y bentonita MX80 en proporciones de masa seca 70% y 30% como material para el sellado en el aislamiento del residuo.

I.2 El proyecto EB

El Proyecto EB propone un nuevo concepto en la construcción de depósitos en profundidad para el almacenamiento de residuos radiactivos. Tomando como punto de partida las ideas desarrolladas en los proyectos FEBEX y RESEAL, el Proyecto EB propone el almacenamiento de los residuos en nichos horizontales y la construcción de una barrera aislante realizada utilizando una combinación de dos materiales: bloques y pellets de bentonita compactada. Una base formada de bloques de bentonita compactada y una mezcla de pellets de bentonita para completar la parte superior de la barrera, Figura I.6. La base de bloques permite posicionar el canister mientras que la utilización de un material granular en forma de pellets permite la mecanización de las operaciones de transporte y emplazamiento del material. Ambos materiales se construyen a partir de bentonita Febex.

El Proyecto EB se compone de una serie de tareas que se pueden agrupar en dos actividades fundamentales: la realización de un ensayo a escala real (AITEMIN, 2001a; NAGRA, 2003; Mont Terri Project, 2000) y la caracterización del comportamiento hidro-mecánico del material (HM) a partir de un programa de ensayos de laboratorio realizado por la UPC. Ambas actividades convergen en la interpretación del ensayo a escala real realizado a partir de tareas de modelación numérica. Las tareas y actividades desarrolladas en el proyecto se presentan en la Figura I.7. Debido a la poca cantidad de agua disponible en la roca que aloja el depósito (Bossart, 1999; Pearson *et al.*, 2002) y para lograr alcanzar la saturación de la barrera en tiempos razonables se dispuso de un sistema de inyección de agua adicional. Este sistema está formado por tubos longitudinales conectados entre si, a través de los cuales se inyecta agua desde el exterior del nicho en condiciones controladas, Figura I.8, (AITEMIN, 2001b). El objetivo fundamental del Proyecto EB es demostrar la viabilidad de la utilización de pellets de bentonita compactada como material para la construcción de una barrera aislante. La utilización de este material está impulsada por dos razones: en primer lugar la gran cantidad de información existente sobre la bentonita que compone los pellets, bentonita FEBEX, y en segundo lugar por ciertas ventajas operativas y de funcionamiento de la barrera:

- La posible mecanización de las operaciones de transporte y emplazamiento del material utilizando la tecnología proveniente del transporte y manejo de granos.
- Se trata de un material que se compacta por caída gravitacional y que no necesita la utilización de una compactación mecánica, la cual podría dañar el contenedor metálico (canister) que contiene el residuo.
- Permite lograr un mejor contacto entre el contenedor metálico (canister) que aloja el residuo con el medio circundante.
- Se obtiene un mejor llenado de las irregularidades del nicho de almacenamiento y la disminución de la presencia de huecos (gaps) entre la parte superior del relleno y el techo de la excavación.

I.3 Objetivos de la Tesis Doctoral

Los trabajos realizados por la UPC en el marco del Proyecto EB representan la base DE esta tesis doctoral. Estos trabajos se llevaron adelante de forma gradual y en estrecha interacción con las restantes actividades del proyecto. La necesidad de definir las características óptimas del material a utilizar en el ensayo a escala real, así como definir el diseño del sistema de inyección de agua y el sistema de adquisición de datos, determinaron que estos trabajos se organizaran en tres etapas diferentes:

- Una primera etapa en la que se realizaron ensayos preliminares sobre distintas muestras preparadas a partir de pellets de bentonita. El objetivo de esta primera etapa es el de diseñar y seleccionar la curva granulométrica óptima del material y caracterizar la estructura interna del material a utilizar. Como resultado de esta etapa se obtiene la caracterización del material utilizado y se define una metodología adecuada para la caracterización del comportamiento hidromecánico del material.
- Una segunda etapa, que se centró en la caracterización del comportamiento hidromecánico de las mezclas de pellets de bentonita. Se realizaron distintos ensayos de laboratorio y se investigó el comportamiento hidromecánico del material en estado saturado y no saturado. A lo largo de los distintos ensayos se simulaban las distintas condiciones de hidratación existentes en el ensayo a escala real (emplazamiento de la barrera). Como resultado de estos trabajos se

obtienen las características fundamentales del comportamiento del material durante el proceso de hidratación.

- Finalmente, se plantearon un marco conceptual y un modelo constitutivo adecuados para la interpretación del comportamiento observado. Se implementó el modelo en un código de diferencias finitas y se reprodujeron los aspectos fundamentales de la respuesta del material. Como resultado de esta etapa se obtiene una herramienta numérica que resulta útil, tanto en la interpretación del comportamiento del material observado como en la predicción del comportamiento a observar.

De forma adicional a estos tres grupos de trabajos se realizó una serie de ensayos de pequeña escala en los que se simularon distintas situaciones de hidratación. La idea fundamental de estos ensayos fue la de estudiar la respuesta del material en muestras con un tamaño medio, sometidas a distintos procesos de mojado por inyección de agua.

De acuerdo con los trabajos realizados en las diferentes etapas de la tesis doctoral, se identifican tres grupos de objetivos:

- Desarrollar una metodología de trabajo adecuada para el estudio y caracterización del comportamiento hidromecánico de materiales expansivos, tanto en estado saturado como en no saturado. Esto incluye la puesta a punto de técnicas experimentales, equipos de laboratorio y la selección de los ensayos que resultan más representativos de las condiciones de utilización del material.
- Caracterizar el comportamiento hidromecánico de las mezclas de pellets de bentonita compactada a lo largo del proceso de hidratación. Identificar los factores que resultan más determinantes en la respuesta del material sometido a las diferentes condiciones de hidratación existentes en la barrera.
- Desarrollar un marco conceptual y un modelo constitutivo adecuados para la interpretación y reproducción de los comportamientos observados en las mezclas de pellets de bentonita compactada.

I.4 Estructura de la Tesis

La estructura de la Tesis Doctoral se organiza en una “Introducción y objetivos”, diez capítulos y una serie de anexos.

En el primer capítulo, “Características fundamentales del material utilizado”, se describen las propiedades geotécnicas básicas de la bentonita utilizada en el proceso de fabricación de los pellets. Esta bentonita (bentonita FEBEX), proviene del yacimiento del Cortijo de Archidona ubicado en Almería, España. Se describe el proceso de fabricación de los pellets, sus características y su estructura interna. Finalmente se estudian las características de la estructura interna de las mezclas de pellets y su evolución con el grado de compactación.

En el segundo capítulo, “Técnicas de medida y control de la succión y equipo experimental”, se describen las técnicas experimentales, sus capacidades y aplicación en el estudio del comportamiento de los suelos no saturados, así como los diferentes equipos de laboratorio y sus prestaciones.

En el tercer capítulo, “Metodología y programa experimental”, se describe el programa de ensayos a realizar, los procedimientos y la información que se obtiene de cada uno de los ensayos.

En el cuarto capítulo, “Resultados experimentales”, se presentan los resultados obtenidos separados en tres secciones diferentes. Una primera sección dedicada a la descripción de la evolución de la conductividad hidráulica, la capacidad de almacenamiento de agua del material y su evolución con el grado de saturación. Una segunda sección, en la que se presentan las características del comportamiento de expansión, hinchamiento y compresibilidad del material y su evolución con la succión. Finalmente, se presentan los resultados obtenidos a lo largo de ensayos de mojado a volumen y carga constante utilizando diferentes gradientes de inyección de agua líquida.

En el capítulo cinco, “Marco conceptual y modelo constitutivo para materiales expansivos”, se describen los elementos del marco conceptual utilizado para la descripción del comportamiento de materiales expansivos estructurados, y se presenta la formulación de un modelo constitutivo de doble estructura aplicado al caso de mezclas de pellets de bentonita compactada.

En el capítulo seis, “Implementación del modelo”, se presenta la implementación del modelo descrito utilizando la técnica de las diferencias finitas y en el capítulo siete, “Deducción de parámetros y comportamiento previsto por el modelo”, se describen los parámetros del modelo, su significado y se propone una metodología para su deducción. Se muestran también los comportamientos previstos por el modelo mediante distintos ejemplos.

En el capítulo ocho, “Comparación entre el comportamiento real y el previsto por el modelo”, se presenta la comparación entre los resultados reales y los previstos por modelo para distintos ensayos de laboratorio. Adicionalmente se plantean algunas interrogantes sobre el acoplamiento entre los distintos niveles estructurales previsto por el modelo.

En el capítulo nueve, “Columna de infiltración”, se presentan los resultados obtenidos en la serie de ensayos de mediana escala, realizados utilizando el equipo de columna de infiltración. En estos ensayos se estudia la respuesta del material durante la inyección de agua, considerando condiciones similares a las del emplazamiento real y muestras de tamaño medio.

Finalmente en el capítulo diez, se incluye un “Resumen, conclusiones y líneas de trabajo futuras”. En primer lugar se presenta un resumen de los trabajos realizados a lo largo de la tesis. En segundo lugar se presentan las conclusiones de la tesis en tres grupos: un primer grupo referido a la metodología de trabajo utilizada, un segundo grupo que refiere a los resultados experimentales y un tercer grupo que analiza el marco conceptual y el modelo constitutivo. Finalmente se presentan algunas recomendaciones y sugerencia para trabajos futuros.