

ESTUDIO DE LA BENTONITA FEBEX, SOMETIDA A LAS CONDICIONES DE UN ALMACENAMIENTO GEOLÓGICO PROFUNDO

R. GÓMEZ ESPINA Y M.V. VILLAR GALICIA

CIEMAT, Avd. Complutense 22, 28040 Madrid, España.

INTRODUCCIÓN

La opción internacionalmente más aceptada para la eliminación de los residuos radiactivos de alta actividad, es su almacenamiento en formaciones geológicas a gran profundidad. La seguridad de este concepto está basada en la existencia de una serie de barreras naturales y artificiales superpuestas que garantizan el aislamiento del residuo. Entre las últimas se encuentra al material de sellado, que se coloca entre el contenedor de residuos y la roca almacén. El material de sellado generalmente considerado para almacenamiento en rocas graníticas o arcillosas es la bentonita, un material arcilloso constituido fundamentalmente por esmectita que se caracteriza por su baja permeabilidad, elevada capacidad de hinchamiento, elevada capacidad de intercambio catiónico y plasticidad. El concepto español para almacenamiento geológico profundo (AGP) –desarrollado a partir de 1990– considera el uso de bloques de bentonita compactada a densidad seca $1,65 \text{ g/cm}^3$ como material de sellado (Fig. 1) (ENRESA 1995).

Las condiciones de la barrera de bentonita en un AGP se simulan en el laboratorio mediante ensayos en los que bloques de bentonita compactada se introducen en celdas herméticas e indeformables en las que puede crearse un gradiente térmico a la vez que la bentonita se hidrata por la zona fría. Los ensayos se prolongan durante periodos de tiempo diferentes al final de los cuales se realiza un estudio detallado de las propiedades de la bentonita: densidad, humedad y geoquímica en diferentes posiciones. Estos estudios aportan información sobre la distribución de temperatura, densidad y humedad dentro de la arcilla, los cambios mineralógicos y geoquímicos producidos, la generación y evolución de frentes salinos y la variación de propiedades hidro-mecánicas de la bentonita (Villar *et al.* 1996, 2005; Cuevas *et al.* 2002).

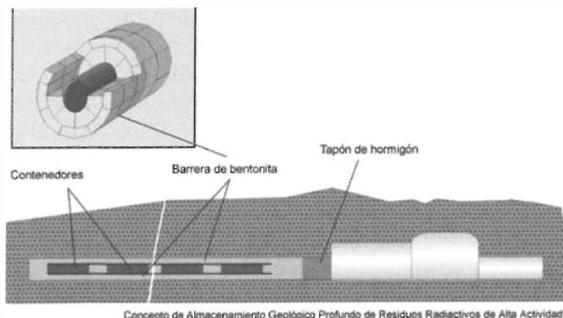


Figura 1: Esquema de AGP.

MATERIAL

La bentonita seleccionada según el concepto español de AGP, es la denominada bentonita FEBEX (ENRESA, 2000). Este material proviene del yacimiento de Cortijo de Archidona, en Almería, perteneciente a la región volcánica del Cabo de Gata. Tras la extracción en cantera del material, este sufre un primer proceso de homogeneización y secado al aire, y en un segundo paso se desmenuza, se seca en horno a 60°C y se criba, obteniéndose finalmente un material de un tamaño inferior a 5 mm. Una vez almacenada la muestra, su humedad higroscópica se estabiliza entorno al 14%. Sus principales características físico-químicas son la presencia Ca^{2+} como principal catión de cambio (38%). Otros cationes presentes son el Mg^{2+} (28%), Na^+ (23%) y K^+ (2%), con una capacidad total de cambio catiónico de $111 \pm 9 \text{ meq/100 g}$. El límite líquido de esta bentonita es de $102 \pm 4 \%$ y el límite plástico $53 \pm 3 \%$, con un índice de plasticidad de $49 \pm 4 \%$. El peso específico de las partículas sólidas, determinado mediante picnómetro, es $2,7 \text{ g/cm}^3$. (Villar, M.V. 2000)

ENSAYO

Dentro de los múltiples exámenes realizados a la bentonita FEBEX en el CIEMAT, se presenta a continuación los estudios de caracterización llevados a cabo en el ensayo denominado CG-3 (Fig. 2). Este ensayo es la continuación de una serie de ellos de iguales características y ya finalizados, programados para una duración de 6, 12 y 24 meses (Villar *et al.* 2005, Martín, M. 2002).

En ellos, se utiliza una celda cilíndrica de 60 cm de altura y diámetro interior de 7 cm, fabricada en teflón para evitar una conducción lateral del calor elevada y cubierta por piezas de acero para impedir la deformación. Se introducen en ella 6 bloques de bentonita compactada a $1,65 \text{ g/cm}^3$, con una longitud de 10 cm y 7 cm de diámetro, ocupando todo el volumen interior de la celda. Los bloques se fabrican con la humedad higroscópica de esta bentonita. En la base de la celda, se coloca un calentador en contacto directo con la bentonita, a una temperatura de 100°C y por arriba se fuerza una circulación de agua a 30°C , se genera por tanto un gradiente a lo largo de la columna de bentonita de aproximadamente $1,1^\circ/\text{cm}$. Por la parte superior de la celda, se inyecta un agua de origen granítico, con una presión de 1,2 MPa. Con este diseño, se pretende simular las condiciones reales en un AGP, por un lado, el calor generado por el residuo y por otro, la llegada de

agua procedente del macizo rocoso, que por ser este granítico, se optó por usar este tipo de agua. La longitud de la celda, también se corresponde con la de la barrera de bentonita en el AGP.

La duración de este ensayo, desde su montaje hasta su desmantelamiento, ha sido de seis años y medio, no existiendo otros de tan larga duración. Las medidas tomadas durante este periodo fueron del volumen de agua introducido en la celda, mediante un medidor externo de cambio de volumen. Una vez desmontado el ensayo, los bloques fueron cortados en 24 secciones cilíndricas de 2,5 cm de espesor, para realizar diferentes determinaciones en cada una de ellas. De cada sección se realizó una medida de la densidad y del contenido en agua. Otras técnicas realizadas han sido difracción de rayos X sobre superficie plana de la muestra y medida de la superficie específica BET. Asimismo, están en realización o pendientes de esta, otras pruebas como la medida de la capacidad de hinchamiento, difracción de rayos X en agregados orientados y en polvo, preparación de láminas delgadas para microscopio de transmisión, microscopio electrónico de barrido, determinación de las sales solubles y de los cationes de cambio.

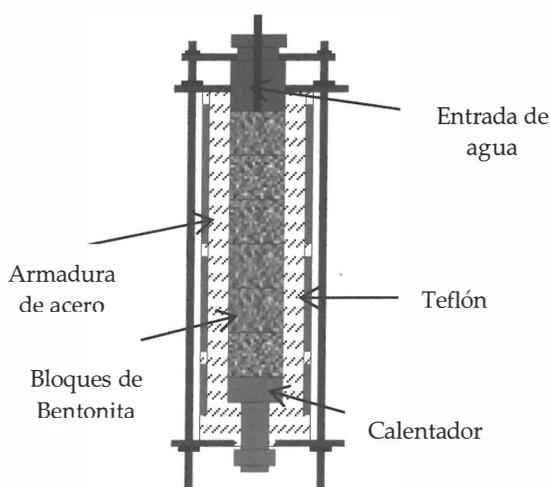


Figura 2: Esquema de la celda.

MEDIDAS Y RESULTADOS

Para obtener una visión de la temperatura alcanzada en las diferentes partes de la columna de bentonita, se presenta una gráfica de las temperaturas alcanzadas en función de la distancia al calentador. Estos datos fueron obtenidos en los ensayos similares previos, pero que a diferencia de este, llevaban sensores de temperatura y humedad. Los datos obtenidos para los 3 periodos de tiempo se ajustan bien. La temperatura decrece de 100° a 50° C en los primeros 10 cm de la celda. Se observa también una disminución de la temperatura con la saturación (en el ensayo de mayor duración respecto a los otros), especialmente en zonas más húmedas, esto es debido a una mayor disipación del calor por la arcilla húmeda (Villar *et al.* 2005).

Humedad (w): Estos resultados van acordes con los obtenidos para la densidad seca. Su determinación se ha realizado por el método de diferencia de pesada antes y después de pasar 24 horas por la estufa a 110° C. Este parámetro se define como la relación entre el peso de agua perdida y el peso de suelo seco, expresado en porcentaje. Los valores obtenidos se representan en la Fig. 4, la cual nos permite ver la lógica disminución de la humedad desde la zona de hidratación hacia la zona del calentador.

Como ya se indicó, la humedad inicial de la columna de bentonita estaba en torno al 14%, valores similares se alcanzan al desmontar la celda a unos 6 cm del calentador. En las dos secciones más próximas al calentador, este valor disminuye, alcanzando el 9,3 % en la zona más inmediata a este. Por el contrario, hacia la zona de hidratación, la humedad aumenta de forma continuada, hasta alcanzar el 34,6 %.

Densidad seca (ρ^d): Se define como la relación entre el peso de la muestra seca y su volumen antes del secado. Su cuantificación se realiza por inmersión de la muestra en mercurio y pesada de la cantidad de este desalojado, hallando así el volumen de la muestra. Posteriormente se seca la bentonita en estufa a 110° C, obteniéndose su peso seco. Con ambos datos se calcula la densidad seca.

Los resultados (Fig. 4) señalan un aumento considerable en la zona adyacente al calentador, debido a la retracción por pérdida de agua que sufre la bentonita con el calentamiento. Teniendo en cuenta que la densidad inicial de los bloques de bentonita era de 1,65 g/cm³, el entorno de unos 4 cm aproximadamente en la zona del calentador, es el único que ha sufrido un aumento de densidad, siendo



Figura 3: Aspecto de la bentonita tras el ensayo.

además considerable (1,84 g/cm³). En zonas un poco más alejadas, a unos 6 cm, se mantiene prácticamente la densidad inicial, disminuyendo gradualmente, a medida que nos acercamos a la zona de hidratación, alcanzando en esta su valor mínimo, 1,41 g/cm³. Esta evolución se debe al hinchamiento que sufre la esmectita al adsorber agua, y como se indica en la sección anterior, la concentración de agua disminuye paulatinamente desde la zona de hidratación al calentador, generándose por tanto un mayor hinchamiento en las zonas más húmedas y la consiguiente disminución de la densidad seca.

Difracción de rayos X sobre la muestra inalterada y sin secar: Mediante esta técnica, se pretendía obtener una visión del efecto producido por el tratamiento termo-hidráulico sobre los espaciados basales, lo que permite tener una idea de la distribución del agua en la microestructura. Para ello, se practicó la difracción sobre superficies suficientemente planas de la muestra sin alterarla, esto es, con la humedad que tenían al finalizar el ensayo y sin realizar cortes que afectasen a su estructura. El análisis se realizó en un difractómetro Philips X'Pert-MPD, parte de las muestras se rodaron de 0,2 a 10[° 2 θ] y el resto entre 0,2 y 30[° 2 θ]. La intensidad de los picos obtenidos no es muy elevada debido a la presentación realizada de la muestra, pero es sufi-

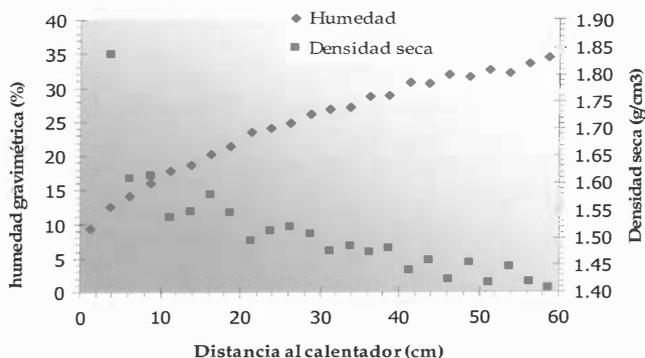


Figura 4: Variación de la densidad y contenido en agua de la columna de bentonita.

ciente para identificar el pico de mayor intensidad de la esmectita y comparar la variación del espaciado en el eje c de esta fase mineral, a lo largo de la celda. Los resultados, representados en la Fig. 5, muestran una clara tendencia a la disminución del espaciado basal, desde la zona más húmeda, próxima a la hidratación, a medida que nos acercamos a la zona más seca.

Superficie BET: Los análisis para la superficie específica externa BET, se realizaron en un porosímetro de adsorción de nitrógeno modelo Gemini V, de Micromeritics. Para ello, hay que preparar la muestra calentándola en estufa a 90° C, por lo que el efecto del agua en el volumen de la esmectita se pierde. El valor obtenido para la bentonita FEBEX, sin someter a ningún tratamiento, está en el rango de 51,6 - 53,3 m²/g. En la Fig. 6 están representados los datos obtenidos para cada porción de la celda. Se advierte en general, una disminución de la superficie específica de la bentonita del ensayo respecto a la bentonita de partida, salvo en secciones puntuales, donde se mantienen valores similares. Se puede apreciar una mayor tendencia a la disminución de la superficie BET hacia zonas más calientes de la celda. Las muestras de cada sección se han analizado por duplicado, los resultados conseguidos para una misma sección se repiten bastante bien, sin embargo, se obtienen valores dispersos entre secciones contiguas, que bien podrían ser explicados por la disolución o formación de cristales. A falta de otras técnicas a realizar, como el microscopio electrónico de barrido o difracción de rayos X mediante el método del polvo, no se puede confirmar la presencia de precipitados neoformados que alteren este parámetro.

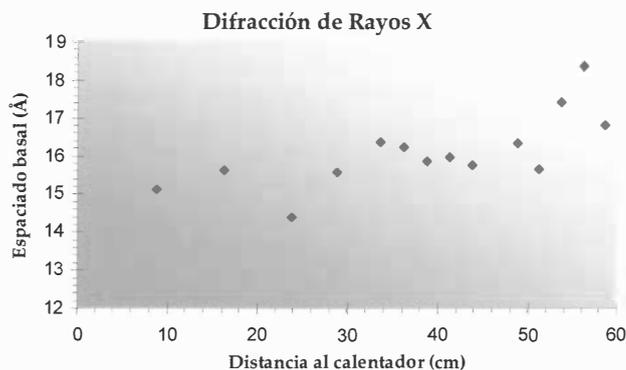


Figura 5: Variación del espaciado basal de la Esmectita, obtenido por difracción de rayos X.

CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN

La larga duración del ensayo, pone de manifiesto la lentitud en la saturación de esta bentonita, esto es debido a la baja permeabilidad, propiciada por la compactación a alta densidad y a su capacidad de hinchamiento. Esta capacidad queda reflejada en la notable pérdida de densidad que sufre la muestra en las zonas más húmedas. Es de destacar la buena capacidad de sellado que posee este material, tras desmontar la celda se comprobó que todos los bloques se habían fusionado en una sola pieza, como se puede ver en la Fig. 3. A falta de concluir ciertos análisis y de la realización de otros, en la parte geoquímica se espera ver la evolución de estos procesos, con relación a los determinados en los ensayos previos. Los procesos más importantes observados fueron: el transporte de sales solubles, la reacción de intercambio de Na⁺ por el Ca²⁺ y la disolución-precipitación de calcita (Martín. 2002).

REFERENCIAS

Cuevas, J.; Villar, M.V.; Martín, M.; Cobeña, J.C. & Leguey, S. (2002). Applied Clay Science 22 (1-2): 25-38.
 ENRESA (1995). Almacenamiento geológico profundo de residuos radiactivos de alta actividad (AGP). Diseños conceptuales genéricos. Publicación técnica, 11/95.
 ENRESA (2000). Full-scale engineered barriers experiment for a deep geological repository for a high-level

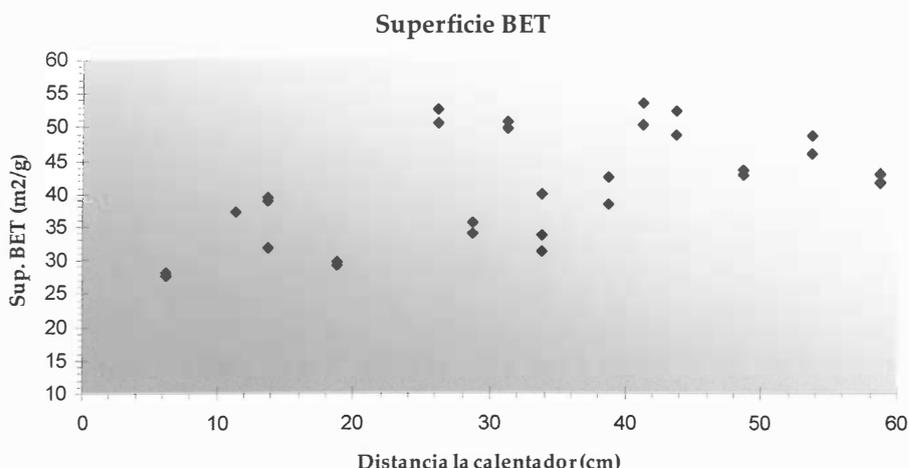


Figura 6: Distribución de la superficie específica BET, según su distancia al calentador.

- radioactive waste in crystalline host rock (FEBEX proyect). Nucl. Sci. technol. Ser., EUR 19147. Commission of the european communities Louxembourg.
- Martín, M. (2002). Procesos geoquímicos y modificaciones texturales en bentonita FEBEX compactada sometida a un gradiente termohidráulico. Tesis doctoral. Universidad Autónoma de Madrid. 211.
- Villar, M.V.; Cuevas, J. y Martin, P.L. (1996).. Eng. Geol. 41: 257-267.
- Villar, M.V. (2000). Caracterización Termo-hidro-mecánica de una bentonita de Cabo de Gata. Tesis doctoral. Universidad Complutense de Madrid.
- Villar, M.V., Martín, P.L. y Barcala, J.M. (2005). Eng. Geol. 81: 284-297.