

# Determinación de las Propiedades de Transporte de Gas en Bentonita

/ VANESA GUTIÉRREZ-RODRIGO (\*), MARÍA-VICTORIA VILLAR-GALICIA, PEDRO-LUIS MARTÍN-MARTÍN, FRANCISCO J. ROMERO-ÁLVAREZ

(1) CIEMAT, Departamento de Medio Ambiente, Avd. Complutense 40, 28040 Madrid (España)

## INTRODUCCIÓN

El diseño de los almacenamientos de residuos radiactivos de alta actividad en formaciones geológicas profundas incluye una serie de barreras naturales y de ingeniería situadas alrededor de los contenedores que contienen dichos residuos con el fin de mantenerlos aislados de la superficie.

Los materiales escogidos para el sellado de los contenedores son arcillas de naturaleza bentonítica debido a sus características, entre las cuales cabe destacar las propiedades de retención de este tipo de arcilla, su elevada capacidad de hinchamiento y su baja permeabilidad.

El comportamiento de los almacenamientos de residuos radiactivos de alta actividad queda determinado, en gran medida, por las características del diseño y la construcción de las barreras de ingeniería, y especialmente, por los cambios que puedan suceder en las propiedades mecánicas, hidráulicas y geoquímicas como resultado de los efectos combinados del calor generado por la desintegración de los residuos radiactivos y el aporte de agua y solutos de las rocas circundantes. Uno de los procesos que pueden tener lugar y que son el objeto principal de este estudio es la generación de gases en el entorno de los residuos y su transporte a través de las barreras. Por lo tanto, es de primordial importancia la perfecta compresión y la adecuada cuantificación de los procesos que tienen lugar en el entorno próximo al almacenamiento para su correcta evaluación a largo plazo.

Sin embargo, el rendimiento del almacenamiento en todo su conjunto, y en particular, las propiedades del transporte de gas a través de las

barreras y la roca encajante no se conocen todavía suficientemente. Por lo tanto, es fundamental evaluar cuantitativamente la generación y migración del gas en los almacenes.

En este estudio se ha evaluado el impacto que tiene la permeabilidad al gas de muestras de bentonita de diferentes densidades y humedades.

## MATERIAL

Existen diversos materiales propuestos para la formación de la barrera de bentonita en un almacenamiento geológico profundo. Uno de los materiales más caracterizados y el utilizado para realización de los ensayos incluidos en este trabajo es la bentonita FEBEX procedente del yacimiento del Cortijo de Archidona (Almería) perteneciente a la región volcánica del Cabo de Gata. Se trata de un material constituido mayoritariamente por montmorillonita y con una humedad higroscópica del 14%. Cuando se compacta a densidad seca de 1,6 g/cm<sup>3</sup> su conductividad hidráulica es 5·10<sup>-14</sup> m/s y su presión de hinchamiento 6 MPa (ENRESA, 2006).

## METODOLOGÍA

En los experimentos realizados en el laboratorio se calculó la permeabilidad al gas de diferentes muestras de bentonita FEBEX compactada (Villar et al., 2011). Para ello, varios días antes de la compactación, la bentonita granular se mezcló con diferentes cantidades de agua desionizada para obtener especímenes con humedades comprendidas entre el 18 y 22%. Se obtuvieron muestras cilíndricas de 3,8 cm de diámetro y 7,8 cm de altura por compactación uniaxial a partir de bentonita húmeda. Las presiones de compresión aplicadas estuvieron comprendidas entre 30 y 152 MPa para

muestras con densidades entre 1,4 y 1,8 g/cm<sup>3</sup> correspondientes a grados de saturación entre el 62 y 97%.

El sistema utilizado para la toma de datos se compone de una celda triaxial en la que se introduce la muestra enfundada en una membrana impermeable. Se aplica una presión de confinamiento a la celda, que previamente se ha rellenado de agua. En la parte superior de la probeta se aplica una presión de gas (presión de inyección) y una presión menor en la parte inferior (presión en cola). Los caudalímetros situados a la entrada y salida de la celda permiten medir los flujos de gas a la entrada y a la salida de la muestra. Como fluido se ha usado el nitrógeno. Durante los experimentos se monitorizaron flujos y presiones de gas. Las presiones de confinamiento utilizadas se encuentran entre 0,6 y 1,2 MPa, y las presiones de inyección entre 0,2 y 0,8 MPa.

En este caso, las muestras no estaban completamente secas, y por lo tanto, las medidas obtenidas a partir de los experimentos no son válidas para el cálculo de la permeabilidad intrínseca. De hecho, para la obtención de muestras completamente secas habría que someterlas a temperaturas superiores a 110°C lo cual produciría cambios en la microestructura de la bentonita y, consecuentemente, en las propiedades hidráulicas de ésta.

Por tanto, a partir de los valores de flujo medidos se obtiene la permeabilidad efectiva, que es el producto entre la permeabilidad intrínseca medida con flujo de gas,  $k_{ig}$ , y la permeabilidad relativa al gas,  $k_{rg}$ .

Para el cálculo de esta permeabilidad, a partir de las medidas de salida de flujo de gas a través de las muestras, se aplica la ecuación para medios

**palabras clave:** Bentonita, Permeabilidad al gas, Humedad, Densidad

**key words:** Bentonite, Gas permeability, Water content, Density

incomprensibles con fluidos intersticiales compresibles de Scheidegger (1974).

Al final de los ensayos, las muestras de bentonita se midieron y pesaron, y se determinó su humedad en tres niveles diferentes de los cilindros. Las diferencias de humedad a lo largo de la probeta fueron menores del 0,4%.

**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Se han realizado medidas de permeabilidad al gas en muestras de bentonita compactadas a diferentes humedades y densidades. Las presiones aplicadas durante los experimentos estaban muy por debajo de la presión de hinchamiento.

Se pudo comprobar que para una muestra dada el flujo de gas a la entrada y la salida era igual, y por lo tanto, la permeabilidad intrínseca ( $k_{ig} \cdot k_{rg}$ ) calculada es la misma tanto si se utiliza el flujo de entrada como si se utiliza el de salida.

Existe una notable influencia de la densidad seca en los valores de permeabilidad calculados, disminuyendo estos últimos en 3 órdenes de magnitud cuando la densidad seca aumenta de 1,5 a 1,8 g/cm<sup>3</sup> para muestras con humedad semejante. En cuanto al efecto del contenido en humedad en las muestras, este no resultó muy patente porque el rango de humedades escogido es muy limitado. Aún así, se observa que el incremento de humedad en las muestras causa también un decrecimiento en los valores calculados de permeabilidad (Fig. 1).

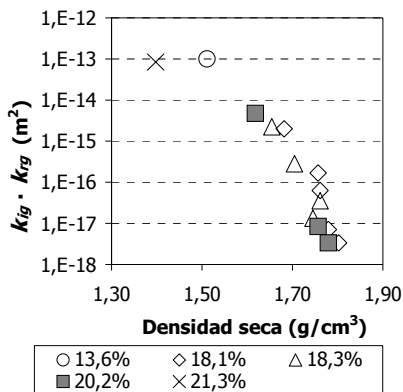


fig 1. Valores de permeabilidad para diferentes humedades (%) en función de la densidad seca de cada una de las muestras de bentonita.

Los resultados de permeabilidad al gas

obtenidos en este trabajo se compararon con los obtenidos en muestras de bentonita FEBEX pero con grados de saturación inferiores y que se midieron con una metodología diferente en la que se aplican presiones de inyección más bajas (Villar & Lloret, 2001). Los nuevos resultados obtenidos con las muestras más saturadas son correlacionables con los obtenidos con muestras menos saturadas tal y como se muestra en la Fig. 2, donde e es el índice de poros y  $S_r$  el grado de saturación en tanto por ciento, a partir de los cuales se determina la porosidad accesible (Ec. 1).

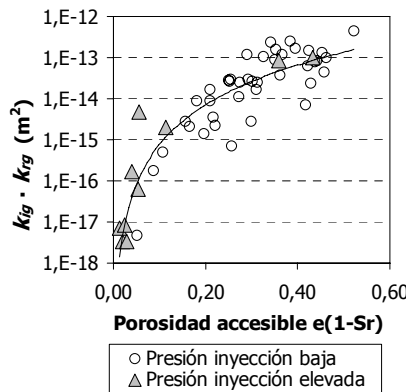


fig 2. Permeabilidad en función de la porosidad accesible para las muestras de bentonita estudiadas durante los proyectos FEBEX (presiones de inyección bajas) y FORGE (presiones de inyección elevadas).

Si en la ecuación (1), la cual relaciona la permeabilidad efectiva y la porosidad accesible, se iguala a 0 el grado de saturación, se obtiene el valor de permeabilidad intrínseca en función del índice de poros para la bentonita seca ( $k_{ig}$ ), puesto que la permeabilidad relativa al gas ( $k_{rg}$ ) en una muestra seca sería igual a 1 (Ec. 2).

$$k_{ig} \cdot k_{rg} = 1,25 \cdot 10^{-12} (e(1 - S_r))^{3,23} \quad (1)$$

$$k_{ig} = 1,25 \cdot 10^{-12} e^{3,23} \quad (2)$$

Los valores de permeabilidad intrínseca no pueden normalmente ser medidos con flujo de gas porque las muestras deberían estar completamente secas y el secado de la bentonita podría implicar una modificación artificial de la microestructura interna por contracción. Por lo tanto, los valores de permeabilidad intrínseca obtenidos en la ecuación (2) pueden ser introducidos en la ecuación (1) para cada muestra y obtener los valores de permeabilidad relativa para un determinado índice de

poros (Ec. 3).

$$k_{rg} = 2,98 (e(1 - S_r))^{2,94} \quad (3)$$

**AGRADECIMIENTOS**

Esta investigación fue llevada a cabo en el marco del proyecto FORGE (FP7/2007-2011, nº230357). Vanesa Gutiérrez ha recibido el apoyo económico de una ayuda para personal investigador en formación en el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT) del Ministerio de Ciencia e Innovación del Gobierno de España.

**REFERENCIAS**

ENRESA (2006): FEBEX, Full-scale engineered barriers experiment, Updated Final Report 1994-2004, Publicación Técnica ENRESA 05-0/2006, Madrid, 590 p.  
 Scheidegger, A.E. (1974): The physics of flow through porous media, 3rd ed. University of Toronto Press, Toronto, 353 p.  
 Villar, M.V. & Lloret, A. (2001): Variation of the intrinsic permeability of expansive clay upon saturation in "Clay Science for Engineering", K. Adachi & M. Fukue, ed. Balkema, Rotterdam, 259-266.  
 —, Martín, P.L., Romero, F.J., Barcala, J.M. (2011): Results of the tests on bentonite (Part 1). FORGE Deliverable D3.15.Madrid.