

# HOMOGENIZACIÓN DE BARRERAS DE ARCILLA PARA RESIDUOS NUCLEARES

## Homogenization of bentonite barriers for nuclear waste

Antonio Gens<sup>a</sup>, Ramon B. de Vasconcelos<sup>a</sup>, Carlos E. Rodríguez<sup>a</sup>, Jean Vaunat<sup>a</sup>, María Victoria Villar<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) – CIMNE, Barcelona, España.

<sup>b</sup> CIEMAT, Madrid, España

**RESUMEN** – Las funciones de seguridad de las barreras de bentonita para residuos nucleares dependen principalmente del valor de su densidad seca (o porosidad). La evolución de esta variable durante la fase transitoria de la barrera es compleja. El artículo presenta una formulación teórica para calcular, mediante análisis numéricos acoplados, los cambios de densidad seca debidos a la hidratación de la barrera, prestando una especial atención a los procesos de homogenización. Se ha adoptado un modelo constitutivo de doble estructura para representar de forma más realista el comportamiento mecánico (tensión-deformación) de la bentonita. Utilizando la formulación presentada, se han simulado satisfactoriamente dos ensayos de hidratación, con distintas condiciones de contorno, sobre muestras que exhibían un elevado grado de heterogeneidad inicial. Los análisis predicen correctamente la saturación final de la muestra, el valor de la presión final de hinchamiento y, sobre todo, el proceso de homogenización que se produce durante los ensayos. El modelo de doble estructura utilizado ha permitido examinar los fenómenos de hidratación y homogenización desde una perspectiva más amplia.

**ABSTRACT** – The safety functions of bentonite barriers for nuclear waste depend mainly on the value of the dry density (or porosity) of the bentonite. The evolution of this variable during the transient phase of the barrier is complex. The paper presents a theoretical formulation to compute, by coupled numerical analyses, the changes in dry density that occur due to the hydration of the barrier, with special focus on the process of homogenization. A double structure constitutive model has been adopted to represent more realistically the mechanical (stress-strain) behaviour of the bentonite. Using the formulation presented, two hydration tests, with different boundary conditions, have been satisfactorily simulated. The samples exhibited a large degree of initial heterogeneity. The analyses predict correctly the final saturation of the samples, the value of the final swelling pressure and, especially, the homogenization process that takes place during the tests. The double structure model has allowed the examination of the hydration and homogenisation phenomena from a wider perspective.

**Palabras Clave** – Barreras de bentonita, residuos nucleares, homogenización.

**Keywords** – Bentonite barriers, nuclear waste, homogenization.

---

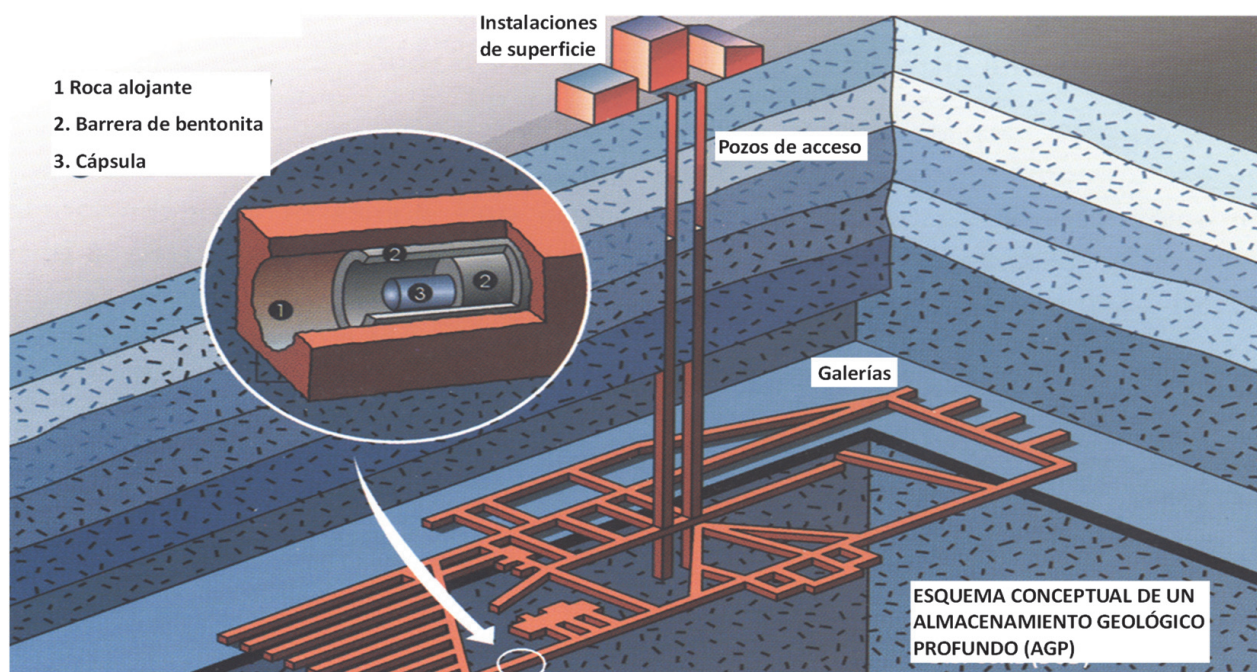
E-mails: antonio.gens@upc.edu (A. Gens), ramon.bvasc@gmail.com (R. Vasconcelos), carloserguez@gmail.com (C. Rodríguez), jean.vaunat@upc.edu (J. Vaunat), mv.villar@ciemat.es (M. Villar)

ORCID: orcid.org/0000-0001-7588-7054 (A. Gens), orcid.org/0000-0003-3579-9652 (J. Vaunat)

## 1 – INTRODUCCIÓN

Los residuos nucleares de alta actividad requieren un adecuado aislamiento de la biosfera durante períodos de tiempo muy largos de tal manera que, una vez termine el período de aislamiento total, las tasas de emisiones radioactivas sean extremadamente reducidas. Las principales fuentes de estos residuos son las centrales nucleares en forma de combustible gastado o como desechos vitrificados procedentes de las operaciones de reprocesamiento. Existe un amplio consenso en que el almacenamiento geológico profundo (AGP) es la opción más efectiva para alcanzar el aislamiento requerido (Chapman y McKinley 1987, NEA 1995, Mc Combie et al. 2000, IAEA 2011).

El AGP requiere la construcción de un repositorio a gran profundidad en una formación geológica apropiada. Aunque no son las únicas opciones, las rocas cristalinas, arcillosas o salinas son las principales candidatas a alojar estas instalaciones. Los repositorios estarán situados a varios centenares de metros de profundidad, su localización concreta estará controlada por las condiciones geológicas locales. El repositorio estaría constituido por una red de túneles a la que se accede mediante pozos y/o rampas. Los residuos se colocarían en galerías horizontales o en pozos verticales (Figura 1).



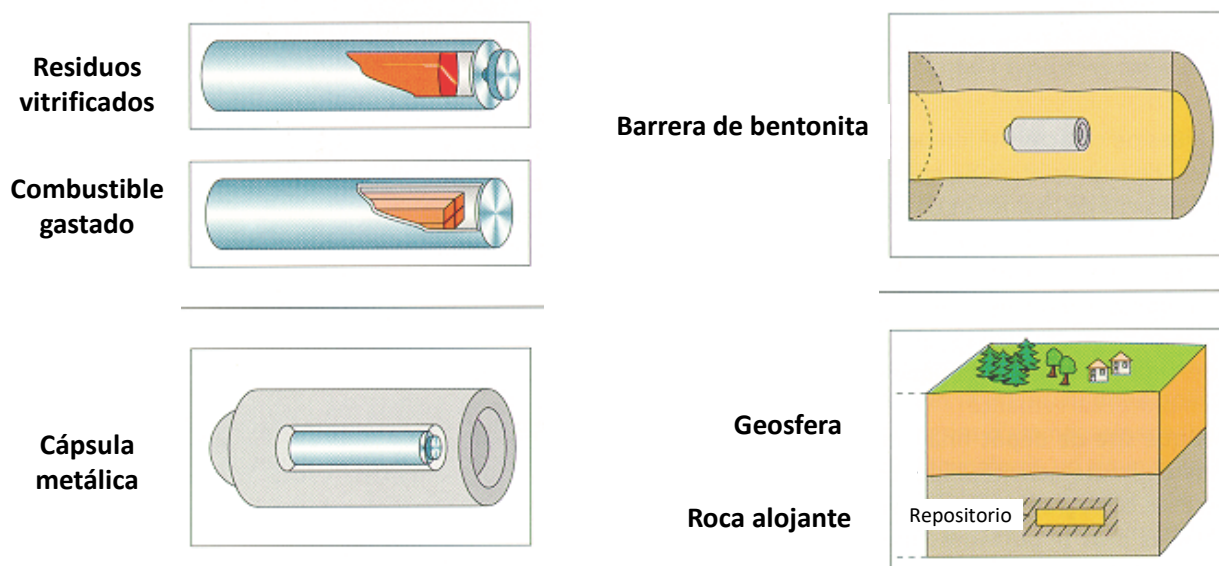
**Fig. 1** – Esquema de un almacenamiento geológico profundo (AGP).

Todos los diseños de AGP recurren al concepto de multi-barrera para lograr el grado requerido de aislamiento (Figura 2). Este concepto se basa en la existencia de una serie de barreras sucesivas que contribuyen de manera conjunta a limitar las emisiones radioactivas por debajo de los umbrales de seguridad establecidos. En un diseño típico, los residuos, convenientemente tratados, se colocan en el interior de una cápsula metálica (la mayoría de veces de acero, pero el cobre también se ha considerado) que constituye la primera barrera. El espacio entre la cápsula y la roca se rellena con arcilla expansiva (bentonita) que forma la segunda barrera. Finalmente se encuentra barrera geológica constituida por la roca alojante. Por tanto, para alcanzar la biosfera, un radionucleido deberá atravesar sucesivamente el conjunto de barreras (Gens 2003).

La barrera de bentonita, objeto de este trabajo, cumple una serie de funciones importantes para la seguridad global del diseño (Sellin y Leupin 2003). Su reducida conductividad hidráulica limita el flujo advectivo de agua en las proximidades de los residuos y, además, retrasa significativamente cualquier transporte de solutos debido a sus propiedades de baja difusividad y elevada capacidad de

absorción. Además, las propiedades expansivas del material permiten que la arcilla cierre huecos y grietas que se puedan producir durante o después de la construcción. Otra función de la barrera de bentonita es proporcionar un soporte adecuado a la cápsula metálica que contiene los residuos. Finalmente, si la arcilla de la barrera posee una densidad suficientemente alta, la posible actividad microbiana (y sus posibles efectos sobre la corrosión) se verá limitada de forma significativa.

Desde el inicio, la barrera está sujeta a un complejo conjunto de fenómenos termo-hidro-mecánicos acoplados. Los residuos nucleares de alta actividad emiten calor debido a la desintegración de los elementos radioactivos que contienen. Este calor se transmite a través de la barrera por conducción y produce un aumento de temperatura que se atenúa con el tiempo debido a la progresiva disminución de la carga calorífica de los residuos. La bentonita se instala en estado parcialmente saturado y experimenta una progresiva hidratación por la entrada de agua de la roca circundante. Esta hidratación produce el desarrollo de la presión de hinchamiento en condiciones básicamente confinadas. Al mismo tiempo, se produce una redistribución de la humedad de la arcilla debido a fenómenos de evaporación cerca de la cápsula y condensación en las zonas más alejadas. Todos estos procesos interaccionan entre sí e influyen en el estado final de la barrera. Debido a la baja permeabilidad tanto de las formaciones geológicas alojantes como de la bentonita, el tiempo de saturación de la barrera es largo; como mínimo requiere varias décadas o, en el caso de rocas muy impermeables, puede requerir más de un siglo.



**Fig. 2 – El concepto multi-barrera.**

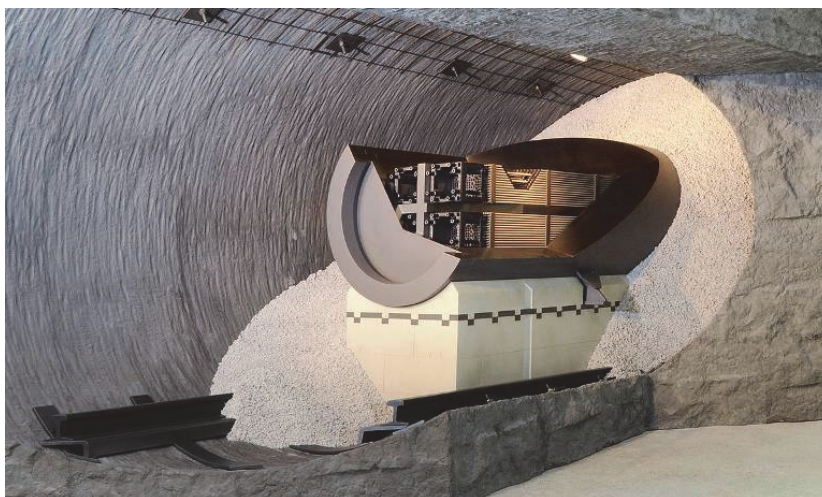
La bentonita empleada en la construcción de la barrera puede emplazarse en distintas formas. Se pueden utilizar, por ejemplo, bloques de bentonita compactada. Más recientemente se ha introducido el uso de bentonita granular formada por pellets (gránulos de bentonita fuertemente compactada) pues facilitan la construcción (Figura 3). Aunque los poros entre pellets tienen un volumen considerable, la densidad media que se obtiene para la barrera en su conjunto es adecuada debido al alto valor de la densidad seca de los pellets (típicamente superior a 2 g/cm<sup>3</sup>). Existen diseños que combinan los bloques de bentonita con la bentonita granular en la construcción de la barrera (Figura 4).

La consecución de la mayoría las funciones de seguridad de la barrera requiere que la bentonita exhiba una baja conductividad hidráulica y un potencial de hinchamiento importante. Para una bentonita determinada, estas dos propiedades dependen fundamentalmente de su grado de compactación, que se suele expresar en términos del valor de su porosidad o, más comúnmente (y de forma equivalente), su densidad seca. La Figura 5 muestra la variación de la conductividad





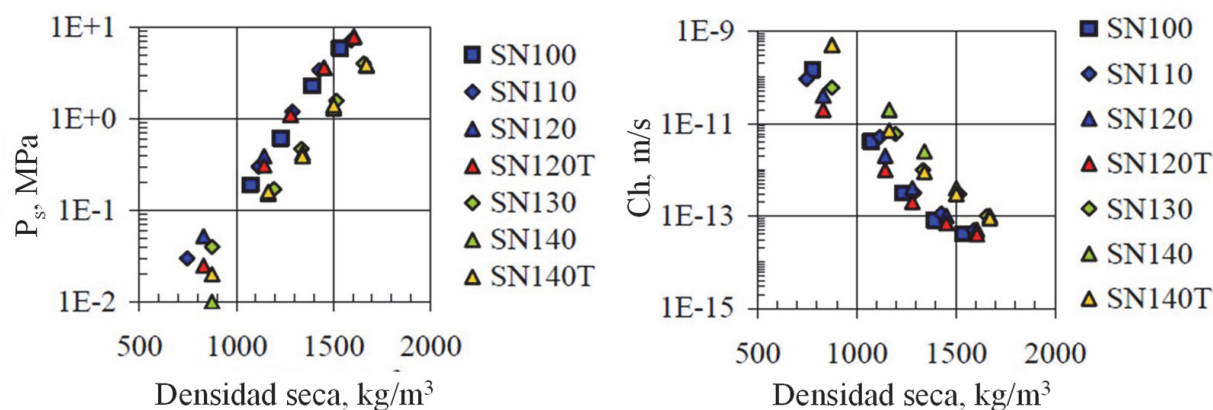
**Fig. 3** – Pellets de bentonita (bentonita granular) (Nagra 2019).



**Fig. 4** – Concepto de barrera de bentonita de NAGRA (agencia suiza de residuos radioactivos) combinado bloques de bentonita con bentonita granular.

hidráulica y la presión de hinchamiento de una bentonita sódica, MX-80, en función de la densidad seca. La presión de hinchamiento es un buen indicador de la capacidad de expansión de la bentonita. Se puede observar que la escala vertical es logarítmica lo que indica la fuerte dependencia de estas dos variables de pequeñas variaciones de la densidad seca. Resultados similares han sido obtenidos en otras bentonitas con distinta composición catiónica (e.g. Lloret et al. 2003 para la bentonita FEBEX). Aunque depende de la bentonita específica que se utilice, valores de densidad seca en el rango de 1.45-1.60 g/cm<sup>3</sup> se consideran generalmente adecuados para que la barrera cumpla sus funciones de seguridad.

Dada la relevancia del valor de la densidad seca de la bentonita para el buen funcionamiento de la barrera, es necesario prestar atención a la distribución de esta variable y su evolución durante la fase transitoria de calentamiento e hidratación. Aunque la densidad media de la bentonita en la barrera es un parámetro importante, es preciso evaluar también el grado de heterogeneidad que pueda exhibir la barrera para poder estimar su efectividad real. Por ejemplo, la intensidad del flujo advectivo de agua estará principalmente controlada por las zonas de la barrera de menor densidad seca y, por tanto, de mayor conductividad hidráulica. De la misma manera, el flujo de gas



**Fig. 5** – Variación de la presión de hinchamiento ( $P_s$ ) y conductividad hidráulica ( $Ch$ ) con la densidad seca de la bentonita sódica MX-80 (Karnland et al. 2007).

(procedente de la corrosión de la cápsula) transitará preferentemente por esas mismas zonas de menor densidad de la barrera. En este contexto, es necesario disponer de capacidades de simulación numérica contrastadas que permitan realizar cálculos y predicciones fiables sobre la evolución del estado de la barrera y la distribución final de densidad seca.

En este artículo se presenta un análisis numérico de dos ensayos de laboratorio en condiciones isotermas explícitamente diseñados para estudiar los procesos de homogenización entre un bloque de bentonita compactada y bentonita granular (pellets). En primer lugar, se examina la evidencia experimental sobre la evolución de la heterogeneidad de la barrera observada en diversos ensayos de campo realizados en laboratorios subterráneos. A continuación, se describe sumariamente la formulación teórica y las leyes constitutivas utilizadas para realizar las simulaciones numéricas. Posteriormente, se describen brevemente los ensayos realizados y las características principales del modelo numérico empleado. Finalmente se presentan y discuten los resultados de los análisis y su comparación con los resultados experimentales prestando una atención especial al grado de homogenización alcanzado.

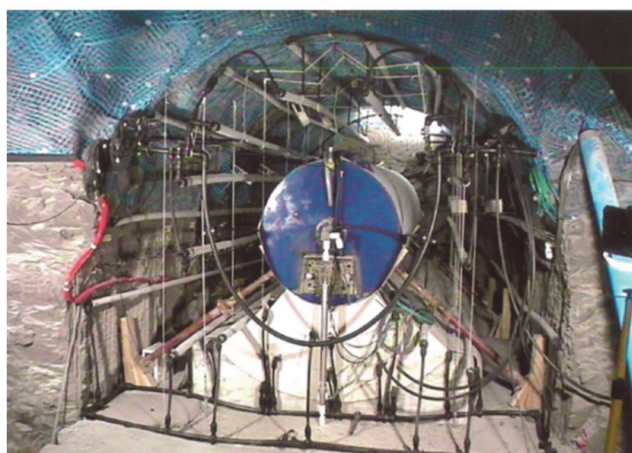
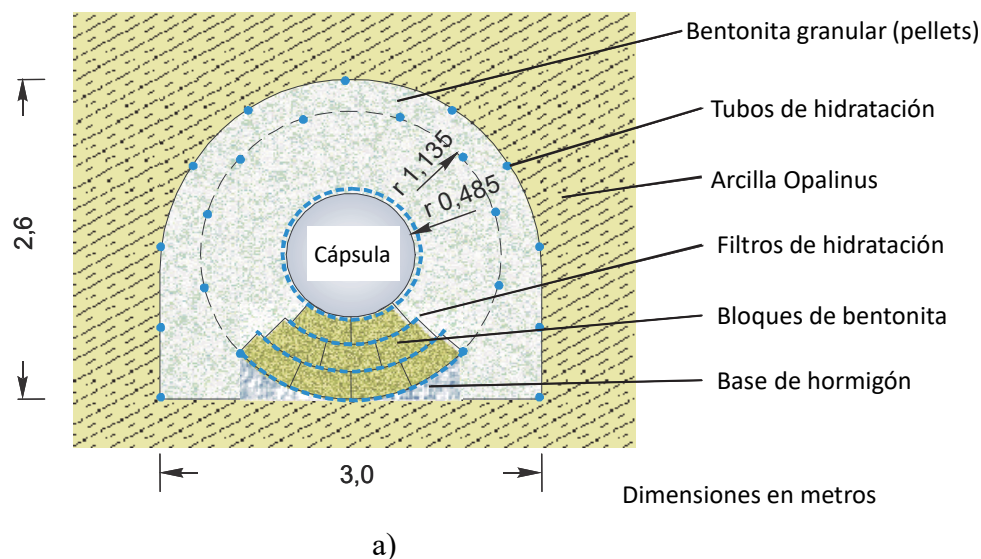
## 2 – HETEROGENEIDAD Y HOMOGENIZACIÓN EN BARRERAS. EVIDENCIA EXPERIMENTAL

Inevitablemente, siempre existirá un cierto grado inicial de heterogeneidad en la barrera, independientemente del método de construcción. La irregularidad de la sección del túnel o la existencia de huecos tecnológicos (juntas entre bloques, espacio entre la barrera y la superficie del túnel) producirán zonas de distinta densidad una vez la bentonita se hidrate y se expanda hasta rellenar los distintos huecos y cavidades. Otra fuente de heterogeneidad es la posible segregación durante el emplazamiento de la bentonita granular o la combinación en la misma sección de bloques y pellets. Además, la distribución de densidad en la barrera sufrirá cambios durante el período transitorio debido a los efectos acoplados de calentamiento, hidratación, transporte de vapor y desarrollo de presiones de hinchamiento. Dada la complejidad del problema, se han realizado un cierto número de observaciones directas del estado final de la barrera en ensayos a gran escala realizados en diversos laboratorios subterráneos. En esta sección se presentan algunos de los más característicos.

El ensayo EB (Mayor et al. 2007) se llevó a cabo en el laboratorio subterráneo de Mont Terri, situado en el cantón del Jura en Suiza y excavado en la arcilla Opalinus (Thury y Bossart 1999). Consiste en la hidratación, bajo condiciones isotermas, de una sección compuesta por bentonita granular y bloques compactados de bentonita (Figura 6). El túnel del ensayo tenía forma de herradura con una altura de 2.25 m y un ancho de 3 m. La longitud de la barrera ensayada fue de 6 m. Los

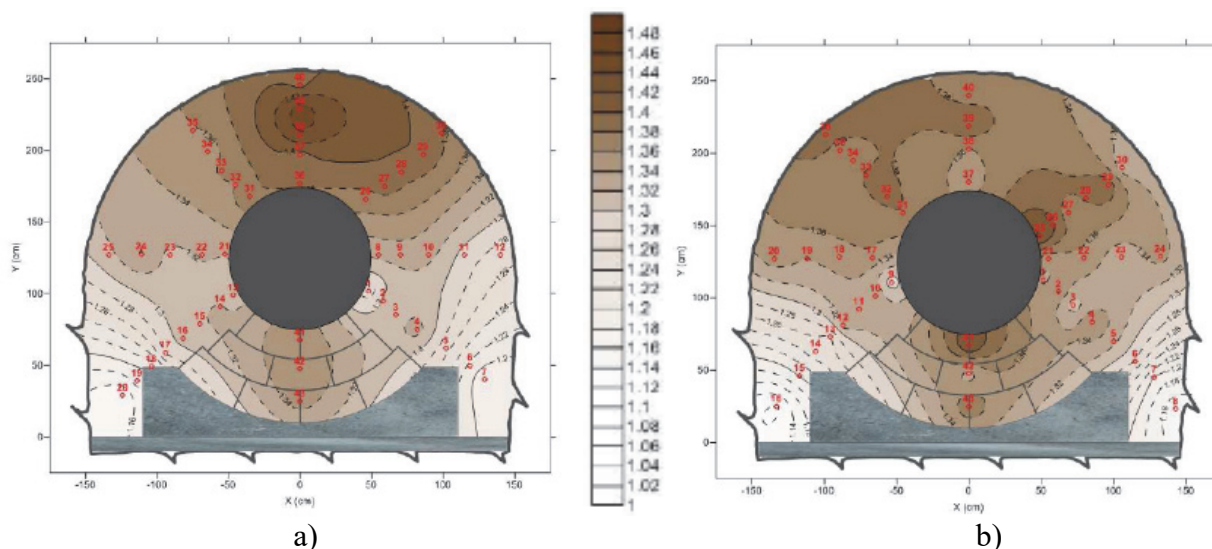


bloques sostienen un cilindro metálico (4.54 m de longitud y 0.97 m de diámetro) que simula la presencia de una cápsula metálica. En el ensayo se utilizó la bentonita FEBEX procedente de la cantera del Cortijo de Archidona en Almería, España (Villar 2002, Lloret et al. 2003, Huertas et al. 2006). Inicialmente, los bloques tenían una densidad seca de  $1.69 \text{ g/cm}^3$  y una humedad del 14.4 %, mientras que la densidad seca media de la bentonita granular, una vez emplazada, era de  $1.36 \text{ g/cm}^3$  y su humedad el 4.2%. Se adoptó un sistema de hidratación artificial para disminuir los tiempos de saturación de la barrera.



**Fig. 6** – Ensayo EB. a) Sección del ensayo, b) construcción del experimento (son visibles los tubos de hidratación), c) emplazamiento de la bentonita granular.

El experimento se desmanteló después de 10.7 años de hidratación y se pudo comprobar que la barrera estaba prácticamente saturada en todas las secciones (Mayor y Velasco 2014). Durante el desmantelamiento se extrajeron numerosas muestras para una determinación detallada del estado de la barrera. Los contornos de densidad seca observada al final del ensayo se muestran en la Figura 7 para dos secciones representativas. Se puede observar que en la dirección vertical se ha producido una homogenización prácticamente completa; la zona ocupada por los bloques ha disminuido su densidad mientras que la densidad de la zona superior de bentonita granular ha aumentado la suya hasta acabar siendo aproximadamente iguales. También se advierte que, en la zona de las esquinas inferiores, la densidad al final del ensayo es muy baja debido a la dificultad de conseguir un adecuado emplazamiento de la bentonita granular en esa zona a causa de la geometría de la sección del experimento.



**Fig. 7** – Contornos de densidad seca al finalizar el ensayo EB (Mayor y Velasco 2014). a) Sección A1-25, b) Sección E.

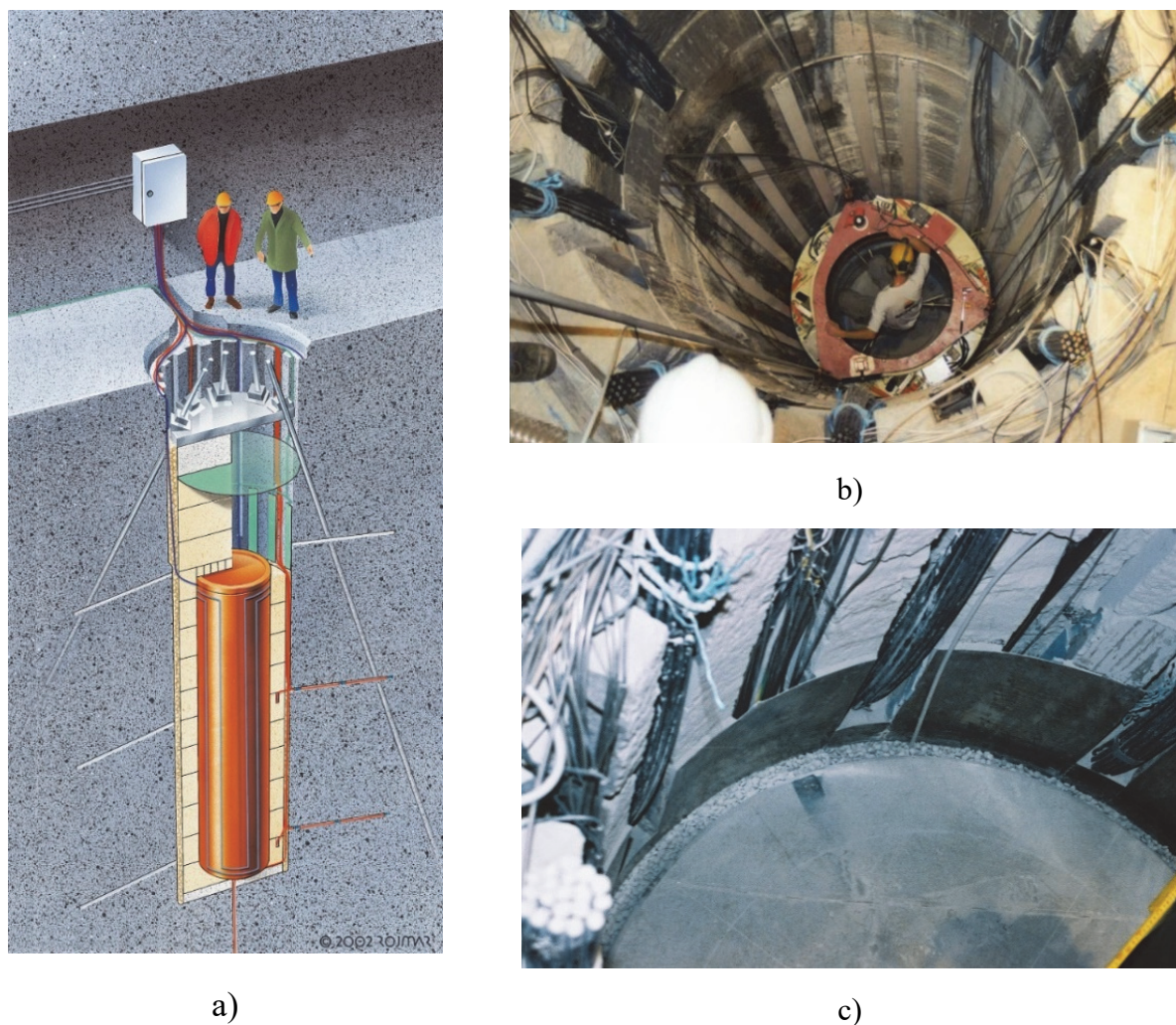
El ensayo Canister Retrieval Test (CRT) (Thorsager et al. 2002) se desarrolló en el laboratorio subterráneo de Aspö, situado en Suecia y excavado en granito (Bäckblom 1991). Se perforó un pozo vertical de 8.55 m de profundidad y 1.75 m de diámetro en el que se instaló un calentador que simula el efecto térmico de una cápsula de residuos radioactivos. La barrera se construyó mediante bloques de bentonita sódica MX-80 compactada de 1.65 m de diámetro. La densidad seca de los bloques estaba en el rango de 1.71-1.79 g/cm<sup>3</sup> y su humedad media era del 17%. El espacio anular de 5 cm de espesor adyacente a la roca se rellenó mediante pellets de la misma bentonita los cuales, una vez emplazados, alcanzaron una densidad seca de aproximadamente 1.0 g/cm<sup>3</sup>. La barrera se hidrató de forma artificial mediante unos filtros colocados en el contacto entre la roca y los pellets. La Figura 8 muestra diversos aspectos del ensayo.

La barrera de bentonita estuvo sujeta a calentamiento e hidratación artificial durante un período de 5.5 años, que fue suficiente para la saturación de la barrera en los anillos colocados rodeando el calentador. El desmantelamiento subsiguiente permitió determinar el estado de homogenización de la barrera. Un resultado característico se presenta en la Figura 9. Se puede comprobar que, a pesar de la gran diferencia inicial de densidad seca entre bloque y pellets, el estado final es básicamente homogéneo en toda la sección; la densidad seca en la zona de pellets es del orden de 0.1 g/cm<sup>3</sup> menor.

Finalmente, el ensayo FEBEX (Huertas et al. 2006) fue realizado en el laboratorio subterráneo de Grimsel, situado en los Alpes suizos y también excavado en granito (Keusen et al. 1989). El esquema del experimento se presenta en la Figura 10a. Para el ensayo, se excavó un túnel circular de 2.28 m de diámetro en el que instalaron dos calentadores de 4.54 m de longitud y 0.90 m de diámetro para representar dos cápsulas de residuos radioactivos. La barrera de bentonita se constituyó mediante bloques compactados de bentonita FEBEX con una densidad seca de 1.69 g/cm<sup>3</sup> y una humedad del 14.4% (que corresponde a un grado de saturación del 60%). Debido a la existencia de juntas entre los bloques y de espacio entre la barrera y la roca, la densidad seca media considerando todo el volumen del túnel fue de 1.60 g/cm<sup>3</sup>. La longitud total del experimento era de 17.4 m y ocupaba la sección final del túnel. En la Figura 10b se muestra el aspecto de la barrera en su estado inicial. Se puede observar que en este caso el estado inicial de la barrera es básicamente homogéneo.

El experimento se realizó fijando la temperatura máxima en la bentonita a 100°C. En este caso la hidratación de la barrera fue natural por el agua procedente del macizo rocoso que albergaba el experimento.



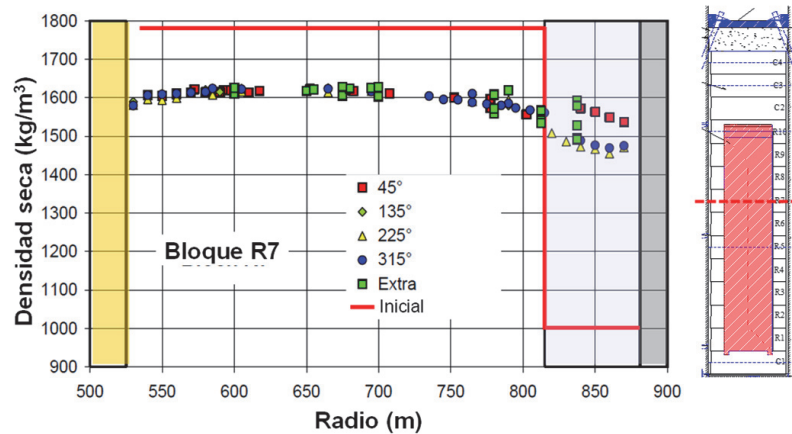


**Fig. 8** – Ensayo CRT (Canister Retrieval Test). a) Esquema del ensayo, b) construcción del ensayo, c) vista superior de la barrera (se puede observar la capa de pellets entre el bloque y la roca). (Thorsager et al. 2002).

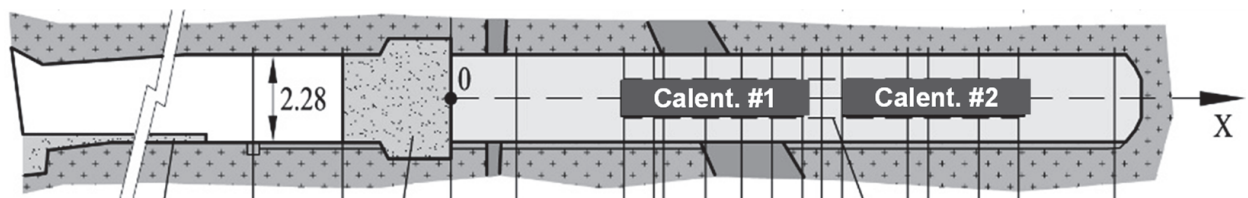
El periodo de calentamiento se mantuvo por un período de 18.3 años procediendo al desmantelamiento del ensayo inmediatamente a continuación (García Siñeriz et al. 2016). Excepcionalmente, este ensayo fue también objeto de un desmantelamiento parcial después de 5 años de calentamiento que supuso la extracción del primer calentador y la barrera circundante, mientras que la sección del segundo calentador continuaba en las mismas condiciones de ensayo (Bárcena et al. 2003). Esto permitió realizar observaciones directas del estado de la barrera en dos momentos distintos de la evolución de la barrera. Se comprobó, en los dos desmantelamientos, que la hidratación había sido muy uniforme a lo largo de todo el experimento y que el estado de la barrera mostraba una marcada simetría radial (Villar et al. 2005, 2020a, 2020b, Gens et al. 2009). La Figura 10c muestra el aspecto de la barrera al final del ensayo.

Los resultados más significativos de la determinación del estado de la barrera se presentan en la Figura 11. La Figura 11a muestra la distribución de humedades en la barrera después de 5 y 18.3 años de calentamiento e hidratación, respectivamente. Puede observarse que, como cabría esperar, la humedad aumentó entre los dos desmantelamientos debido al proceso de saturación progresiva de la barrera. Se pudo comprobar al final del ensayo que toda la barrera se encontraba saturada o muy próxima a la saturación completa. La distribución de densidad seca observada se representa en la Figura 11b. Es muy interesante comprobar que los procesos térmicos y de hidratación han transformado el estado homogéneo inicial de la barrera en un estado heterogéneo que presenta un

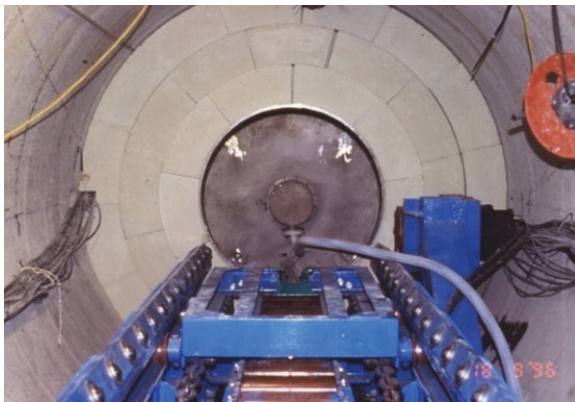




**Fig. 9** – Ensayo CRT (Canister Retrieval Test). Distribución de densidad seca después del ensayo. Sección R7 (Johannesson 2007).



a)



b)



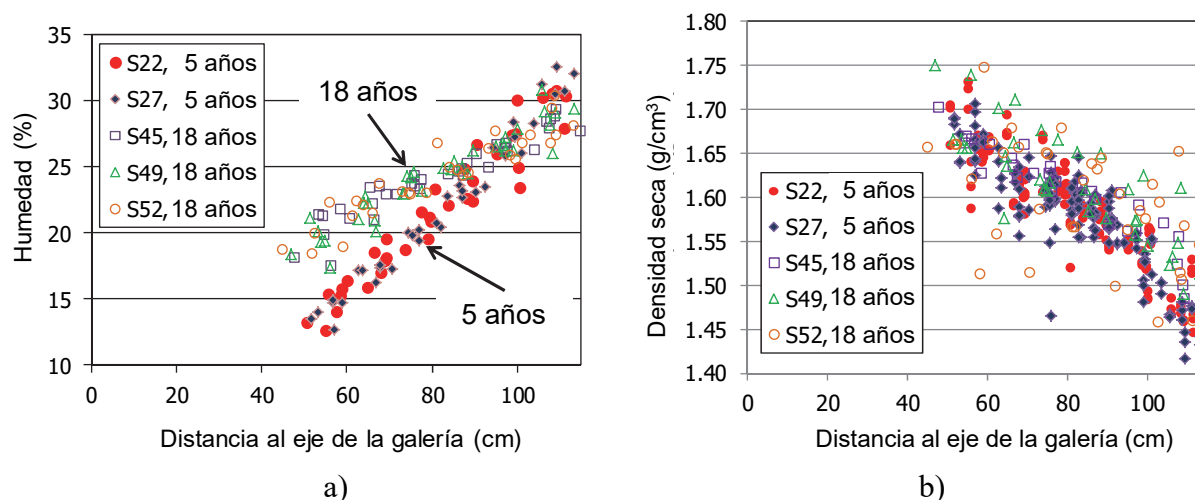
c)

**Fig. 10** – Ensayo FEBEX. a) Esquema del ensayo, b) aspecto inicial de la barrera, c) aspecto de la barrera al final del ensayo.

gradiente de densidad seca desde valores altos cerca del calentador a valores más reducidos cerca de la roca. También es muy interesante constatar que no hay diferencia entre la distribución de densidad seca a los 5 años de ensayo y al final. Es evidente que la heterogeneidad se desarrolla en una etapa temprana de la evolución de la barrera y que, desde ese momento, se mantiene básicamente invariable.

Como se puede comprobar, la evidencia obtenida en ensayos a gran escala es dispar. Por un lado, secciones inicialmente heterogéneas exhiben una gran capacidad de homogeneización, mientras que, por otro lado, secciones inicialmente homogéneas sometidas a acciones térmicas e hidráulicas radialmente uniformes desarrollan una marcada heterogeneidad. Estas observaciones

motivaron la decisión de desarrollar un proyecto de investigación europeo (proyecto BEACON) para estudiar esta cuestión de una forma más sistemática y fundamental mediante, entre otras tareas, la realización de ensayos de laboratorio específicamente dirigidos a observar los procesos de homogenización. Otro objetivo es comprobar la capacidad de las herramientas numéricas disponibles para reproducir el comportamiento observado. Los trabajos que se describen a continuación se enmarcan en dicho proyecto.



**Fig. 11** – Ensayo FEBEX. a) Distribución de la humedad después de 5 y 18.3 años de calentamiento, b) Distribución de la densidad seca después de 5 y 18.3 años de calentamiento (Villar et al. 2020b).

### 3 – FORMULACIÓN NUMÉRICA

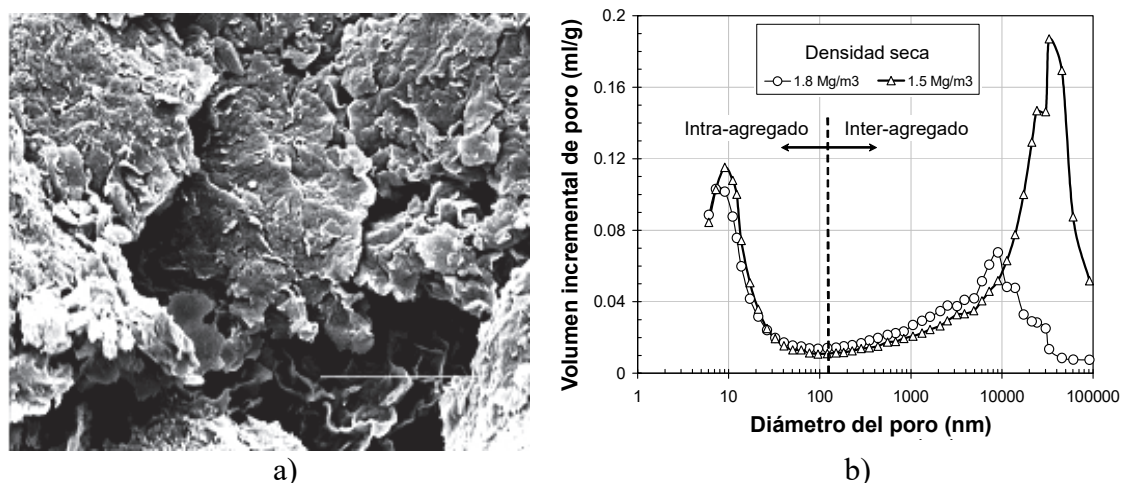
#### 3.1 – Aspectos generales

El análisis de las barreras de bentonita bajo efectos térmicos y de hidratación requieren herramientas de cálculo basadas en formulaciones termo-hidro-mecánicas acopladas para tener en cuenta de forma adecuada los distintos fenómenos que inciden en su comportamiento. Dichas formulaciones se basan en el establecimiento de ecuaciones de balance que expresan principios físicos básicos: conservación de la energía, conservación de la masa de sólido, de agua y de aire y equilibrio (en ausencia de efectos dinámicos). A cada una de estas ecuaciones (excepto la del sólido) le corresponde una incógnita principal del problema: temperatura, presión (o potencial) del líquido y del gas, y desplazamientos. La formulación se completa con las ecuaciones constitutivas que describen los distintos fenómenos considerados y que contienen sus diversas interacciones (Olivella et al. 1994, Gens y Olivella 2000).

La formulación adoptada en los análisis que aquí se presentan está desarrollada en el marco conceptual de un material de doble estructura que distingue entre dos niveles: la macroestructura y la microestructura (Gens y Alonso 1992, Sánchez 2004, Mañín 2013, Wang y Wei 2015, Dieudonné et al. 2017, Ghidiasri et al. 2018, Navarro et al. 2020a, 2020b). Microporosidad y macroporosidad se refieren al volumen de poros correspondientes a cada nivel estructural. El objetivo es representar mejor la estructura real del material y conseguir una modelización más realista de su comportamiento. La Figura 12a muestra un detalle muy ampliado de la estructura de la bentonita FEBEX compactada. Se observa claramente una macroestructura formada por agregados de arcilla con una disposición cuasi-granular. La microestructura corresponde al interior de los agregados donde se producen los procesos físico-químicos básicos que subyacen a las propiedades expansivas de estas arcillas. Los resultados de la porosimetría de intrusión de mercurio (MIP) de la Figura 12b



reflejan claramente los dos tipos de porosidad asociados a cada uno de los niveles estructurales. En el caso de materiales a base de pellets de bentonita, la doble estructura es todavía más evidente.



**Fig. 12** – a) Imagen SEM de la bentonita FEBEX compactada, b) Resultado de la porosimetría MIP para dos muestras de bentonita FEBEX con distintas densidades secas (Lloret et al. 2003).

En las siguientes secciones se describen de forma sumaria los aspectos más importantes de la formulación utilizada. Puesto que los ensayos que se analizan fueron realizados en condiciones isotermas, la componente térmica de la formulación no se incluye en esta descripción. Los detalles completos de la formulación, incorporando los aspectos térmicos, se presentan en Vasconcelos (2021).

### 3.2 – Ecuaciones de balance

La Figura 13 presenta el diagrama de fases para un medio poroso no saturado de doble estructura. Es conveniente definir las fracciones volumétricas de la microporosidad, la macroporosidad y la fase sólida, respectivamente:

$$\bar{\phi}_m = \frac{V_{pm}}{V} \quad \bar{\phi}_M = \frac{V_{pM}}{V} \quad \bar{\phi}_s = \frac{V_s}{V} \quad (1)$$

donde  $V$  significa volumen total,  $V_{pm}$  el volumen de microporos,  $V_{pM}$  el volumen de macroporos y  $V_s$  el volumen de sólidos. Su suma debe ser 1. Naturalmente, la porosidad total,  $\phi$ , es la suma de las fracciones volumétricas micro y macro:

$$\phi = \bar{\phi}_m + \bar{\phi}_M \quad (2)$$

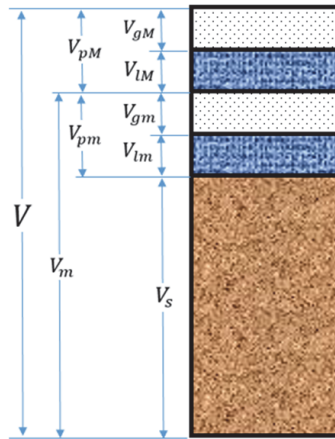
Para el desarrollo de la formulación de doble estructura se ha supuesto que puede haber desequilibrio hidráulico entre la microestructura y la macroestructura. En tal caso, habrá un intercambio de masa de agua entre los dos niveles. También se ha supuesto que el flujo advectivo de agua se produce únicamente a través de la macroestructura. Las ecuaciones de balance de masa de sólido, agua macroestructural y agua microestructural resultantes son, respectivamente:

$$\frac{D\bar{\phi}_M}{Dt} = \frac{(1 - \bar{\phi}_m - \bar{\phi}_M)}{\rho_s} \frac{D\rho_s}{Dt} + (1 - \bar{\phi}_m - \bar{\phi}_M) \frac{d\varepsilon_v^{m \rightarrow M}}{dt} - \frac{D\bar{\phi}_m}{Dt} \quad (3)$$

$$\frac{D(\theta_{LM}^w S_{L2} + \theta_{gM}^w S_{gM})}{Dt} \bar{\phi}_M + (\theta_{LM}^w S_{LM} + \theta_{gm}^w S_{g2}) \left( \frac{d\bar{\varepsilon}_{vM}}{dt} \right) \nabla \cdot (\mathbf{j}_{LM}^w + \mathbf{j}_{gM}^w) = -I^w \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \bar{\phi}_m \frac{D(\theta_{Lm}^w S_{Lm} + \theta_{gm}^w S_{gm})}{Dt} - (\theta_{Lm}^w S_{Lm} + \theta_{gm}^w S_{gm}) \left( \frac{d\bar{\varepsilon}_{vm}}{dt} \right) \\ = I^w - (\theta_{Lm}^w S_{Lm} + \theta_{gm}^w S_{gm}) (1 - \phi) \frac{d\rho_s}{\rho_s} \end{aligned} \quad (5)$$

donde  $t$  es el tiempo,  $\bar{\phi}$  es la fracción volumétrica,  $\phi$  es la porosidad total,  $\rho$  es la densidad,  $\theta$  es la fracción másica,  $S$  el grado de saturación,  $\varepsilon_v$  la deformación volumétrica,  $\mathbf{j}$  los flujos advectivos, y  $\Gamma^w$  el término de intercambio de agua entre la microestructura y la macroestructura. Como se ha indicado anteriormente, los subíndices  $m$ ,  $M$ ,  $s$ ,  $L$  y  $g$  significan micro, macro, sólido, líquido y gas respectivamente. El superíndice  $w$  se refiere a la especie agua. El símbolo  $D$  indica derivada material.



**Fig. 13** – Diagrama de fases para un medio poroso no saturado de doble estructura. Los subíndices  $m$ ,  $M$ ,  $s$ ,  $l$  y  $g$  significan micro, macro, sólido, líquido y gas, respectivamente.

Se puede constatar que los términos advectivos no aparecen en la ecuación de balance de agua de la microestructura lo que permite tratar la presión (o potencial) del agua microestructural como una variable de estado, reduciendo de esta manera el tamaño del sistema de ecuaciones a resolver. Para el intercambio de agua entre los dos niveles estructurales se utiliza una ley lineal:

$$I^w = \gamma(s_m - s_M) \quad (6)$$

donde  $s$  es la succión y  $\gamma$  es un parámetro que controla la velocidad del intercambio de agua.

Se considera que el estado de tensiones totales es el mismo en los dos niveles estructurales por lo que la ecuación de equilibrio es simplemente:

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{b} = 0 \quad (7)$$

donde  $\boldsymbol{\sigma}$  es el tensor de tensiones totales y  $\mathbf{b}$  las fuerzas de masa.



### 3.3 – Ecuación constitutiva mecánica

Los procesos referentes a la homogenización de la densidad seca y cambios de porosidad están controlados principalmente por la ecuación constitutiva mecánica del material. La ley utilizada es el resultado de la evolución de una serie de modelos de doble estructura que se han desarrollado a lo largo del tiempo (Gens y Alonso 1992, Alonso et al. 1999, Sanchez 2004, Sanchez et al. 2005, 2008, Vasconcelos 2021). La hipótesis básica es que la macroestructura no influye sobre el comportamiento microestructural (dominado por los fenómenos físico-químicos que suceden a nivel de la partícula de la arcilla) mientras que la deformación microestructural afecta a la macroestructural de una forma a menudo irreversible. Esta influencia se define mediante dos funciones de interacción, una referente al hinchamiento de la microestructura y la otra a su contracción.

Como tanto la macroestructura como la microestructura pueden estar en condiciones no saturadas, es necesario definir dos variables constitutivas para cada uno de los niveles (Gens 2010) que se presentan en la Tabla 1. Como se ha indicado anteriormente, se adopta la hipótesis de que las tensiones totales son las mismas para los dos niveles estructurales.

**Tabla 1** – Variables constitutivas para los dos niveles estructurales.

	Primera variable constitutiva, PVC	Segunda variable constitutiva, SVC
nivel microestructural	Tensión efectiva de Bishop $\sigma'_{1m} = \sigma_1 - P_{gm} \mathbf{I} + S_{Lm} s_m \mathbf{I}$	succión micro $s_m = \max(P_{gm} - P_{Lm}, 0)$
nivel macroestructural	Tensión neta $\sigma''_M = \sigma_M - P_{gM} \mathbf{I}$	succión macro $s_2 = \max(P_{gM} - P_{LM}, 0)$

El comportamiento de la microestructura se considera reversible por lo que se modela mediante un modelo elástico no lineal caracterizado por un módulo de deformación volumétrica,  $K_m$ , dependiente de la tensión efectiva media,  $p'_m$ , en la microestructura:

$$K_m = \frac{p'_m}{(1 + \phi_m) \kappa_m} \quad (8)$$

donde  $\kappa_m$  es un parámetro del modelo.

El comportamiento macroestructural se representa por el modelo BBM (Alonso et al. 1990). La deformación volumétrica plástica macroestructural debido a las deformaciones microestructurales están definidas por las dos funciones de interacción (de compresión y de hinchamiento). Las funciones de interacción dependen del grado de apertura de la macroestructura, representado por la distancia (normalizada) del estado de tensiones a la superficie de fluencia. Las funciones de interacción utilizadas en los análisis son:

$$f_\beta = \begin{cases} f_{MC}^{(1)} + (f_{MC}^{(0)} - f_{MC}^{(1)}) - (1 - \mu_\beta)^{\eta_{MC}} \text{ si } \omega_\beta = +1 \\ f_{MS}^{(1)} + (f_{MS}^{(0)} - f_{MS}^{(1)}) - (1 - \mu_\beta)^{\eta_{MS}} \text{ si } \omega_\beta = -1 \end{cases} \quad (9)$$

Información adicional sobre el modelo constitutivo, incluyendo su formulación matemática completa, se encuentra en Vasconcelos (2021).

### 3.4 – Ecuaciones constitutivas hidráulicas

La componente hidráulica de la formulación requiere definir algunas leyes constitutivas básicas. Los flujos advectivos de agua en la macroestructura se consideran que están gobernados por la ley generalizada de Darcy:

$$\mathbf{q}_{LM} = -\frac{\mathbf{k}_{LM}k_{rLM}}{\mu_L}(\nabla P_{LM} - \rho_{LM}\mathbf{g}) \quad (10)$$

donde  $\mathbf{k}_{LM}$  es la permeabilidad intrínseca,  $k_{rLM}$  es la permeabilidad relativa (dependiente del grado de saturación) y  $\mu_L$  es la viscosidad de la fase líquida. Se considera que la variación de la permeabilidad intrínseca depende solo de los cambios de porosidad de la macroestructura:

$$\mathbf{k}_{LM} = \mathbf{k}_{oLM} \exp[b(\bar{\phi}_M - (\bar{\phi}_o)_M)] \quad (11)$$

Finalmente, la curva de retención relaciona la succión (o potencial) con el grado de saturación. Para definirla, se utiliza la expresión de Van Genuchten (1978):

$$S_e = \left[ 1 + \left( \frac{S}{P_o} \right)^{1/(1-\lambda_o)} \right]^{-\lambda_o} \left( 1 - \frac{S}{P_d} \right)^{\lambda_d} \quad (12)$$

donde  $P_o$ ,  $P_d$ ,  $\lambda_o$  y  $\lambda_d$  son parámetros del modelo.

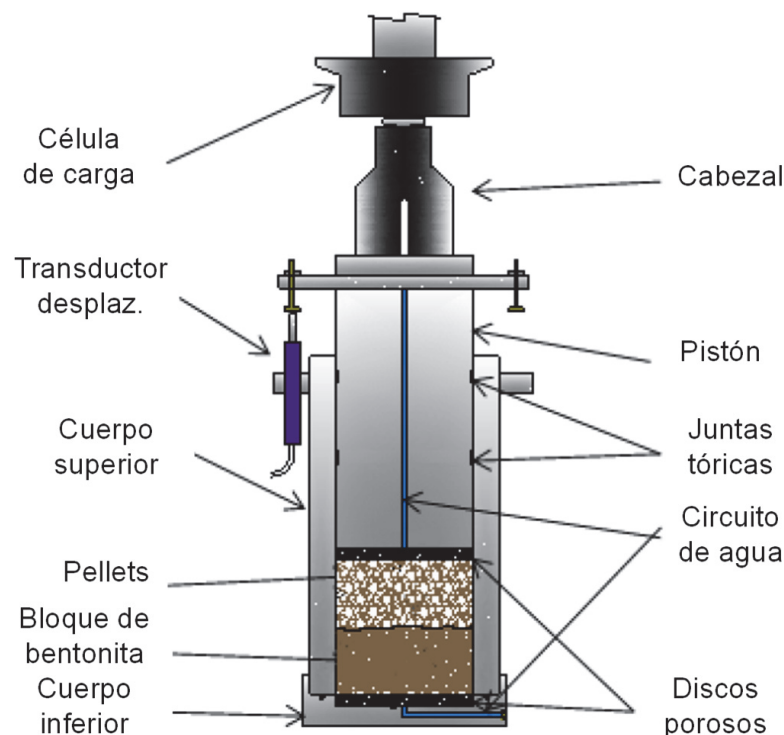
## 4 – DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS

Los ensayos fueron realizados en los laboratorios de CIEMAT en Madrid. El aparato es un edómetro en el que se puede mantener el volumen total de la muestra constante (Figura 14). La muestra tiene 10 cm de largo y 10 cm de diámetro y está dividida en dos mitades. Los 5 cm superiores están ocupados por un bloque de bentonita compactado mientras que los 5 cm inferiores están rellenos de pellets (bentonita granular). La célula está instalada en un marco rígido que permite imponer que no haya cambio global de volumen durante el ensayo. Existe un transductor de desplazamiento para comprobar que el desplazamiento es efectivamente despreciable y una célula de carga para medir la fuerza axial que se desarrolla. El agua para la hidratación de la muestra se suministra a través de un disco poroso situado en la base. Por tanto, el agua penetra por la zona de los pellets para progresar posteriormente hacia el bloque.

Para la formación de las muestras se utilizó la bentonita FEBEX. Se han analizado dos ensayos: MGR22 y MGR23. Los bloques se compactaron a la humedad higroscópica del 14% hasta alcanzar una densidad seca de 1.60 g/cm<sup>3</sup>. Las densidades de los pellets individuales eran del orden de 2.11-2.13 g/cm<sup>3</sup> mientras que el conjunto granular resultante tenía una densidad seca de 1.28-1.30 g/cm<sup>3</sup>, muy inferior a la del bloque. La humedad de los pellets era 10% en el ensayo MGR 22 y 3.5% en el ensayo MGR23.

La principal diferencia entre los dos ensayos radica en la forma de hidratación. En el ensayo MGR22, la hidratación se produce mediante un flujo constante nominal de 0.05 cm<sup>3</sup>/h mientras que en el ensayo MGR23 se aplica una presión de agua constante de 15 kPa. Las condiciones de hidratación se mantuvieron constantes hasta el final de los ensayos (256 días en el caso del MGR22 y 210 días para el MGR23). Durante la hidratación, el disco poroso superior se mantuvo abierto a la atmósfera y se midieron la carga axial, el desplazamiento de la parte superior de la muestra (prácticamente nulo) y el volumen de entrada de agua. Al finalizar el ensayo, las muestras fueron desmanteladas y se determinaron las distribuciones de humedad y densidad seca en seis secciones distribuidas uniformemente a lo largo de la muestra. Una descripción completa del equipo y los ensayos realizados se presenta en Villar et al. (2021).





**Fig. 14** – Esquema del aparato de ensayo (Villar et al. 2021).

## 5 – ANÁLISIS DE LOS ENSAYOS Y DISCUSIÓN

### 5.1 – Características principales de los análisis

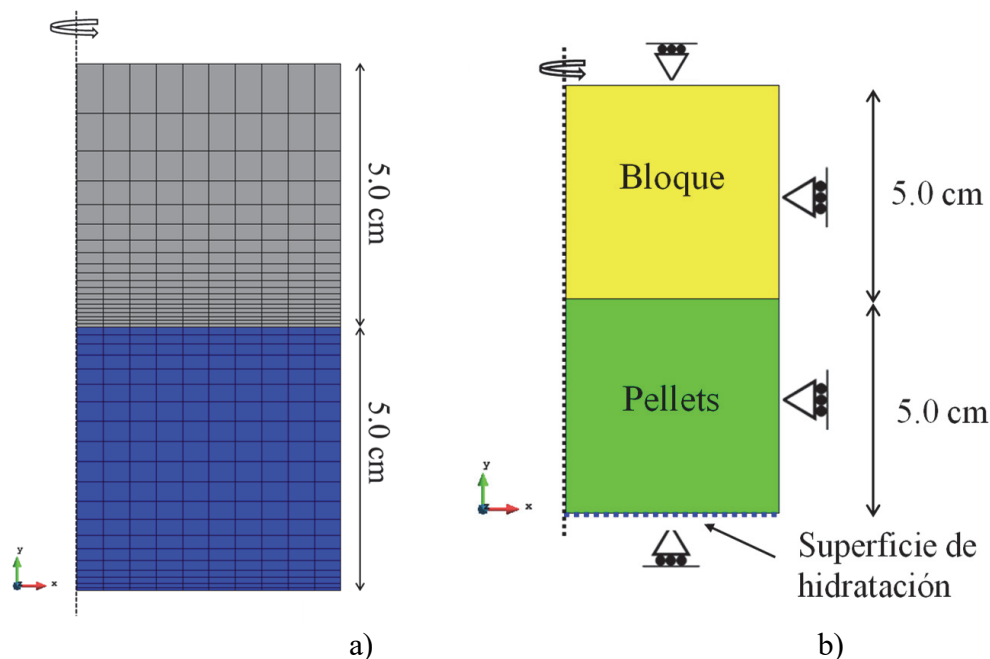
La formulación acoplada hidromecánica descrita anteriormente se ha aplicado al análisis de los ensayos MGR22 y MGR23. El dominio de cálculo es axisimétrico con un radio de 5 cm y una altura de 10 cm y ha sido discretizado mediante 400 cuadriláteros lineales, con un total de 451 nodos (Figura 15a). Se ha utilizado un esquema de integración selectivo para asegurar el buen funcionamiento de los elementos lineales. Se puede observar que la malla se refina cerca del contacto bloque/pellets y en las proximidades de la superficie de hidratación, donde se esperan los mayores gradientes. Las condiciones de contorno de desplazamiento se ilustran en la Figura 15b. No se ha considerado en los análisis la fricción entre la muestra y el cilindro que la contiene.

Los parámetros de los materiales se han derivado de la extensa información disponible sobre la bentonita FEBEX, tanto en forma de bloques como de pellets (e.g. Villar 2002, Lloret et al. 2004, Huertas et al. 2006, Lloret y Villar 2007). Dadas las características de los ensayos a simular, se ha dado especial importancia a los ensayos de presión de hinchamiento de Lloret et al. (2003) y Hoffman et al. (2007).

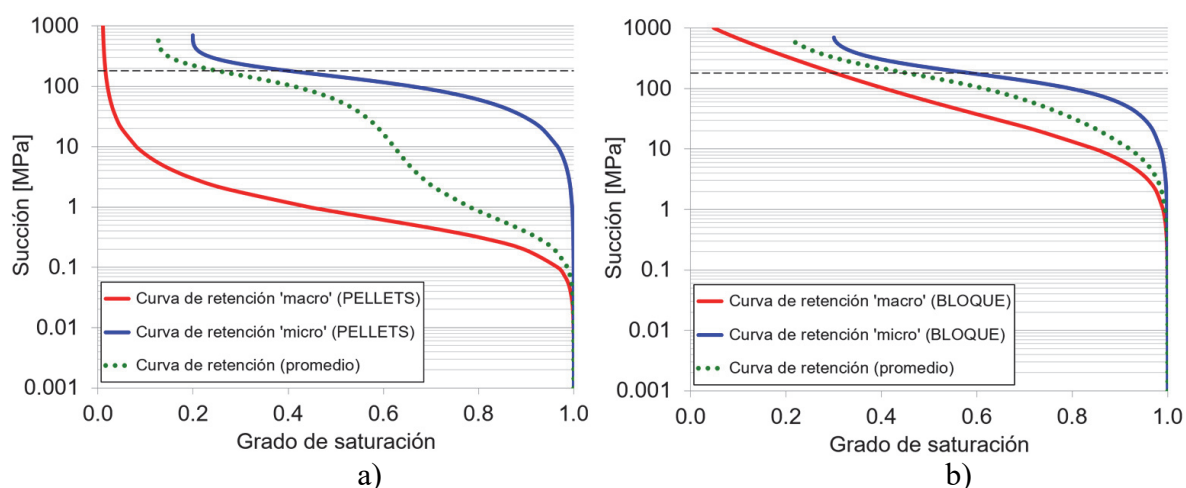
Una componente importante de los análisis es la selección de la curva de retención, frecuentemente un factor clave en las predicciones de hidratación. Con el modelo de doble estructura es necesario especificar una curva de retención para la microestructura y otra para la macroestructura. La curva de retención que se determinaría en el laboratorio sería una media de las dos, en proporción a sus fracciones volumétricas. La Figura 16 muestra las curvas de retención (micro, macro y global) para pellets y bloques. Puede observarse que hay una diferencia significativa en las curvas de retención de la macroestructura de pellets y bloques reflejando los distintos tamaños y disposición de los macroporos. Finalmente, el valor del parámetro de intercambio de agua

seleccionado,  $\Gamma^w$ , es de  $4 \times 10^{-6} \text{ kg/s/m}^3/\text{MPa}$ , que corresponde a un equilibrado rápido de la succión entre los dos niveles estructurales.

Como consecuencia de usar el modelo de doble estructura, hay que particionar la porosidad total entre microporosidad y macroporosidad. La división se ha basado en los ensayos de porosimetría MIP realizados por CIEMAT para determinar el estado inicial de la muestra (Villar et al. 2021). En el caso del bloque, la porosidad inicial es 0.404, dividida en fracciones volumétricas de 0.216 (micro) y 0,188 (macro) mientras que la porosidad de la zona de pellets es de 0.528, dividida en fracciones volumétricas de 0.323 (micro) y 0,205 (macro). La succión inicial de 180 MPa se ha derivado de los valores de humedad y las correspondientes curvas de retención. Se ha supuesto que inicialmente la microestructura y la macroestructura están en equilibrio hidráulico.



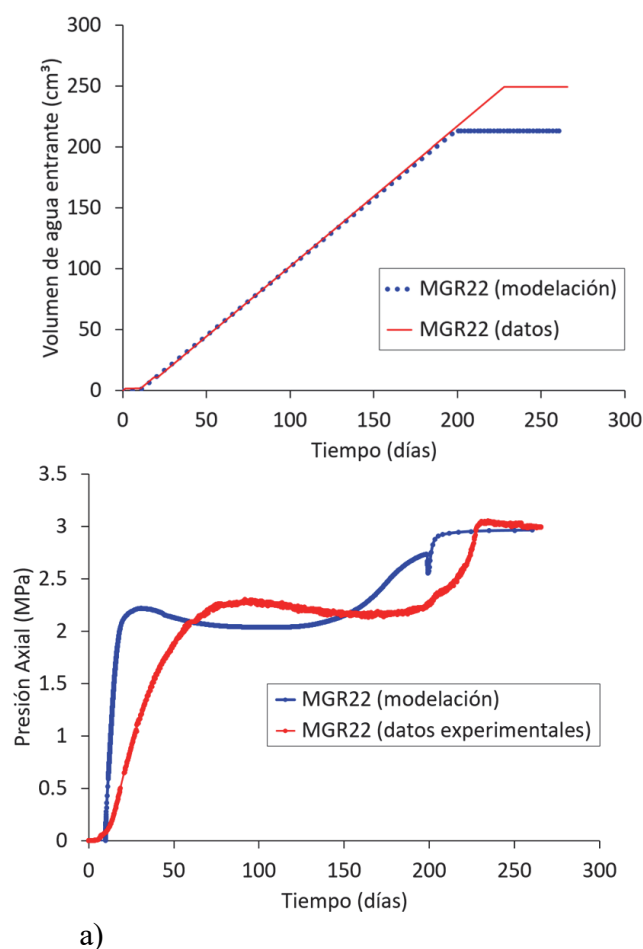
**Fig. 15** – a) Dominio de análisis y discretización, b) condiciones de contorno.



**Fig. 16** – Curvas de retención. a) pellets, b) bloque de bentonita.

## 5.2 – Análisis del ensayo MGR22

Para la simulación del ensayo MGR22, se ha seguido lo más fielmente posible el protocolo experimental real del ensayo incluyendo un período inicial de 10 días sin entrada de agua seguidos por una inyección de agua constante de  $0.047 \text{ cm}^3/\text{h}$  (en vez del  $0.05 \text{ cm}^3/\text{h}$  nominal). La evolución de la entrada de agua (impuesta) y de la tensión axial calculada se presentan en la Figura 17 junto a los resultados experimentales. Se puede observar que la presión de hinchamiento final es reproducida correctamente. La variación en el tiempo también es bastante satisfactoria, aunque la velocidad inicial de aumento de presión calculada es más rápida que la observada sugiriendo que el parámetro de intercambio debería ser menor para retardar la transferencia inicial de agua de la macroestructura hacia la microestructura.



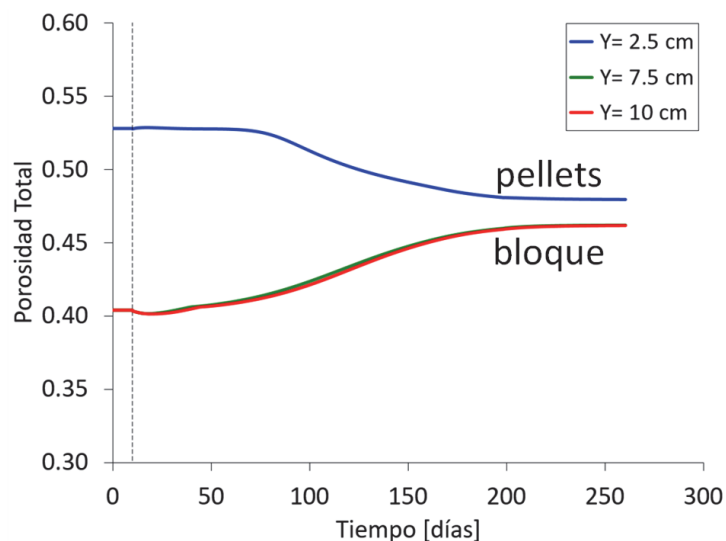
**Fig. 17** – Comparación de las observaciones experimentales con los resultados del modelo. Ensayo MGR22. a) Entrada de agua, b) presión axial.

El progreso de la homogenización puede seguirse dibujando la evolución de la porosidad global en tres puntos diferentes (Figura 18). El punto con coordenada  $y=2.5 \text{ cm}$  está situado en el centro de la zona de los pellets mientras que los puntos con  $y=7.5 \text{ cm}$  y  $y=10 \text{ cm}$  corresponden al centro del bloque y a la parte superior de la columna, respectivamente. Se puede observar que la porosidad de la zona de los pellets se reduce, mientras que la del bloque aumenta de forma que su diferencia se ha reducido muy significativamente al final del ensayo. También se puede comprobar que la reducción en el tiempo de la porosidad es muy similar en todo el bloque de bentonita.

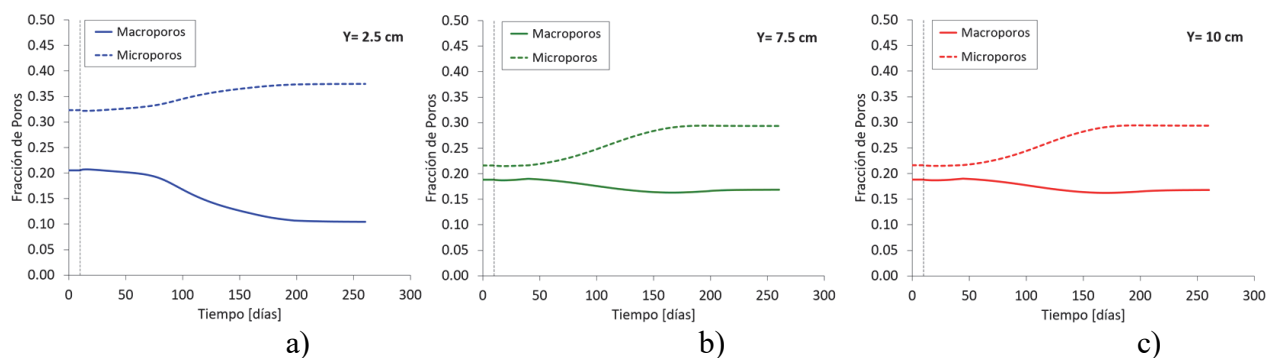
Se puede obtener más información sobre la variación de la porosidad dibujando la evolución de las fracciones volumétricas de los dos niveles estructurales (Figura 19). Se puede ver que el cambio



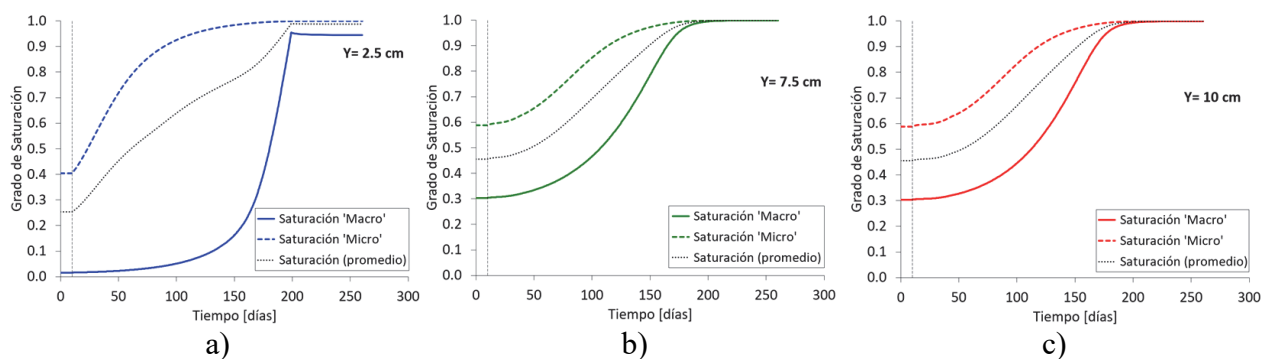
de la fracción volumétrica micro es similar en todos los puntos y corresponde a la hidratación de la microestructura. En cambio, la reducción de la fracción volumétrica macro es mucho mayor en la zona de pellets porque el volumen disponible para compresión es notablemente más grande.



**Fig. 18** – Evolución calculada de la porosidad de los pellets y del bloque de bentonita. Ensayo MGR22. El punto con  $y=2.5$  cm está situado en el centro de la zona de los pellets, mientras que los puntos con  $y=7.5$  cm y  $y=10$  cm corresponden al centro del bloque y a la parte superior de la columna.



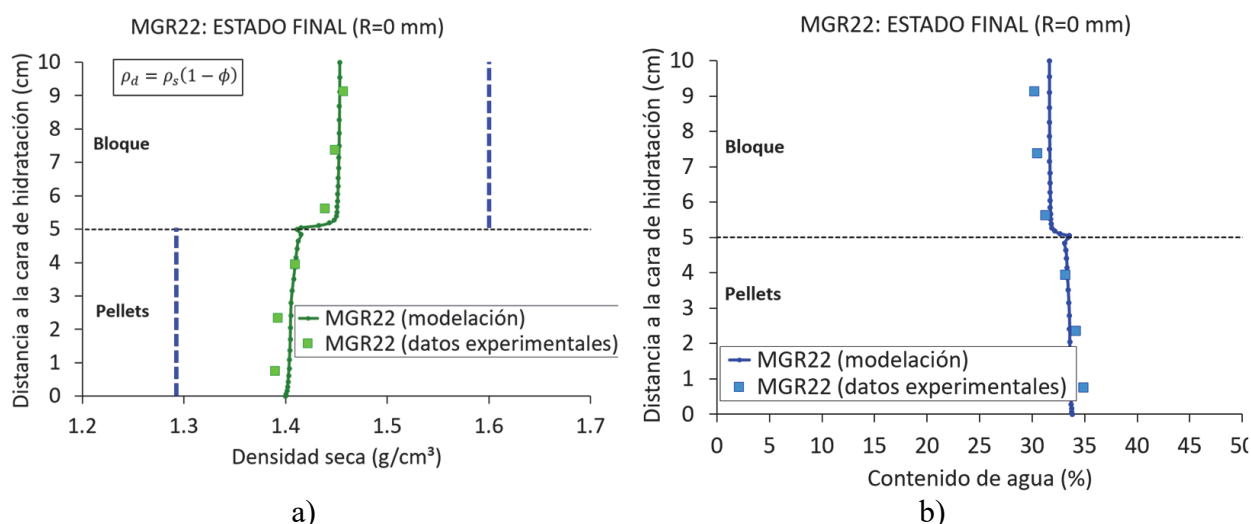
**Fig. 19** – Evolución calculada de las porosidades micro y macro. Ensayo MGR22. a) centro de la zona de pellets ( $y=2.5$  cm), b) centro del bloque ( $y=7.5$  cm), c) parte superior de la columna ( $y=10$  cm).



**Fig. 20** – Evolución calculada de los grados de saturación micro, macro y global. Ensayo MGR22. a) centro de la zona de pellets ( $y=2.5$  cm), b) centro del bloque ( $y=7.5$  cm), c) parte superior de la columna ( $y=10$  cm).

El avance de la hidratación se ilustra siguiendo los cambios en los grados de saturación calculados (global, micro y macro) en la Figura 20 para los mismos tres puntos considerados anteriormente. Los gráficos muestran que la columna alcanza la saturación a los 200 días aproximadamente. Durante el ensayo, el grado de saturación macro es siempre inferior al grado de saturación micro porque su valor inicial es menor, especialmente en la zona de pellets.

El resultado más significativo respecto al proceso de homogenización se recoge en la Figura 21a, que muestra la distribución de densidad seca a lo largo de la columna al final del ensayo. Se puede constatar que se ha alcanzado un alto grado de homogeneidad, sobre todo si se considera la elevada diferencia inicial de densidades (representadas por líneas verticales). Es importante observar que la simulación numérica predice un resultado muy próximo al observado, indicando que la formulación empleada es adecuada para representar proceso de homogenización, al menos en este caso. Como el material está básicamente saturado al final del ensayo, la distribución de humedades sigue el mismo patrón que las densidades secas (Figura 21b).

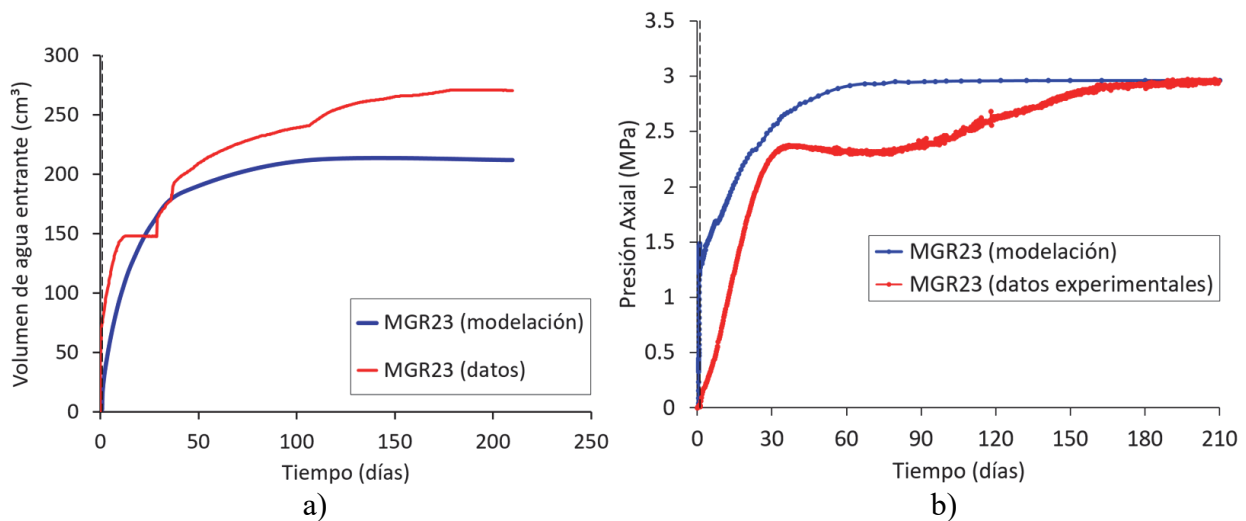


**Fig. 21** – Comparación de las observaciones experimentales con los resultados del modelo. Ensayo MGR22. a) Distribución final de densidad seca (las dos líneas verticales corresponden a la situación inicial), b) distribución final del contenido de agua.

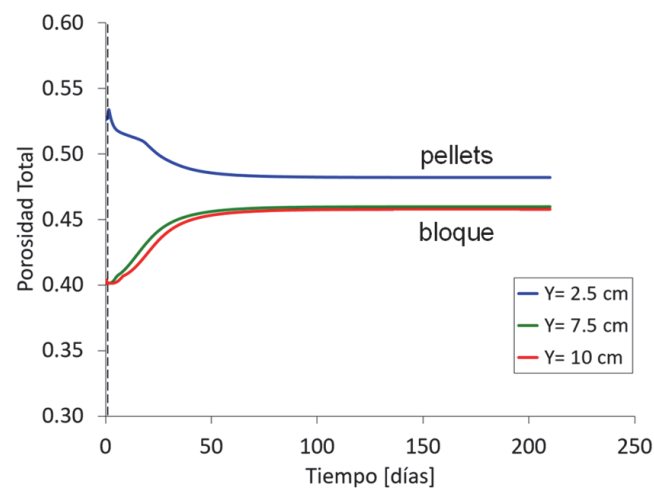
### 5.3 – Análisis del ensayo MGR23

Para la simulación de este ensayo se ha aplicado una presión de agua constante de 15 kPa en la cara inferior de la muestra. Para evitar problemas numéricos de convergencia la presión de agua no se ha aplicado instantáneamente sino a lo largo de un período de un día. La Figura 22a muestra la evolución de la entrada de agua calculada y observada. Puede comprobarse que la velocidad inicial de hidratación está subestimada. En cambio, el cálculo sobreestima la velocidad de aumento de la tensión axial (Figura 22b). Esta diferencia en las velocidades iniciales sugiere de nuevo que el parámetro de intercambio de agua entre niveles estructurales debe ser menor. Se puede observar que el valor final de la presión de hinchamiento está correctamente reproducido.

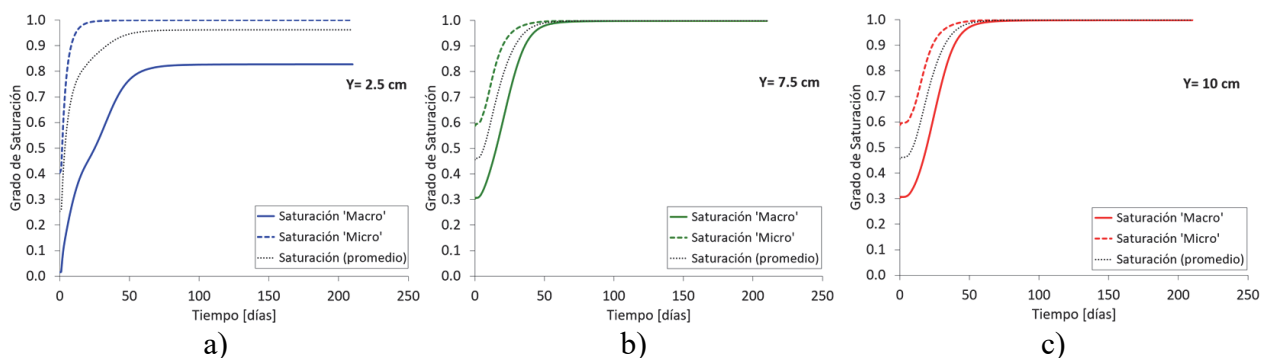
La variación de porosidad con el tiempo para los tres puntos seleccionados (Figura 23) muestra un grado final de homogenización similar al ensayo MGR22 a pesar de sus distintas condiciones de hidratación. En este caso, sin embargo, parece que la homogenización ocurre en una fase más temprana del ensayo. De nuevo, la evolución de la porosidad es muy similar en toda la sección del bloque. Los dos ensayos también son similares respecto a la evolución de las fracciones volumétricas macro y micro (Figura 24).



**Fig. 22** – Comparación de las observaciones experimentales con los resultados del modelo. Ensayo MGR23. a) Entrada de aguas, b) presión axial.



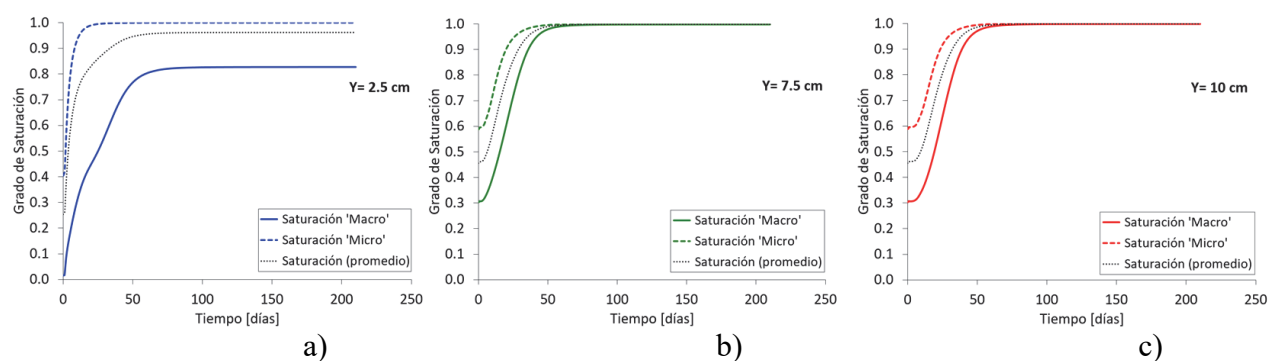
**Fig. 23** – Evolución calculada de la porosidad de los pellets y del bloque de bentonita. Ensayo MGR23. El punto con  $y=2.5$  cm está situado en el centro de la zona de los pellets mientras que los puntos con  $y=7.5$  cm y  $y=10$  cm corresponden al centro del bloque y a la parte superior de la columna.



**Fig. 24** – Evolución calculada de las porosidades micro y macro. Ensayo MGR23. a) centro de la zona de pellets ( $y=2.5$  cm), b) centro del bloque ( $y=7.5$  cm), c) parte superior de la columna ( $y=10$  cm).

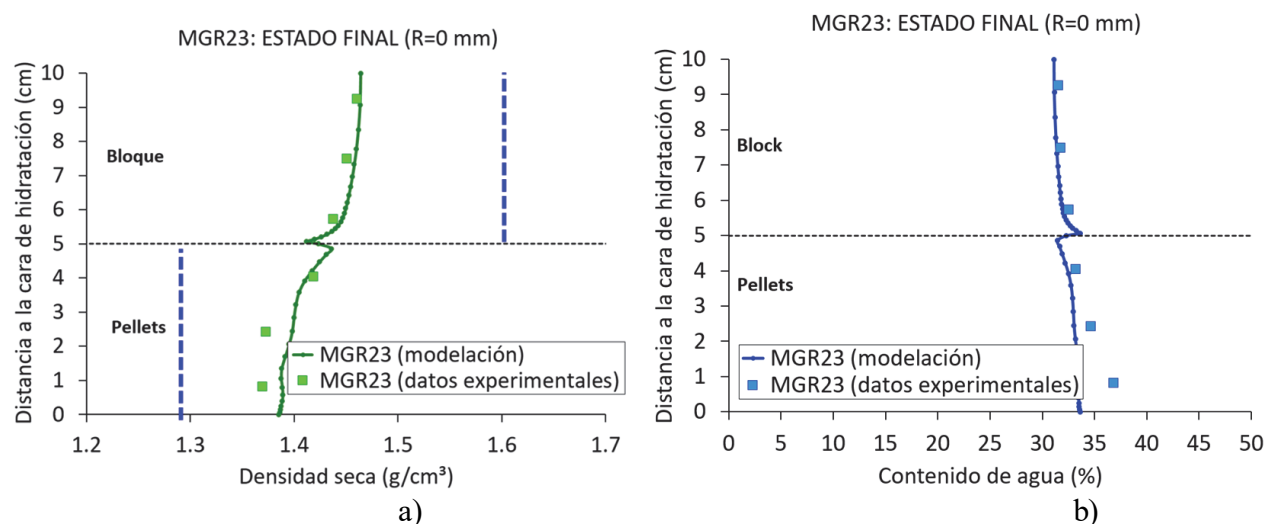


Toda la columna está prácticamente globalmente saturada al final del ensayo (Figura 25). De hecho, la macroestructura de la zona de los pellets muestra todavía un cierto déficit de saturación debido a que, con su curva de retención, una pequeña succión se corresponde todavía a un estado no completamente saturado. Esto es una consecuencia de no considerar el efecto de los cambios de índice de poros en la curva de retención. Sin embargo, como al final del ensayo la macroporosidad es muy reducida, la zona de pellets está prácticamente saturada globalmente.



**Fig. 25** – Evolución calculada de los grados de saturación micro, macro y global. Ensayo MGR23. a) centro de la zona de pellets ( $y=2.5$  cm), b) centro del bloque ( $y=7.5$  cm), c) parte superior de la columna ( $y=10$  cm).

La distribución calculada de densidad seca al final del ensayo se corresponde muy bien con la determinada experimentalmente (Figura 26a). De nuevo, la formulación empleada es capaz de representar satisfactoriamente la intensa homogenización observada en el ensayo. El estado de saturación de la columna al final del ensayo implica que la distribución de humedades sigue la variación correspondiente a la distribución de la densidad seca, tanto experimental como calculada (Figura 26b).



**Fig. 26** – Comparación de las observaciones experimentales con los resultados del modelo. Ensayo MGR23. a) Distribución final de densidad seca (las dos líneas verticales corresponden a la situación inicial), b) distribución final del contenido de agua.

## 6 – CONCLUSIONES

Las funciones de seguridad de las barreras de bentonita para residuos nucleares de alta actividad dependen en buena parte del valor de su densidad seca, que evoluciona de una forma compleja durante la fase transitoria a causa de efectos térmicos y de hidratación. En este artículo se ha presentado una formulación acoplada hidromecánica, basada en un modelo de doble estructura, desarrollada para simular los posibles efectos de heterogeneidad y homogenización en la barrera. La formulación ha sido aplicada a la simulación de dos ensayos isotermos especialmente diseñados para examinar el proceso de homogenización a partir de una situación inicial con un elevado grado de heterogeneidad.

Globalmente, los resultados de los análisis pueden ser considerados como satisfactorios. La presión de hinchamiento final ha sido predicha correctamente en los dos casos, aunque se observan diferencias entre los resultados del modelo y los experimentales en la evolución de la entrada de agua y la tensión axial, sobre todo en la parte inicial del ensayo, cuando la elevada velocidad de cambio dificulta su simulación precisa.

El estado final de saturación también se reproduce correctamente en los dos casos. Más relevante es el hecho que la distribución final de densidad calculada se corresponde muy bien con la observada experimentalmente, confirmando el alto grado de homogenización que se produce aun partiendo de un sistema altamente heterogéneo.

El comportamiento mecánico de la bentonita ha sido representado por una ley constitutiva de doble estructura. El funcionamiento de este modelo ha sido satisfactorio y ha sido capaz de proporcionar información adicional para examinar los procesos de hidratación y homogenización desde una perspectiva más amplia.

## 7 – AGRADECIMIENTOS

Los trabajos presentados en este artículo han sido desarrollados en el marco del proyecto BEACON (Bentonite Mechanical Evolution). El proyecto BEACON recibe financiación del programa EURATOM de investigación y formación 2014-2018, bajo el acuerdo de subvención no. 745942. Se agradece asimismo el respaldo de Conacyt (Id. no. 710153) al tercer autor.

## 8 – REFERENCIAS

- Alonso, E.E.; Gens, A.; Josa, A. (1990). *A constitutive model for partially saturated soils*. Géotechnique, 40(3), 405–430.
- Alonso, E.E.; Vaunat, J.; Gens, A. (1999). *Modelling the mechanical behaviour of expansive clays*. Engineering Geology, 54, 173-183.
- Bäckblom, G. (1991). *The Äspö Hard Rock Laboratory—a step toward the Swedish final repository for high-level radioactive waste*. Tunnelling and Underground Space Technology, 6(4), 463-467.
- Bárcena, I.; Fuentes-Cantillana, J.L.; García-Siñeriz, J.L. (2003). *Dismantling of the heater 1 at the FEBEX in situ test. Description of Operations*. Publicación Técnica ENRESA 09/2003, Madrid
- Chapman, N.A.; Mc Kinley, I.G. (1987). *The geological disposal of nuclear waste*. JohnWiley: Chichester.
- Dieudonné, A.-C.; Della Vecchia, G.; Charlier, R. (2017). *A water retention model for compacted bentonites*. Canadian Geotechnical Journal, 54 (7), 915-925.

- García-Siñeriz, J.L.; H. Abós, H.; Martínez, V.; De la Rosa, C.; Mäder, U.; Kober, F. (2016). *FEBEX DP: Dismantling of heater 2 at the FEBEX "in situ" test. Description of operations*. Nagra report, NAB 16-11, Wettingen.
- Gens, A. (2003). *The role of Geotechnical Engineering for nuclear energy utilisation*. Proc. 13th. Europ. Conf. on Soil Mechanics and Geotech. Eng., Prague, 3, 25–67.
- Gens, A. (2010). *Soil-environment interactions in geotechnical engineering. The 47 Rankine Lecture*. Geotechnique, 60, 3–74.
- Gens, A.; Alonso, E.E. (1992). *A framework for the behaviour of unsaturated expansive clays*. Canadian Geotechnical Journal, 29(6), 1013–32.
- Gens, A.; Olivella, S. (2000). *Non isothermal multiphase Flow in deformable porous media. Coupled formulation and application to nuclear waste disposal*. In Smith & Carter (eds.), Developments in Theoretical Soil Mechanics, 619–640, Rotterdam: Balkema.
- Gens, A.; Sánchez, M.; Guimarães, L. do N.; Alonso, E.E.; Lloret, A.; Olivella, S.; Villar, M.V.; Huertas, F. (2009). *A full-scale in situ heating test for high-level nuclear waste disposal: observations, analysis and interpretation*. Géotechnique, 59, 1-23.
- Ghiadistri, G.M.; Potts, D.M.; Zdravković, L.; Tsiampousi, A. (2018). *A new double structure model for expansive clays*. In: Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on Unsaturated Soils (UNSAT 2018). Hong Kong.
- Hoffmann, C.; Alonso, E.E.; Romero, E. (2007). *Hydro-mechanical behaviour of bentonite pellet mixtures*. Physics and Chemistry of the Earth, 32, 832-849. doi: 10.1016/j.pce.2006.04.037
- Huertas, F.; Fariña, P.; Farias, J.; García-Siñeriz, J.L.; Villar, M.V.; Fernández, A.M.; Martín, P.L.; Elorza, F.J.; Gens, A.; Sánchez, M.; Lloret, A.; Samper, J.; Martínez, M.A. (2006). *Full-scale Engineered Barrier Experiment. Updated Final Report*. Technical Publication 05-0/2006, ENRESA. Madrid.
- IAEA (2011). *Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste*. Specific Safety Guide, No. SSG-14. Safety Standards. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- Johannesson, L.-E. (2007). *Canister Retrieval Test. Dismantling and sampling of the buffer and determination of density and water ratio*. International Progress Report IPR-07-16. SKB, Stockholm.
- Karnland, O.; Nilsson, U.; Weber, H-P.; Wersin, P. (2007). *Sealing ability of Wyoming bentonite pellets foreseen as buffer material. Laboratory results*. Nagra report, NAB 07-23, Wettingen.
- Keusen, H.R.; Ganguin, J.; Schuler, P.; Buletti, M. (1989). *Grimsel Test Site. Geology*. Technical Report NTB 87-14E. Baden: Nagra. 1989.
- Lloret, A.; Romero, E.; Villar, M.V. (2004). *FEBEX II Project Final report on thermo-hydro-mechanical laboratory tests*. Publicación Técnica ENRESA 10/04.Madrid.
- Lloret, A.; Villar, M.V. (2007). *Advances on the knowledge of the thermo-hydro-mechanical behaviour of heavily compacted "FEBEX" bentonite*. Physics and Chemistry of the Earth, 32, 701-715.
- Lloret A.; Villar, M.V.; Sánchez, M.; Gens, A.; Pintado, X.; Alonso, E.E. (2003). *Mechanical behaviour of heavily compacted bentonite under high suction changes*. Géotechnique, 53(1), 27–40.



- Mayor, J.C.; García-Siñeriz, J.L.; Alonso, E.; Alheid, H.-J.; Blümling, P. (2007). *Engineered barrier emplacement experiment in Opalinus Clay for the disposal of radioactive waste in underground repositories*. In: Bossart P., Nussbaum C., eds. Mont Terri Project – Heater Experiment, Engineered Barriers Emplacement and Ventilation Tests. Rep. Swiss Geol. Survey No. 1, 115–179.
- Mayor, J.C.; Velasco, M. (2014) *Long-term Performance of Engineered Barrier Systems PEBS. EB dismantling Synthesis report (DELIVERABLE-Nº: D2.1-8)*. Seventh Euratom Framework Programme for Nuclear Research & Training Activities (2007-2011) Contract number: FP7 249681. 2014.
- Mašín, D. (2013). *Double structure hydromechanical coupling formalism and a model for unsaturated expansive clays*. Engineering Geology, 165, 73-88.
- Mc Combie, C.; Pentz, D.L.; Kurzeme, M.; Miller, I. (2000). *Deep geological repositories: a safe and secure solution to disposal of nuclear wastes*, GeoEng2000, An International Conference on Geotechnical and Geological Engineering: 1: 686–691. Technomic Publishing, Melbourne.
- Nagra (2019). *Implementation of the Full-scale Emplacement Experiment at Mont Terri: Design, Construction and Preliminary Results*. Technical Report 15-02. NAGRA, Wettingen.
- Navarro, V.; Asensio, L.; Gharbieh, H.; De la Morena, G.; Alonso, J.; Veli-Matti Pulkkanen, V.-M. (2020a). *A triple porosity hydro-mechanical model for MX-80 bentonite pellet mixtures*. Engineering Geology, 265: 105311. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105311>
- Navarro, V.; Asensio, L.; De la Morena, G.; Gharbieh, H.; Alonso, J.; Veli-Matti Pulkkanen, V.-M. (2020b). *From double to triple porosity modelling of bentonite pellet mixtures*. Engineering Geology, 274: 105714. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105714>
- NEA, (1995). *The Environmental and Ethical Basis of Geological Disposal, A Collective Opinion of the NEA Radioactive Waste Management Committee*, Nuclear Energy Agency, OECD, Paris.
- Olivella, S.; Carrera, J.; Gens, A.; Alonso, E.E. (1994). *Non-isothermal multiphase flow of brine and gas through saline media*. Transport in Porous Media, 15, 271-293
- Sánchez, M. (2004). *Thermo-hydro-mechanical coupled analysis in low permeability media*. Ph.D. Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.
- Sánchez, M.; Gens, A.; Guimarães, L. do N.; Olivella, S. (2005). *A double structure generalized plasticity model for expansive materials*. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 29(8), 751–87.
- Sánchez, M.; Gens, A.; Guimarães, L.N.; Olivella, S. (2008). *Implementation algorithm of a generalised plasticity model for swelling clays*. Computers and Geotechnics, 35, 860-871.
- Sellin, P.; Leupin, O. (2013). *The use of clays as an engineered barrier in radioactive-waste management – a review*. Clay Clay Miner. 61 (6): 477–498. <https://doi.org/10.1346/CCMN.2013.0610601>
- Thorsager, P.; Börgesson, L.; Johannesson, L.E.; Sandén T. (2002). *Canister retrieval test, Report on installation*. International progress report 02-30. SKB, Stockholm.
- Thury, M.; Bossart, P. (1999). *The Mont Terri rock laboratory, a new international research project in a Mesozoic shale formation, in Switzerland*. Eng Geol., 52, 347–359.
- van Genuchten, R. (1978). *Calculating the unsaturated hydraulic permeability conductivity with a new closed-form analytical model*. Water Resour. Res., 37(11), 21–28.

- Vasconcelos, R.B. de (2021). *A double-porosity formulation for the THM behaviour of bentonite-based materials*. Ph.D. Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.
- Villar, M.V. (2002). *Thermo-hydro-mechanical characterization of a bentonite from Cabo de Gata. A study applied to the use of bentonite sealing material in high level radioactive waste repositories*. [Ph.D. Thesis]. ENRESA Technical Publication 01/2002, Madrid.
- Villar, M.V.; García-Siñeriz, J.L.; Bárcena, I.; Lloret, A. (2005). *State of the bentonite barrier after five years operation of an in situ test simulating a high level radioactive waste repository*. Eng. Geol. 80 (3–4), 175–198. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2005.05.001>.
- Villar M.V.; Iglesias R.J.; García-Siñeriz J.L. (2020a). *State of the in situ Febex test (GTS, Switzerland) after 18 years: a heterogeneous bentonite barrier*, Environmental Geotechnics 7(2), 147–159, <https://doi.org/10.1680/jenge.17.00093>
- Villar, M.V.; Iglesias, R.J.; García-Siñeriz, J.L.; Lloret, A.; Huertas, F. (2020b). *Physical evolution of a bentonite buffer during 18 years of heating and hydration*. Engineering Geology 264: 105408. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105408>
- Villar, M.V.; Iglesias, R.J.; Gutiérrez-Alvarez, C.; Carbonell, B. (2021). *Pellets/block bentonite barriers: laboratory study of their evolution upon hydration* (submitted for publication).
- Wang, G.; Wei, X. (2015). *Modeling swelling-shrinkage behavior of compacted expansive soils during wetting-drying cycles*. Canadian Geotechnical Journal, 52, 783-794