

## ANÁLISIS INTEGRADO DE LOS DATOS Y SOLUCIONES ANALÍTICAS PARA LA HIDRATACIÓN DE LA BARRERA DE ARCILLA DE UN ALMACENAMIENTO DE RESIDUOS

J. Samper<sup>1</sup>, A. Mon<sup>1</sup>, L. Montenegro<sup>1</sup>, B. Pisani<sup>1</sup>, M. V. Villar<sup>2</sup>, P. L. Martín<sup>2</sup>, J. M. Barcala<sup>2</sup>, A. M. Fernández<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Escuela de Caminos, Universidad de A Coruña, España, E-mail: jsamper@udc.es

<sup>2</sup>Centro de Investigaciones Energéticas, Medio Ambientales y Tecnológicas, Av. Complutense 22 - 28040 Madrid

**RESUMEN.** La gestión final de los residuos radiactivos de alta actividad contempla el almacenamiento geológico profundo (AGP) que se basa en la utilización de una barrera de ingeniería compuesta de materiales arcillosos no saturados. Son numerosos los ensayos de laboratorio realizados en muestras de diferentes tamaños, con diferentes duraciones, con hidratación en flujo paralelo y radial. También se han desarrollado en los últimos años sofisticados modelos que se han calibrado con datos de ensayos de escalas espaciales y temporales menores que las de la barrera de ingeniería de un AGP real. Para evaluar hasta qué punto los datos disponibles se pueden extrapolar en el espacio y a largo plazo en el tiempo, se han recopilado los resultados disponibles sobre la hidratación de la bentonita FEBEX en ensayos de hidratación y calentamiento realizados en celdas de 12 y 60 cm de longitud y del ensayo en maqueta a escala casi real. Estos datos se han analizado de forma integrada mediante la adimensionalización del volumen y del tiempo. Se han desarrollado soluciones analíticas para la hidratación de la arcilla en condiciones de flujo paralelo y flujo radial mediante el método de Green-Ampt. Las soluciones analíticas para la hidratación con flujo paralelo y radial muestran diferencias importantes. Las soluciones analíticas permiten reproducir las curvas de hidratación de la bentonita calculadas con un modelo numérico de flujo no isoterma multifásico mediante el ajuste de la conductividad hidráulica aparente. Los datos de volumen de agua en función del tiempo para los ensayos realizados en las celdas CT (12 cm de longitud), las celdas CG (60 cm) de duraciones comprendidas entre 6 meses y 7.5 años y los del ensayo de la maqueta (a escala real y con una duración de 14 años) muestran diferencias grandes para tiempos adimensionales pequeños, pero en general presentan una coherencia global entre sí. Se espera que esta integración permita completar el conocimiento actual del comportamiento de la barrera de arcilla.

**ABSTRACT.** The storage of high level radioactive waste is held in deep geological repositories. The disposal is based on a combination of engineered barriers made of unsaturated compacted bentonite. Laboratory experiments have been carried out at different space and time scales. Numerical models have been developed which were based on space-time scales smaller than those relevant for the actual clay barrier. The need to extrapolate from laboratory experiments to the long-term conditions of the actual barrier, has motivated the compilation of the heating and hydration experiments performed on FEBEX bentonite on

cells of 12 and 60 cm of length and the mock up experiment. These data have been analysed jointly by means of dimensionless volume and time. Analytical solutions based on the Green-Ampt method have been developed for bentonite hydration under parallel and radial flow conditions. The analytical solutions for parallel and radial flow show significant differences. Surprisingly, the analytical solutions reproduce the numerical solutions corresponding to nonisothermal multiphase flow conditions by just adjusting the apparent hydraulic conductivity. The measured data of volume versus time are globally coherent although they show large differences at early times. Data integration by means of dimensionless variables is expected to contribute to the understanding of the performance of the clay barrier.

### 1.- Introducción

La estrategia de gestión final para los residuos radiactivos de alta actividad (RRAA) aceptada en la actualidad internacionalmente es el almacenamiento geológico profundo (AGP). El AGP de RRAA se basa en el confinamiento e inmovilización temporal de los radionucleidos con el fin de evitar su migración hacia la biosfera. Para ello, el concepto de AGP utiliza el principio de barreras múltiples. Una de las barreras de ingeniería se compone de los materiales arcillosos de relleno y sellado que tienen una baja permeabilidad y una alta capacidad de retención de radionucleidos. Un aspecto clave del almacenamiento geológico profundo es el largo período de tiempo, cientos de miles de años, para el que es necesario demostrar que su funcionamiento no producirá un impacto no deseado a los seres vivos y al medio ambiente (Astudillo, 2001). Los ensayos de laboratorios facilitan el estudio del funcionamiento de los componentes de un AGP. La modelización numérica por otro lado permite realizar predicciones cuantitativas del funcionamiento a largo plazo de los componentes del AGP (Astudillo, 2001). El proyecto FEBEX (*Full-scale Engineered Barriers Experiment*) proporcionó una gran cantidad de datos sobre la barrera de ingeniería formada por bloques prefabricados de bentonita compactada a alta densidad. Este proyecto que se extendió desde 1996 hasta 2004 contribuyó al estudio de los procesos termo-hidro-mecánicos y químicos. Para ello se realizaron numerosos ensayos, incluyendo: el ensayo in situ en condiciones naturales y escala real en Grimsel (Suiza), un ensayo en maqueta a escala casi real en Madrid

(España) y ensayos de laboratorio.

En el proyecto europeo PEBS (*Long-term performance of Engineered Barrier Systems*) se estudia el comportamiento a largo plazo de la bentonita como barrera de ingeniería en el almacenamiento de residuos radiactivos en un AGP (PEBS, 2010). PEBS contempla la modelización de los ensayos realizados previamente en otros proyectos como NFPRO y FEBEX, y la actualización y calibración de modelos de nuevos datos obtenidos en PEBS. Los objetivos del proyecto PEBS son: 1) La extrapolación para la evolución a largo plazo del AGP tomando en consideración los escenarios normales, 2) La investigación de las incertidumbres de los modelos y sus efectos en las predicciones a largo plazo. Los modelos desarrollados hasta el momento se utilizarán para realizar predicciones a largo plazo de la evolución de la barrera de ingeniería. Se realizará una evaluación detallada de los procesos relevantes a largo plazo, sus incertidumbres y sus consecuencias. Se tiene previsto realizar: 1) La evaluación crítica de los resultados de los modelos ya existentes y sus implicaciones para diferentes escalas espacio-temporales incluyendo las condiciones a largo plazo; 2) La identificación de los procesos más significativos tanto en la fase de resaturación de la barrera de arcilla como después de dicha resaturación; 3) El desarrollo y la actualización de los modelos para incorporar los fenómenos que se identifiquen como relevantes para las predicciones a largo plazo; y 4) La evaluación de las incertidumbres de los modelos y sus efectos en las predicciones a largo plazo.

En este trabajo se aborda el estudio de la extrapolación en el tiempo del comportamiento de la barrera de arcilla mediante el análisis integrado de los datos disponibles de ensayos de laboratorio y a escala real y los resultados de los modelos numéricos. También se presentan soluciones analíticas para la hidratación de la arcilla en condiciones de flujo paralelo y flujo radial obtenidas mediante el método de Green-Ampt.

## 2.- Ensayos de laboratorio

La barrera de ingeniería de un AGP ha sido objeto de estudio de varios proyectos europeos de investigación. El primero de ellos fue el proyecto FEBEX (ENRESA, 2000). Este proyecto proporcionó una gran cantidad de datos sobre la barrera de ingeniería formada por bloques prefabricados de bentonita compactada a alta densidad. El proyecto contribuyó al estudio de los procesos termo-hidro-mecánicos y termo-hidro-geoquímicos (THC) y al desarrollo de sofisticados modelos y códigos de cálculo THM y THC (Zheng et al., 2005; Samper et al., 2008). Se realizaron numerosos ensayos, incluyendo: el ensayo *in situ* (cuyas dimensiones son similares a las de una unidad de almacenamiento del hipotético repositorio) en Grimsel (Suiza), un ensayo en maqueta (con dimensiones ligeramente menores a las del *in situ*) en Madrid (España) y toda una amplia batería de ensayos de laboratorio en muestras de diferentes tamaños y de diferentes duraciones.

Se hicieron ensayos de hidratación y calentamiento en los

que la muestra de arcilla se somete a hidratación forzada a presión en un extremo mientras se aplica una fuente de calor, generalmente a temperatura constante de 100 °C en el otro extremo. En los laboratorios del CIEMAT se han realizado ensayos de este tipo en muestras de diferentes tamaños y con diferentes duraciones.

Los ensayos en las celdas CT se realizan en bloques cilíndricos de bentonita FEBEX de 12 cm de largo y 15 cm de diámetro. La muestra está confinada en un cilindro de acero hermético. En la zona superior se mantiene una temperatura de 100°C y en la parte inferior se hidrata con agua granítica a una presión de 1 MPa. Después del ensayo de hidratación y calentamiento la celda se desmonta y se corta en rodajas que se utilizan para obtener los parámetros geoquímicos y físicos.

También se han realizado ensayos de hidratación y calentamiento en celdas de 60 cm de longitud, conocidas como celdas grandes, CG cuyo espesor de bentonita es casi similar al de un AGP. En un extremo se impone una temperatura de 100°C y en el otro extremo se hidrata a una presión de 1.2 MPa. Se realizaron ensayos diferentes con duraciones de 0.5, 2 y 7.5 años (Fernández y Villar, 2010).

El ensayo en maqueta es un ensayo a escala casi real que se realiza en el laboratorio de CIEMAT. Es uno de los principales ensayos del proyecto FEBEX en el que las condiciones de contorno están más controladas que en el ensayo *in situ*. La barrera de arcilla está formada por bloques de bentonita compactada a alta densidad con valores medios de 13.6% y 1.77 g/cm<sup>3</sup> de humedad gravimétrica y de densidad seca, respectivamente. La maqueta está compuesta de una corona circular de bentonita de 6 m de largo y de 0.795 m de radio exterior y 0.168 m de radio interior en el que se alojan los calentadores. El ensayo en maqueta se inició con el llenado de agua de todos los huecos entre bloques y entre éstos y la estructura confinante, mediante la inundación de la maqueta a una presión constante. Durante el llenado de agua se cerraron las juntas debido al hinchamiento de la bentonita. Se trata de un experimento con simetría axial. En el exterior la bentonita está sometida a una presión de agua de 550 kPa y en el interior la temperatura impuesta en la superficie de los calentadores es de 100°C. La succión inicial es de  $1.13 \cdot 10^5$  kPa. La instrumentación consta de 507 sensores para medir temperatura, humedad, presión de fluido, presión total, deformación de la estructura de confinamiento y presión de la inyección de agua. La etapa de calentamiento e hidratación comenzó el 4 de febrero de 1997 y se tiene previsto que continúe mientras siga operativa la instrumentación del sistema (Martín y Barcala, 2005).

## 3.- Solución analítica para la hidratación de la arcilla

La infiltración es el proceso mediante el cual el agua penetra desde la superficie del terreno hacia el suelo. La infiltración depende de la superficie y propiedades del suelo (porosidad y conductividad hidráulica) y de su contenido inicial de humedad,  $\theta_i$ . El método de Green y

Ampt proporciona una solución analítica aproximada de la infiltración (Fig. 1). El frente de saturación marca la frontera entre el suelo que tiene un contenido inicial de humedad  $\theta_i$  y el suelo saturado con un contenido de humedad  $\theta_s$ . El agua se encharca en la superficie una profundidad  $H$  constante, y en un tiempo  $t$ , el frente se encuentra a una profundidad  $z$ .

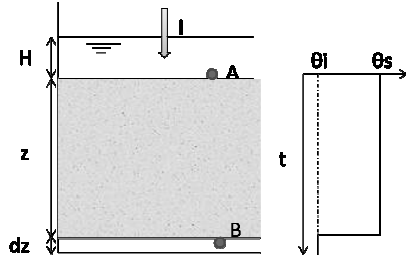


Fig. 1. Esquema de infiltración en un suelo según el método Green-Ampt.

Se considera una columna de suelo de área unidad. Sea el incremento de humedad entre el valor inicial y el de saturación definido por:  $\Delta\theta = \theta_s - \theta_i$ .

Planteando la ecuación de continuidad en un diferencial de tiempo  $dt$ , el volumen infiltrado  $qdt$  resulta ser igual a

$$qdt = dz\Delta\theta \quad (1)$$

donde  $dz$  es el avance del frente de saturación en un tiempo  $dt$ . Por otro lado, aplicando la ley de Darcy entre los puntos A y B en la Fig. 1 se tiene

$$q = K_s \frac{H - (-z - \psi)}{z} \quad (2)$$

donde  $K_s$  es la conductividad hidráulica del suelo,  $H$  es el encharcamiento del suelo en la superficie y  $\psi$  es la succión en la zona seca. Sustituyendo la Ecuación (2) en (1) se obtiene:

$$K_s \frac{H + z + \psi}{z} dt = \Delta\theta dz \quad (3)$$

Integrando esta ecuación se tiene:

$$\frac{K_s}{\Delta\theta} t = z - (H + \psi) \left[ \ln\left(1 + \frac{z}{H + \psi}\right) \right] \quad (4)$$

Esta ecuación se puede resolver de manera iterativa mediante:

$$z^{(m+1)} = \frac{K_s}{\Delta\theta} t + (H + \psi) \left[ \ln\left(1 + \frac{z^{(m)}}{H + \psi}\right) \right] \quad (5)$$

Una vez calculada la profundidad del frente en un determinado tiempo, la infiltración se calcula con la Ecuación (2).

La solución de Green-Ampt se ha aplicado también al estudio de la hidratación de la bentonita tanto en condiciones de flujo paralelo o radial. En primer lugar se describe el flujo paralelo, considerando una columna de bentonita de área transversal  $A$ , que se hidrata a una presión constante correspondiente a una altura  $H$  (Fig. 2). El caudal de hidratación,  $q$ , se introduce por la superficie inferior de la columna de bentonita. La ecuación de continuidad establece que:

$$Aqdt = A\Delta\theta dz \quad (6)$$

Por otro lado se aplica la ecuación de Darcy entre dos puntos A y B. Puesto que la presión de inyección  $H$  y la succión inicial  $\psi$  son mucho mayores que la penetración  $z$ , el avance del frente se reduce a:

$$z^2 = 2K \frac{(H + \psi)}{\Delta\theta} t \quad (7)$$

El caudal de hidratación viene dado por:

$$q = \sqrt{\frac{K(H + \psi)\Delta\theta}{2t}} \quad (8)$$

El volumen acumulado de agua tomado por la bentonita,  $V$ , se calcula integrando  $q$  a lo largo del contorno

$$V = A \int_0^t q(\tau) d\tau = A \sqrt{2K(H + \psi)\Delta\theta} t \quad (9)$$

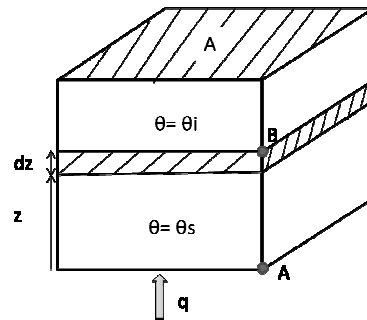


Fig. 2. Esquema de hidratación de la bentonita en condiciones de flujo paralelo.

El volumen y el tiempo adimensionales,  $V_D$  y  $t_D$ , se definen mediante:

$$V_D = \frac{V}{V_c} = \frac{V}{AL\Delta\theta} \quad (10)$$

$$t_D = \frac{t}{t_c} = \frac{t}{\frac{\Delta\theta L^2}{K(H + \psi)}} = \frac{K(H + \psi)t}{\Delta\theta L^2} \quad (11)$$

donde  $L$  es la longitud de la columna y  $V_c$  y  $t_c$  son los valores característicos del volumen y del tiempo. El volumen característico es el volumen de agua necesario para saturar la columna de bentonita. Por tanto,  $V_D = 1$  cuando  $z = L$  en el momento en que se satura la columna. En variables adimensionales se obtiene:

$$V_D = \sqrt{2t_D} \quad (12)$$

De acuerdo con el diseño propuesto por ENRESA para el almacenamiento de residuos radiactivos en rocas cristalinas la barrera de bentonita tiene forma de corona circular con un radio interno  $R_i$  y un radio externo  $R_e$ . En este caso la bentonita se hidrata bajo condiciones de flujo radial (Fig. 3).

Aplicando la ecuación de continuidad, el agua almacenada dentro de una corona de espesor  $dz$  es igual al volumen de hidratación que entra en un tiempo  $dt$ :

$$2\pi R_e qdt = 2\pi(R_e - z)\Delta\theta dz \quad (13)$$

Aplicando la Ley de Darcy entre el punto A situado en la superficie externa de la barrera y el punto B situado en el lado seco del frente de saturación, se obtiene:

$$q = K \frac{(H + \psi)}{z} \quad (14)$$

Sustituyendo  $q$  en la ecuación de continuidad, integrando la ecuación diferencial resultante entre  $(0,0)$  y  $(t, z)$  se obtiene:

$$z^2 \left( 1 - \frac{2z}{3R_e} \right) = 2K \frac{(H+\psi)}{\Delta\theta} t \tag{15}$$

Esta es una ecuación de tercer grado en  $z$  que se puede resolver de varias formas. Su resolución con un método iterativo de Picard puede conducir a errores numéricos. Un segundo método se basa en resolver la ecuación en términos de la variable  $t$  en función de  $z$ . La tercera forma consiste en resolver de forma directa la ecuación de tercer grado utilizando el cambio de variable de la fórmula de Cardano (Angulo, 1996). A partir de  $z$  se calcula el caudal unitario  $q$ . Finalmente, el volumen acumulado se obtiene integrando numéricamente  $q$ .

Las soluciones analíticas correspondientes a hidratación con flujo paralelo (Ecuación 7) y radial (Ecuación 15) muestran diferencias importantes. Ambas soluciones coinciden para valores pequeños de  $z$ , sin embargo para valores grandes de  $z$  son diferentes. Estas diferencias deben ser tenidas en cuenta en el momento de extrapolar los resultados obtenidos en celdas con flujo radial a la barrera de ingeniería del AGP.

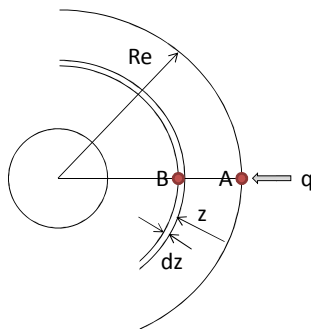


Fig. 3. Hidratación de la bentonita en condiciones de flujo radial.

#### 4.- Comparación de la solución analítica con la numérica

Para en el ensayo de la celda CT23 se ha utilizado un modelo 1D con flujo paralelo. La secuencia de acontecimientos simulada consta de las siguientes etapas. Una vez montada la celda se inicia su calentamiento por la parte superior hasta alcanzar una temperatura de 100° C. Por el extremo inferior se introduce agua a una presión de 1000 kPa sin dejar salir gas. El gas se encuentra inicialmente a presión atmosférica y a una temperatura de 20° C. El contorno superior es impermeable al líquido y al gas. El contorno inferior se supone impermeable al gas. La succión inicial considerada en la zona no saturada del frente de hidratación es de 112.41 MPa. La conductividad hidráulica se ha calculado mediante:

$$K = \frac{k^i \rho g}{\mu} \tag{16}$$

donde  $k^i$  es la permeabilidad intrínseca del líquido,  $\rho$  es la densidad del agua que se ha tomado constante e igual a

988,2 kg/m<sup>3</sup> y  $\mu$  es la viscosidad que se calcula en función de la temperatura mediante:

$$\mu = 0.6612(T - 229)^{-1.562} \tag{17}$$

Se toma una temperatura de referencia de 20°C.

La solución numérica se ha obtenido con el código INVERSEFADES V2 (Zheng et al., 2010). La Fig. 4 muestra la comparación de la solución numérica y la analítica. La solución analítica predice que la saturación en la celda se produce antes que lo que indica la solución numérica. Se puede apreciar que las pendientes de las curvas de ambos métodos son similares. Se ha calibrado la conductividad hidráulica aparente para que la solución analítica reproduzca la solución numérica. El valor calibrado es igual a  $0.7 \cdot 10^{-14}$  m/s que resulta ser algo menor que el inicialmente adoptado de  $2.68 \cdot 10^{-14}$ .

Se ha realizado la comparación de las soluciones para flujo radial (Fig. 5). En este caso se ha utilizado la solución numérica de INVERSE-FADES V2 de Zheng y Samper (2008) para el ensayo de la maqueta. Los resultados son similares a los de la celda CT. El valor calibrado de la conductividad hidráulica en este caso es de  $1.17 \cdot 10^{-14}$  m/s.

Por tanto, las soluciones analíticas obtenidas con el método de Green-Ampt reproducen las curvas de hidratación de la bentonita calculadas con un modelo numérico de flujo no isoterma multifásico mediante el ajuste de la conductividad hidráulica aparente. Es realmente sorprendente que la solución analítica de Green-Ampt basada en unas hipótesis tan restrictivas reproduzca bien el comportamiento de la solución numérica.

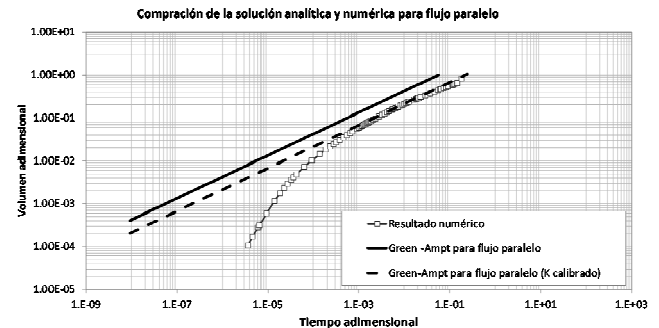


Fig. 4. Comparación de la solución de Green-Ampt para flujo paralelo y la numérica de INVERSEFADES para la celda CT. Se muestran las soluciones analíticas para dos valores de la conductividad hidráulica.

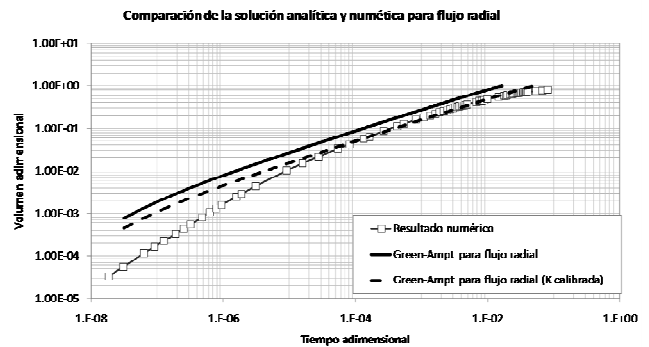


Fig. 5. Comparación de la solución analítica de Green-Ampt con radial y la solución numérica de INVERSEFADES para el ensayo en maqueta. Se muestran las soluciones analíticas para dos valores de la conductividad hidráulica.

**5.- Análisis integrado de los datos de diferentes ensayos**

Se ha realizado un análisis integrado de los datos de varias celdas de diferentes tamaños y duraciones (Fig. 6). La Tabla 1 muestra las características de las celdas y los valores de los parámetros en los ensayos de hidratación y calentamiento en las celdas CT, las celdas grandes, CG, y el ensayo en maqueta. Se indican los valores del diámetro y la longitud L de las celdas con flujo paralelo. Para el ensayo en maqueta se indica el espesor de bentonita (0.625 m). Se han incluido además los valores la maqueta, la duración de cada ensayo, el volumen total de agua inyectado, el volumen estimado de las juntas entre bloques y de otros huecos y el volumen total de agua que podría absorber la bentonita.

Los datos de volumen de agua en función del tiempo se han analizado en términos de variables adimensionales de acuerdo con:

$$V_D = \frac{4V}{\pi D^2 L \Delta \theta} \quad \text{para flujo paralelo} \quad (18)$$

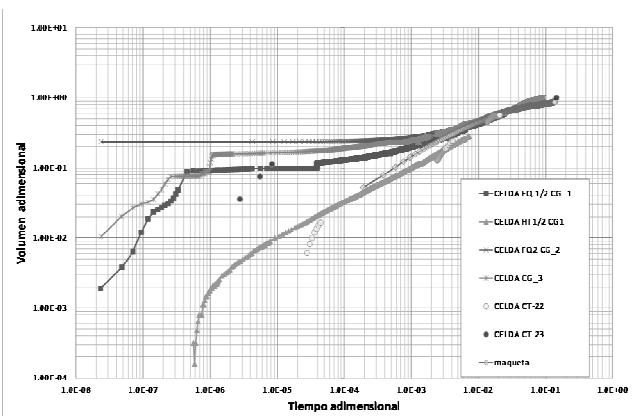
$$V_D = \frac{V}{\pi(R_c^2 - R_i^2)L \Delta \theta} \quad \text{para flujo radial} \quad (19)$$

$$t_D = \frac{Kt}{\rho g \alpha L^2} \quad (20)$$

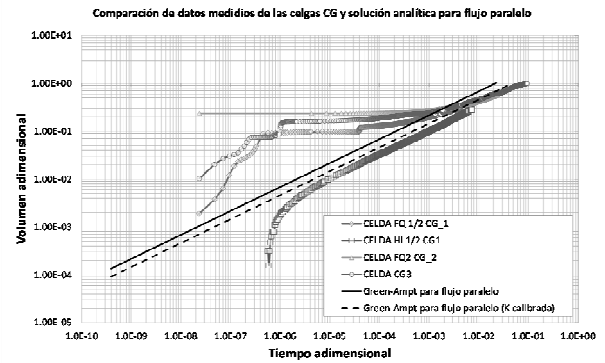
donde  $\alpha$  es la compresibilidad de la bentonita cuyo valor se indica en la Tabla 1.

Los datos para los ensayos realizados en las celdas CT (12 cm de longitud), en las celdas CG (60 cm) de duraciones variables entre 6 meses y 7.5 años y los del ensayo de la maqueta muestran una coherencia global entre sí (Fig. 8). Existen grandes diferencias para tiempos adimensionales pequeños que son debidas a efectos espurios asociados a detalles experimentales debidos a: 1) Cortes de suministro eléctrico que pueden paralizar la hidratación; y 2) Relleno de los huecos entre juntas. Estas diferencias disminuyen con el tiempo.

Los datos de volumen en función del tiempo de las celdas grandes CG se ajustan muy bien a la solución analítica obtenida con el método de Green-Ampt usando una conductividad hidráulica algo mayor que la correspondiente a la bentonita saturada (Fig. 7).



**Fig. 6 .** Curvas de volumen infiltrado en función del tiempo para los ensayos en: 1) Celdas de 12 cm de longitud (celdas CT); 2) Celdas grandes de 60 cm (celdas CG) y 3) Ensayo en maqueta.



**Fig. 7.** Curvas de volumen infiltrado en función del tiempo para los ensayos en las celdas grandes de 60 cm de diferentes duraciones. Se muestra también la solución obtenida con el método de Green-Ampt.

**6.- Conclusiones**

Para valorar la posibilidad de extrapolar en el espacio y a largo plazo en el tiempo los resultados disponibles sobre la hidratación de la bentonita FEBEX se ha realizado: 1) La recopilación de los datos disponibles de entradas de agua en ensayos de hidratación y calentamiento realizados en celdas de 12 y 60 cm de longitud y del ensayo en maqueta a escala casi real; 2) La integración de dichos datos mediante la adimensionalización del volumen y del tiempo; 3) La obtención de soluciones analíticas para la hidratación de la arcilla en condiciones de flujo paralelo y flujo radial mediante el método de Green-Ampt. Las soluciones analíticas para hidratación con flujo paralelo y radial muestran diferencias importantes que deben ser tenidas en cuenta antes de extrapolar los resultados de las celdas con flujo radial a la barrera de ingeniería del AGP. Las soluciones analíticas obtenidas con el método de Green-Ampt permiten reproducir las curvas de hidratación de la bentonita calculadas con un modelo numérico de flujo. Los datos medidos de volumen de agua tomada en función del tiempo en los ensayos en las celdas CT, las celdas CG de duraciones variables entre 6 meses y 7 años y medio y los del ensayo en maqueta muestran una coherencia global entre sí. Existen grandes diferencias para tiempos adimensionales pequeños que son debidas a efectos espurios asociados a problemas experimentales. Las diferencias se reducen al aumentar el tiempo. Los datos de volumen de agua en función del tiempo para los ensayos realizados en las celdas grandes CG se ajustan muy bien a la solución analítica obtenida con el método de Green-Ampt usando una conductividad hidráulica mayor que la correspondiente a bentonita saturada. Los trabajos que se han presentado aquí se podrían mejorar: 1) Extendiendo la solución de Green-Ampt considerando redistribución de humedad; 2) Desarrollando soluciones analíticas para otras variables como la temperatura y las concentraciones de especies disueltas; 3) Incluyendo más ensayos de laboratorio realizados en muestras todavía más pequeñas, cuyos datos no se han conseguido todavía. Se espera que esta integración permita completar el conocimiento actual del comportamiento de la barrera de arcilla.

**Tabla 1.** Características de los experimentos de hidratación y calentamiento en las celdas CT, celda grandes, CG, y el ensayo en maqueta. Se indican el diámetro, la longitud L de las celdas con flujo paralelo y el espesor de la maqueta, la duración de cada ensayo, el volumen total de agua inyectado, el volumen estimado de las juntas entre bloques y de otros huecos, el volumen total de agua que podría absorber la bentonita.

	Celda CT-22	Celda CT-23	Celda FQ1/2CG1	H11/2CG1	Celda CG2	Celda CG3	Maqueta
Tipo de flujo	paralelo	paralelo	paralelo	paralelo	paralelo	paralelo	radial
Duración del ensayo (d)	26	183	188	214	762	2775	5110
Entrada de agua total en ensayo (L)	0.275	0.486	0.171	0.128	0.280	0.461	1120
Volumen de juntas (L)	0.136	0.136	0.06	0.06	0.06	0.06	650
Volumen de agua (L)	0.486	0.486	0.4837	0.4476	0.4776	0.461	1294
Diámetro (m)	0.15	0.15	0.07	0.07	0.07	0.07	1.59
Longitud (m)	0.12	0.12	0.6	0.6	0.6	0.6	0.625
Porosidad	0.39	0.39	0.4	0.4	0.4	0.4	0.41
Humedad inicial	0.226	0.226	0.216	0.232	0.219	0.226	0.351
Presión de inyección (KPa)	1000	1000	1200	1200	1200	1200	550
Conductividad hidráulica (m/s)	$3 \cdot 10^{-14}$	$3 \cdot 10^{-14}$	$3.2 \cdot 10^{-14}$	$3.2 \cdot 10^{-14}$	$3.2 \cdot 10^{-14}$	$3.2 \cdot 10^{-14}$	$2.78 \cdot 10^{-14}$
Densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> )	1.65	1.65	1.64	1.67	1.66	1.64	1.65
Compresibilidad de la bentonita (Pa <sup>-1</sup> )	$2.3 \cdot 10^{-8}$	$2.3 \cdot 10^{-8}$	$2.3 \cdot 10^{-8}$	$2.3 \cdot 10^{-8}$	$2.3 \cdot 10^{-8}$	$2.3 \cdot 10^{-8}$	$2.3 \cdot 10^{-8}$
Tiempo característico (d)	$1.25 \cdot 10^4$	$1.25 \cdot 10^4$	$2.93 \cdot 10^4$	$2.93 \cdot 10^4$	$2.93 \cdot 10^4$	$2.93 \cdot 10^4$	$3.66 \cdot 10^4$

*Agradecimientos.* Este trabajo ha sido financiado por un Proyecto Europeo (PEBS, FP7-232632) del VII Programa Marco Europeo, la Empresa Nacional de Residuos Radiactivos (ENRESA) y un proyecto de la Xunta de Galicia (10MDS118028PR). Se agradece el apoyo de Juan Carlos Mayor (ENRESA) y las contribuciones de las personas que participaron en el proyecto FEBEX y otras como Liange Zheng que contribuyeron al desarrollo del código INVERSE FADESV2.

## 8.- Referencias

- Angulo, A. (1996). Ecuaciones de tercer grado gráficos y tablas para su resolución. Revista de Obras Públicas, 3351,41-54.
- Astudillo, J. (2001). El almacenamiento geológico profundo de los residuos de alta actividad. Principios básicos y tecnología. ENRESA, 200 pp.
- Fernández, A.M. y Villar, M.V. (2010). Geochemical behaviour of a bentonite barrier in the laboratory after up to 8 years of heating and hydration, *Appl Geochem*, 25(6): 809-824.
- ENRESA (2000) Full-scale engineered barriers experiment for a deep geological repository for high-level radioactive waste in crystalline host rock (FEBEX Project). EUR 19147EN.
- Martín P.L., y Barcala, J.M. (2005) Large scale buffer material test: Mock-up experiment at CIEMAT. *Engineering Geology* 81(3): 298-316.
- PEBS (2010). Long-term performance of Engineered Barrier Systems, Research Project funded by the European Commission, Grant Agreement FP7 249681.
- Samper J., Zheng, L., Montenegro, L., Fernández, A.M. y Rivas, P. (2008). Coupled thermo-hydro-chemical models of compacted bentonite after FEBEX in situ test, *Appl Geochem*, 23/5: (1186-1201).
- Zheng L. y Samper J. (2008.) A coupled THMC model of FEBEX mock up test. *Physics and Chemistry of the Earth*. 33 S486-S498.
- Zheng L., Samper, J. y Montenegro, L. (2005) Inverse problem of non-isothermal multiphase flow and reactive transport in deformable media, En: *VII Jornadas de Zona no Saturada, ZNS'05*, Coruña, 307-312.
- Zheng L., Samper, J., Montenegro, L., Fernández, A.M.(2010). A coupled THMC model of a heating and hydration laboratory experiment in unsaturated compacted FEBEX bentonite, *Journal of Hydrology*, 386 (3-4): 80-94.