

## MODELACIÓN DE FLUJO MULTIFASE EN ENSAYOS DE EVAPORACIÓN EN COLUMNA DE HORMIGÓN

M.C. Chaparro<sup>1</sup>, M.W. Saaltink<sup>1</sup>, M.V. Villar<sup>2</sup>

<sup>1</sup> GHS, Departamento de Ingeniería del Terreno, UPC. Universitat Politècnica de Catalunya. BarcelonaTech, Jordi Girona 1-3 / Edificio D2 08034 Barcelona España, m.carme.chaparro@upc.edu, maarten.saaltink@upc.edu

<sup>2</sup> CIEMAT, Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, Avda. Complutense 22 28040 Madrid España, mv.villar@ciemat.es

**RESUMEN.** Se han simulado ensayos de evaporación en dos columnas de hormigón (B y C), con el objetivo de caracterizar mejor las propiedades del hormigón del Centro de Almacenamiento de residuos radioactivos de El Cabril y los procesos de evaporación. El modelo conceptual considera flujo de agua líquida no saturada y flujo de vapor. El agua sale de la columna en forma de vapor únicamente por la parte superior de la columna de hormigón debido a la diferencia de humedad relativa y temperatura entre la columna y el laboratorio. A partir de datos de humedad gravimétrica y humedad relativa en la columna C se ha obtenido una curva de retención ( $P_0 = 7\text{MPa}$  y  $\lambda = 0.3$ ). Se ha calibrado el modelo de la columna C ajustándolo a los datos experimentales de la humedad relativa y pérdida de masa de agua, obteniendo los valores de permeabilidad relativa ( $\lambda = 0.203$ ) y de la tortuosidad en la difusión de vapor ( $\tau = 0.078$ ). Utilizando estos parámetros hidráulicos, se ha simulado el ensayo de evaporación de la columna B para verificar el modelo numérico. Finalmente, se ha realizado un análisis de sensibilidad a las variaciones de los valores de la permeabilidad relativa y la tortuosidad en la difusión de vapor.

**ABSTRACT.** Simulations of evaporation tests in concrete columns (B and C) have been carried out to characterize better the concrete properties of the *El Cabril* Radioactive Waste Disposal Facility and the evaporation process. The conceptual model considers unsaturated liquid flow and vapour flow. Water leaves the column as vapour only at the top of the column, due to the difference of relative humidity and temperature between the column and the laboratory. A retention curve has been calculated from the gravimetric humidity and relative humidity in column C. The model has been calibrated with experimental data of relative humidity and water loss, obtaining a value of relative permeability and a tortuosity of vapour diffusion. These hydraulic parameters have been used to simulate a test in column B in order to check the numeric model. Finally, a sensitivity analysis has been made on the variations in the values of the relative permeability and tortuosity.

### 1.- Introducción

El Cabril es la instalación de almacenamiento de residuos radiactivos de baja y media actividad de España y se encuentra en la provincia de Córdoba. Desde el verano de

2003 se recoge agua del desagüe de algunas celdas de almacenamiento. El Grupo de Hidrología Subterránea de la UPC postuló una hipótesis basada en el mecanismo de flujo capilar y de vapor que explica la salida del agua del desagüe de la celda 16 a partir de los procesos de evaporación y condensación en el hormigón, mediante modelos numéricos (Saaltink et.al. 2005; Massana y Saaltink, 2006). Para corroborar esta hipótesis se han instrumentado dos celdas y se han realizado ensayos de laboratorio para la caracterización termo-hidráulica del hormigón que se utiliza para construir las celdas de almacenamiento, entre los cuales se han realizado ensayos de evaporación en columnas de hormigón (Villar et al. 2009).

En la literatura se encuentran trabajos similares donde se realizan ensayos para determinar las curvas de retención de muestras de hormigón de pequeñas dimensiones, fijando la humedad relativa y midiendo el contenido volumétrico de agua o mediante porosimetría de mercurio (Leech et. al. 2006; Baroghel-Bouny, 2007; Carlier y Burlion, 2011). En el presente trabajo, se determina la curva de retención del hormigón de El Cabril a partir de ensayos de evaporación en columna de hormigón, realizados en las condiciones del laboratorio. Las columnas tienen en su interior sensores que miden la temperatura y la humedad relativa en función del tiempo. Además, se han analizado los resultados de estos ensayos de evaporación mediante modelos numéricos unidimensionales.

Los parámetros hidráulicos obtenidos a partir de los modelos de los ensayos de evaporación, junto con los datos de instrumentación de las dos celdas, se utilizarán para modificar el modelo bidimensional de la celda con el fin de poder aplicar condiciones de contorno y procesos diferentes en cada uno de los muros de la estructura.

### 2.- Ensayos experimentales

A partir de la caracterización hidráulica del hormigón del C. A. El Cabril realizada por CIEMAT (Villar et. al. 2009), se ha obtenido la permeabilidad intrínseca del hormigón con un valor de  $4.2 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ . También se han realizado ensayos donde se han determinado curvas de retención preliminares, se obtiene una curva de retención para el secado y otra para el mojado. Se han realizado ensayos de evaporación con el fin de determinar la permeabilidad relativa mediante la modelación y la

calibración de estos ensayos.

Los ensayos de evaporación se realizaron en dos columnas de hormigón (B y C), cada una está impermeabilizada por un molde de PVC de 20 cm de altura y 8.5 cm de diámetro interno y con una tapa en la parte inferior de la misma. En estos moldes, se vertió el hormigón dejando cinco alojamientos de 5 cm longitud y 0.8 cm de diámetro dispuestos en distintas alturas para introducir los sensores. Son sensores capacitivos de humedad relativa y temperatura Sensirion SHT75 y tienen un error del +/- 2% pero de +/- 4% en los extremos de humedad relativa. También se colocó un sensor exterior para registrar las condiciones del laboratorio. Cada columna se colocó sobre una balanza que medía en continuo y permitía obtener datos periódicamente (Fig.1).

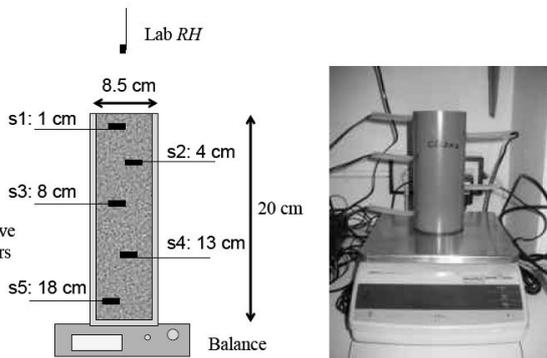


Fig.1. Esquema y aspecto del dispositivo de ensayos de evaporación

Las medidas de humedad relativa (RH) registradas por los sensores se convirtieron en succión aplicando la ley psicrométrica:

$$H_r = \exp\left(\frac{-M^w(P_g - P_l)}{RT\rho_l}\right) \quad (1)$$

siendo  $M^w$  el peso molecular del agua ( $0.018 \text{ kg mol}^{-1}$ ),  $R$  la constante de los gases ideales ( $8.31 \text{ J mol}^{-1}\text{K}^{-1}$ ),  $P_g$  y  $P_l$  son la presión de gas y líquido respectivamente en Pa y  $T$  es la temperatura en K.

La pérdida de masa de agua se calculó por diferencia respecto al peso inicial de la columna.

Las columnas se desmontaron cuando se consideró que se había llegado al estado estacionario, entonces, se cortaron en cinco secciones horizontales en las que se determinó la humedad gravimétrica.

### 3.- Modelo numérico

Se ha realizado un modelo numérico para la columna C donde se ha estimado la curva de retención a partir de los datos experimentales, se ha calibrado la permeabilidad relativa ( $\lambda$ ) y la tortuosidad en la difusión de vapor mediante el ajuste de la presión de líquido medida por los sensores en el interior de la columna. Los parámetros hidráulicos obtenidos se han utilizado para simular el

ensayo de la columna B con el fin de verificar el modelo numérico. El código utilizado ha sido el CODE\_BRIGHT Olivella et al. (1996).

#### 3.1.- Modelo conceptual

El modelo conceptual se basa en considerar la columna de hormigón como un medio poroso no saturado formado por 3 fases. La fase sólida tiene el hormigón como único componente, la fase gas está formada por dos componentes, el aire seco y el vapor de aire, y la fase líquida está formada por agua. Se considera que la presión de gas es constante e igual a la de la atmósfera. El vapor sale hacia la atmósfera únicamente por la parte superior de la columna de hormigón. La evaporación se produce debido a la humedad relativa y la temperatura en el laboratorio.

#### 3.2.- Geometría y discretización espacial

El modelo numérico es unidimensional, su geometría refleja la longitud de la columna. La discretización espacial se ha realizado mediante una malla formada por 50 nodos y 49 elementos y está más refinada por la parte superior ya que es por donde se produce la evaporación.

#### 3.3.- Curva de retención

Se ha estimado una curva de retención del hormigón a partir de la succión en los sensores en el interior de la columna C y la humedad gravimétrica medida al final del ensayo, ajustándose al modelo de van Genuchten (1980):

$$S_e = \frac{S_l - S_{rl}}{S_{ls} - S_{rl}} = \left( 1 + \left( \frac{P_g - P_l}{P} \right)^{\frac{1}{1-\lambda}} \right)^{-\lambda} \quad (2)$$

$$P = P_o \frac{\sigma}{\sigma_o}$$

siendo  $P$  la presión de entrada de aire,  $P_o$  la presión medida a cierta temperatura,  $\sigma_o$  la tensión superficial a la temperatura a la cual se ha medido  $P_o$ ,  $S_e$  la saturación efectiva,  $S_l$  la saturación de líquido,  $S_{ls}$  y  $S_{rl}$  son la saturación máxima y residual respectivamente y  $\lambda$  es el parámetro de forma.

La curva de retención obtenida se compara con los datos de succión y humedad gravimétrica de la columna B (Fig. 1). Se ha obtenido un valor de  $P_o = 7 \text{ MPa}$  y una  $\lambda = 0.3$ .

Para ajustar la curva de retención, también se utiliza la humedad gravimétrica inicial y final total en toda la columna de hormigón. En primer lugar, se calcula la saturación inicial total en la columna utilizando la malla del modelo numérico. A partir de los valores de presión capilar inicial medidos experimentalmente en cada sensor, se hace una interpolación o extrapolación lineal en cada nodo de la malla y se calcula la saturación de líquido en cada elemento (Ecuación 2), teniendo en cuenta que  $P$  y  $\lambda$  son los parámetros que se utilizan para ajustar la curva de retención. A partir del sumatorio de la saturación de

líquido en cada elemento de la malla se obtiene la saturación inicial total en la columna. La saturación final en la columna de agua se obtiene mediante la diferencia entre la saturación inicial calculada y la pérdida de masa de agua en la columna. A partir de los valores de saturación inicial y final obtenidos se calcula la humedad gravimétrica inicial y final en la columna. Los valores de humedad gravimétrica inicial y final calculados mediante la curva de retención son muy parecidos a los valores obtenidos experimentalmente.

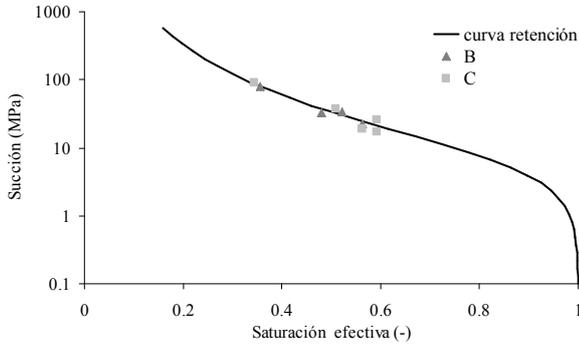


Fig. 2. Curva de retención del hormigón del C.A. El Cabril y saturación efectiva final de los sensores en el interior de las columnas B y C.

### 3.4.- Condiciones de contorno

Para realizar el modelo numérico se han tenido en cuenta las condiciones de contorno para el balance de masa de agua y el balance de energía. Se fija la temperatura en función del tiempo en todos los nodos de la columna (Fig. 2). El gradiente de temperatura en el interior de la columna es tan pequeño que se considera una temperatura constante a lo largo de la columna.

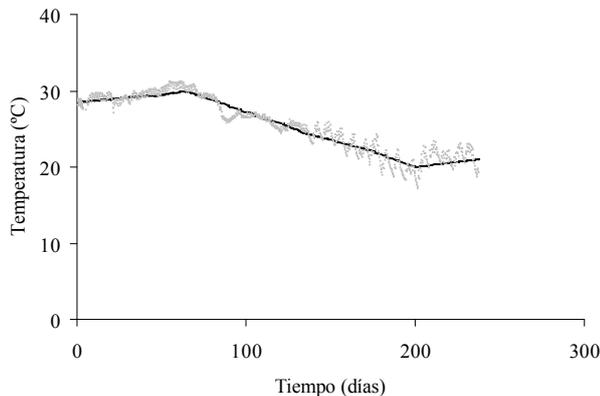


Fig. 3. Evolución de la temperatura, valores experimentales (puntos) y calculados (línea).

En la superficie de la columna se aplica una condición de contorno mixta, que refleja un flujo de vapor en función de la diferencia de densidad de vapor ambiente y la de la superficie de la columna:

$$j_g^w = \beta_g \left[ (\rho_g \omega_g^w)^0 - (\rho_g \omega_g^w) \right] \quad (3)$$

Donde  $( )^0$  indica valores externos,  $j_g^w$  es el flujo de agua en

fase gas,  $\omega_g^w$  es la fracción másica de agua en el gas,  $\rho_g$  es la densidad del gas ( $1.12 \text{ kg/m}^3$ ) y  $\beta_g$  es un coeficiente de intercambio entre el vapor de la columna y del ambiente. A este coeficiente se le asignó un valor de  $1 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$  que es un valor bajo en comparación con valores obtenidos en experimentos similares aproximadamente de  $1 \cdot 10^{-2}$  (Gerard et. al. 2010; Gran et. al. 2011). El valor de  $\beta_g$  de  $1 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$  era suficientemente alto para fijar la densidad de vapor en la superficie y no afecta los resultados obtenidos por el modelo numérico. La densidad de vapor externa,  $(\rho_g \omega_g^w)^0$ , cambia con el tiempo (Fig.4).

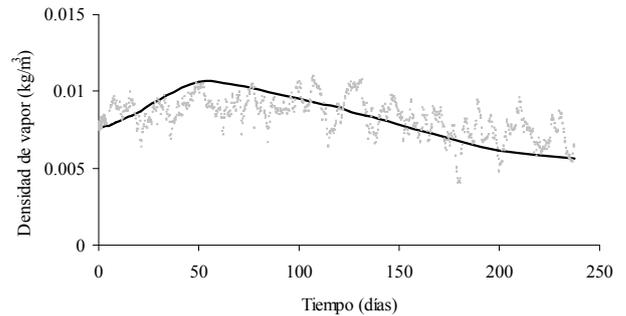


Fig. 4. Evolución de la densidad de vapor de agua, valores experimentales (puntos) y utilizados en el modelo (línea)

### 3.5.- Condiciones iniciales

La presión de líquido inicial se obtuvo interpolando o extrapolando los datos de los sensores, obteniendo una presión de líquido inicial, que varía entre -14.9 y -39.9 MPa. La temperatura inicial es de  $28.5^\circ\text{C}$  en todos los sensores.

## 4.- Resultados y verificación del modelo numérico

### 4.1.- Valores estimados a partir de la calibración

Los valores estimados a partir de la calibración corresponden a la  $\lambda$  de la permeabilidad relativa y la tortuosidad en la difusión de vapor. De acuerdo con el modelo de Mualem-van Genuchten:

$$k_{rl} = \sqrt{S_e} \left( 1 - (1 - S_e^{1/\lambda})^\lambda \right)^2 \quad (4)$$

Siendo  $k_{rl}$  la permeabilidad relativa de la fase líquida.

El valor de  $\lambda$  en la permeabilidad relativa que se ha obtenido es de 0.203, valor inferior al utilizado en la curva de retención. Esta diferencia de  $\lambda$  podría ser debida a que no se ha tenido en cuenta la histéresis en la curva de retención, ya que la histéresis puede cambiar la curva de retención (y el valor de  $\lambda$  que la describe según Ec. 2) pero no afecta a la  $\lambda$  de la permeabilidad relativa (y el valor de  $\lambda$  que la describe según Ec. 4)

La difusión de vapor se ha expresado mediante la ley de Fick (Olivella et al. 1996) y se ha obtenido un valor de tortuosidad de 0.078:

$$\mathbf{i}_g^v = -(\tau \phi \rho_g S_g D_m^v \mathbf{I}) \nabla \omega_g^v \quad (5)$$

Donde  $\mathbf{i}_g^v$  es el flujo difusivo,  $S_g$  es el grado de saturación de la fase gas,  $D_m^v$  es el coeficiente de difusión molecular de vapor ( $m^2 s^{-1}$ ),  $\omega_g^v$  es la fracción másica de vapor de agua en el gas y  $\tau$  es la tortuosidad, una constante que tiene en cuenta que en un medio poroso el camino de difusión es más largo que en un gas puro.

#### 4.2.- Presión de líquido

En la Fig. 3 se muestra la evolución de la presión de líquido en la columna C para cada sensor, se comparan los datos experimentales con las presiones de líquido calculadas con el modelo numérico.

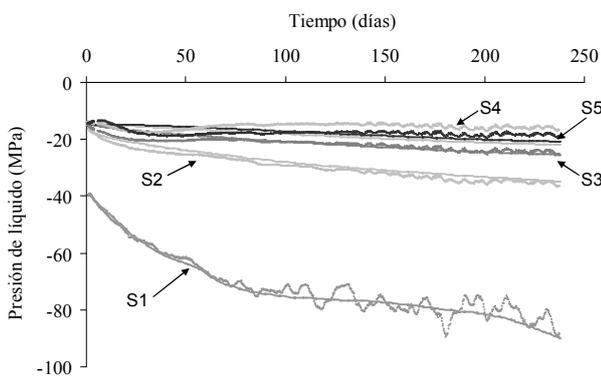


Fig.5. Evolución de la presión de líquido en la columna C, valores experimentales (puntos) y calculados (líneas). La posición de los sensores se indica en la Fig. 1.

Se observa que la presión de líquido calculada no simula las fluctuaciones presentes en la presión de líquido experimental, debido a que para las condiciones de contorno utilizadas en el modelo numérico no se han utilizado los datos diarios sino que se simplifica utilizando los más representativos para simular la misma tendencia.

El sensor 1, que es el sensor más próximo a la superficie de la columna y por lo tanto el que está más afectado por la evaporación, es el que se ajusta mejor a los datos experimentales de presión de líquido.

Se observa que el modelo numérico tiende a evaporar más la parte superior de la columna dejando más saturada la parte inferior y por lo tanto la presión de líquido calculada en el sensor 4 es inferior a la del 5. En cambio, en el ensayo experimental el sensor 4, ubicado a una distancia de 13 cm con respecto a la superficie, tiene una presión de líquido superior que el sensor 5 situado a una distancia de 18 cm. Una posible explicación para este comportamiento es que la perforación realizada para introducir el sensor no está perfectamente sellada.

#### 4.3.- Masa evaporada

La pérdida de agua total en la columna de hormigón calculada a partir del modelo numérico es de  $3.69 \text{ kg/m}^2$  y se ajusta a la pérdida de masa de agua en función del tiempo

medida durante el ensayo experimental (Fig.6).

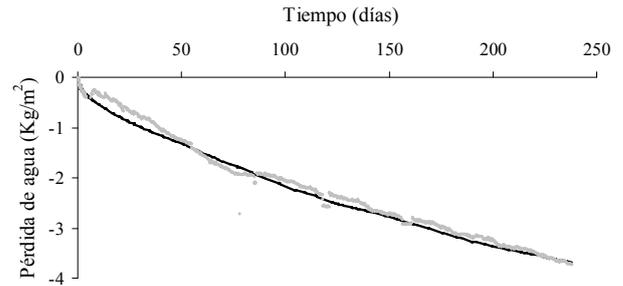


Fig.6. Evolución de la pérdida de masa de agua, valores experimentales (puntos) y calculados (línea).

#### 4.4.- Flujo de líquido y vapor

El flujo difusivo de vapor de agua se calcula mediante la ley de Fick (Ecuación 5) y el flujo advectivo de la fase líquida se determina a partir de la ley de Darcy:

$$\mathbf{q}_l = -\frac{\mathbf{k}_i k_{rl}}{\mu_l} (\nabla P_l - \rho_l \mathbf{g}) \quad (6)$$

Donde  $\mathbf{q}_l$  es el flujo de líquido,  $\mathbf{k}_i$  es la permeabilidad intrínseca ( $m^2$ ) y  $\mu_l$  es la viscosidad del líquido (tiene un valor de  $0.001 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  para el agua a  $20^\circ\text{C}$ ).

En la Fig. 7 se muestra el flujo advectivo y difusivo en función de la longitud de la columna para el tiempo final del ensayo de evaporación, calculados a partir del modelo numérico. Se observa que tanto el mecanismo de advección como el de difusión son importantes. En la parte inferior de la columna que es la parte más húmeda domina el flujo advectivo ascendente en fase líquida. En la parte superior de la columna que es más seca, el mecanismo dominante es la difusión de vapor hacia la parte más superficial de la columna. Un frente de evaporación, donde se evapora el agua, se encuentra entre estas dos partes.

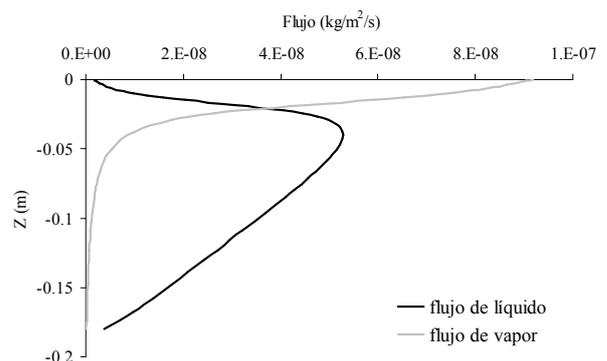
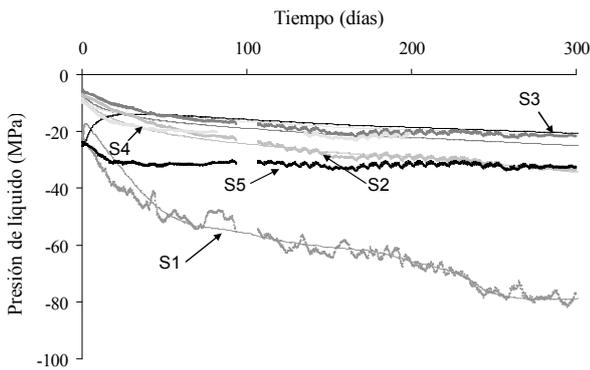


Fig.7. Flujo de líquido y de vapor a lo largo de la columna.

#### 4.5.- Resultados en la columna B

La simulación de la columna B se realiza con el fin de verificar el modelo numérico calibrado a partir de la columna C. Según el modelo numérico y del mismo modo

que ocurría en la columna C, la columna está más seca a la parte superior y más húmeda a la parte inferior (Fig.8). El modelo numérico tiende a subestimar los valores de la presión de líquido en el sensor 3 y sobreestima notablemente las de los sensores 4 y 5. Según el modelo la presión de líquido del sensor 5 sube (por flujo desde zonas inicialmente más húmedas) mientras que la experimental baja. Esta diferencia podría ser debida a un mal sellado de la perforación realizada para introducir el sensor o que todavía persiste el fraguado que actúa como sumidero de agua. El flujo desde zonas inicialmente más húmedas, también provoca que el sensor 3 del modelo tenga una presión de líquido menor que la medida experimentalmente.



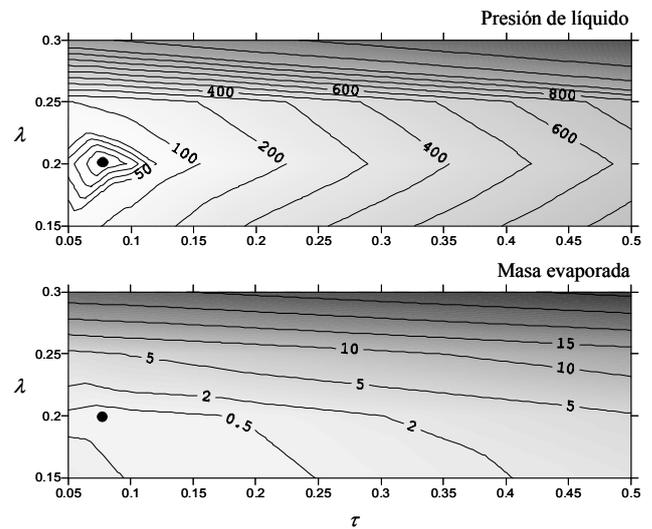
**Fig.8.** Evolución de la presión de líquido en la columna B, valores experimentales (puntos) y calculados (líneas). La posición de los sensores se indica en la Fig. 1.

Se obtiene un valor de pérdida de masa de agua de  $5.32 \text{ kg/m}^2$  mientras que durante el ensayo experimental se evaporan  $7.05 \text{ kg/m}^2$  de agua. El modelo numérico tiende a subestimar la masa evaporada desde el principio del ensayo y sigue la misma tendencia que en el ensayo experimental hasta el final del mismo. Esta diferencia en la pérdida de masa probablemente podría ser debida a que no se ha ajustado bien la presión de líquido en los sensores 4 y 5, los cuales registran una disminución de la presión de líquido en los primeros días de ensayo, lo que indica que todavía sigue la evaporación en la parte inferior de la columna, mientras que en el modelo numérico se observa un comportamiento totalmente opuesto, donde existe un flujo hacia la parte inferior de la columna.

#### 4.6.- Análisis de sensibilidad

Se han realizado 16 modelos secundarios con el fin de analizar la sensibilidad del modelo base a las variaciones de los valores del parámetro característico en la permeabilidad relativa ( $\lambda$ ) y la tortuosidad en la difusión ( $\tau$ ). Se utiliza un rango de incertidumbre de  $\tau$  en la difusión de vapor entre 0.05 y 0.5. Según Millington y Quirk (1961) se obtiene un valor de  $\tau$  de 0.067 para una saturación de líquido máxima en la columna de hormigón de 0.59 y un valor de  $\tau$  de 0.21 para una saturación mínima de 0.34. El rango de  $\lambda$  está entre 0.3 que es el valor utilizado en la curva de retención (Ecuación 2) y 0.15 inferior al valor estimado.

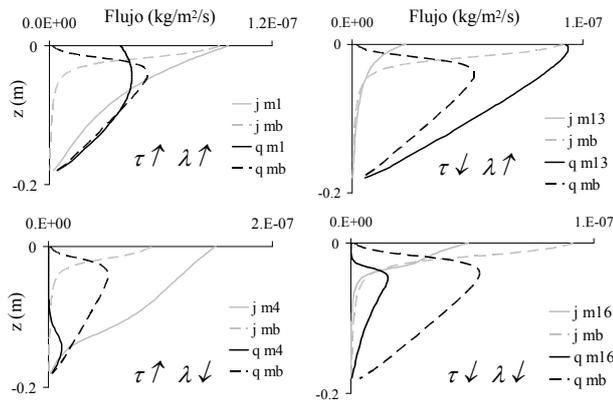
La sensibilidad se analiza mediante el método de mínimos cuadrados tal como hicieron Pintado et. al. (2001). El error utilizado para el análisis en cada modelo se calcula a partir de 13 valores de presión de líquido o masa evaporada que corresponden a uno cada 20 días aproximadamente para cada uno de los cinco sensores. Para poder comparar los resultados de presión de líquido o masa evaporada del modelo en los mismos tiempos que el ensayo experimental, se ha calculado la presión de líquido y la masa evaporada mediante interpolación lineal entre dos tiempos en los que el modelo numérico calculaba un resultado. En Fig. 9 se representa el mapa de iso-errores de presión de líquido y de la masa evaporada. Los puntos corresponden al modelo base que con una  $\lambda$  de 0.203 y un valor de  $\tau$  de 0.078 tiene un error de 4.91 en la presión de líquido y 0.13 en la masa de agua evaporada. Se observa que el error en la presión de líquido aumenta a medida que  $\tau$  y  $\lambda$  aumentan, para valores de  $\lambda$  entre 0.25 y 0.3 el error es elevado para cualquier valor de  $\tau$ . El error en la masa evaporada tiene un comportamiento similar.



**Fig. 9.** Mapa de iso-errores de presión de líquido y pérdida de masa de agua obtenidos a partir de la sensibilidad del modelo base a las variaciones de  $\lambda$  en la permeabilidad relativa y la  $\tau$  en la difusión, el punto corresponde al modelo base.

La Fig. 10 muestra cuatro modelos que corresponden a los cuatro casos extremos del análisis de sensibilidad. El resto de modelos se encuentran entre estos 4 casos extremos. El primer caso sería el del modelo 1 que tiene valores elevados de  $\lambda$  y  $\tau$ , se observa que al aumentar  $\lambda$  aumenta la permeabilidad lo que facilita el flujo de líquido y al aumentar  $\tau$  facilita el flujo difusivo con respecto al modelo base. El modelo 16 tiene un valor bajo de  $\lambda$  y  $\tau$ , en el que se observa que al disminuir  $\lambda$  y  $\tau$  dificulta el flujo de líquido y vapor. El tercer caso corresponde al del modelo 13 con un valor alto de  $\lambda$  y un valor bajo de  $\tau$ , en que se observa que se facilita la advección pero se dificulta la difusión de vapor. Finalmente se analiza el

modelo 4 que tiene un valor bajo de  $\lambda$  y alto de  $\tau$ , éste tiene un comportamiento contrario al del modelo 13.



**Fig. 1.** Sensibilidad a las variaciones de la tortuosidad en la difusión de vapor ( $\tau$ ) y la permeabilidad relativa ( $\lambda$ ), para el flujo de líquido ( $q$ ) y de vapor ( $j$ ). Se compara el modelo base (mb) con cuatro modelos distintos (m1, m4, m13 y m16).

## 5.- Conclusiones

Se ha presentado un modelo 1D que simula los ensayos de evaporación realizados por CIEMAT en dos columnas de hormigón (B y C) del C.A. El Cabril y se ha obtenido la curva de retención y la permeabilidad relativa del hormigón utilizado para el almacenamiento de residuos radioactivos.

Se estima la curva de retención con  $\lambda = 0.3$  y  $P_0 = 7\text{MPa}$  y está comprendida entre las curvas de retención obtenidas mediante otros ensayos, Villar et al. (2009).

El modelo es muy sensible a los parámetros hidráulicos, a partir de la calibración se obtiene un valor de  $\lambda = 0.203$  inferior al de la curva de retención y un valor de  $\tau = 0.078$  comprendido entre los calculados por la ley de Millington y Quirk (0.21 y 0.067).

Se fija la densidad de vapor a la superficie con un  $\beta_g = 1 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s/MPa}$ .

El modelo reproduce la presión de líquido y la masa evaporada en las columnas C y B. Lo hace mejor en la columna C porque se calibra el modelo y la parte inferior de la columna B tiene un comportamiento difícilmente reproducible con el modelo conceptual utilizado.

Tanto los mecanismos de advección como de difusión son importantes.

*Agradecimientos.* Agradecemos el financiamiento recibido por ENRESA (Empresa Nacional de Residuos Radioactivos S.A.) y la beca de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC. BarcelonaTech) concedida a la primera autora.

## 6.- Bibliografía

Baroghel-Bouny, V. (2007), Water vapour sorption experiments on hardened cementitious materials Part I: Essential tool for analysis of hygral

behaviour and its relation to pore structure, *Cement and Concrete Research*, 37, 414-437.

Carlier, J.Ph. y Burlion, N. (2011) Experimental and numerical assessment of the hydrodynamical properties of cementitious materials, *Transp Porous Med*, 86, 87-102.

Gerard, P., A. Leonard, J.P. Masekanya, R. Charlier y Collin, F. (2010), Study of the soil-atmosphere moisture exchanges through convective drying tests in non-isothermal conditions, *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.* 34,1297-1320.

Gran, M., J. Carrera, S. Olivella y Saaltink, M. W. (2011), Modeling evaporation processes in a saline soil from saturation to oven dry conditions, *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 8, 529-554, [www.hydro-earth-syst-sci-discuss.net/8/529/2011/doi:10.5194/hessd-8-529-2011](http://www.hydro-earth-syst-sci-discuss.net/8/529/2011/doi:10.5194/hessd-8-529-2011).

Leech, C., D. Lockington y Hooton, R. D. (2006), Estimation of water retention curve from mercury intrusion porosimetry and van Genuchten model, *ACI Structural Journal*, 103(2), 291-295.

Massana, J. y Saaltink, M.W. (2006), Modelo 2D de la celda 16, *UPC, Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica*.

Millington, R. y Quirk, J.P. (1961), Permeability of porous solids, *Transactions of the Faraday Society*, 57, 1200-1207.

Olivella, S., Gens, A., Carrera, J. y Alonso, E. E. (1996), Numerical formulation for a simulator (CODE BRIGHT) for the coupled analysis of saline media, *Eng. Comput.*, 13(7), 87-112.

Saaltink, M.W., Sánchez-Vila, X. y Carrera, J. (2005), Estudio cualitativo sobre la posibilidad que el agua recogida en la celda 16 proceda de un proceso de condensación, *UPC, Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica*.

Pintado, X., Ledesma, A. y Lloret, A. (2002), Backanalysis of thermohydraulic bentonite properties from laboratory test, *Engineering Geology*, 64, 91-115.

Van Genuchten, M. T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44(5), 892-898.

Villar, M.V., Martín, P.L. y Barcala, J.M. (2009), Caracterización del material de cobertera y el hormigón del C.A. El Cabril, *Informe Técnico CIEMAT/DMA/2G205/03/09*, CIEMAT, Madrid, 55 pp.