

## MODELACIÓN DE PROCESOS DE EVAPORACIÓN Y CONDENSACION EN EL INTERIOR DE UNA CELDA DE RESIDUOS

P. Gamazo<sup>1</sup>, M.W. Saaltink<sup>1</sup>, J. Carrera<sup>2</sup>, P. Zuloaga<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería del Terreno, Universidad Politécnica de Cataluña, Jordi Girona 1-3 / Edificio D2 08034 Barcelona España, pablo.gamazo@upc.edu, maarten.saaltink@upc.edu

<sup>2</sup> Instituto de Ciencias de la Tierra Jaume Almera, CSIC, Lluís Solé i Sabarís s/n 08028 Barcelona España, jcarrera@ija.csic.es

<sup>3</sup> Enresa, C/Emilio Vargas 7 28043 Madrid España, pzul@enresa.es

**RESUMEN.** Desde el verano del año 2003 se ha venido recogiendo agua del desagüe de una de las celdas de almacenamiento de residuos de “El Cabril” (Córdoba). Se realizaron diversas hipótesis sobre el origen de este fenómeno y se llevaron a cabo distintas acciones para determinarlo, concluyéndose que la celda es impermeable a la lluvia. Como hipótesis alternativa, se planteó que el agua procedente de la celda se debía a procesos de capilaridad, evaporación y condensación en el interior de la misma. Para corroborar dicha hipótesis se realizó en primera instancia un modelo unidimensional de flujo multifase y calor, y luego un segundo modelo bidimensional que permitió describir los procesos con mayor detalle. El modelo permitió obtener resultados cuantitativamente similares a los observados, y estudiar cualitativamente diferentes medidas de remedio. Aquí se exponen la hipótesis planteada, y los mecanismos y procesos que la definen. Se presenta el modelo 2D y se discuten los parámetros físicos de los materiales, las condiciones de contorno y su influencia en los resultados obtenidos. Finalmente se discuten las posibles medidas de remedio planteadas y las respuestas del modelo a las mismas.

**ABSTRACT.** Since the summer of 2003 water has been found to leak into the control system of one of the vaults of the Radioactive Waste disposal facility in “El Cabril”. Different hypotheses have been proposed and many tests performed to find the cause of this phenomenon. These allow us to conclude that leakage is not related to rainfall. An alternative hypothesis proposes that water enters the cell by capillarity and leaks out due to processes of evaporation and condensation inside the vault. In order to verify this hypothesis, a one-dimensional heat and flow model was made. Later, a two-dimensional model was developed to obtain more details about the processes involved. The model yielded results qualitatively similar to the observations, and allowed us to evaluate remedial actions. Here, we outline the hypotheses and all the mechanism and processes involved. We present the two-dimensional model, as well as the physical parameters and boundary condition and their influence on the results. Finally different remedial actions will be discussed, and their response to the results of the model.

### 1.- Introducción

“El Cabril” es un centro de almacenamiento de residuos radiactivos de baja actividad. Los residuos se almacenan, formando una matriz cementosa, dentro bidones que a su vez son apilados dentro de contenedores de hormigón reforzado de 11 m<sup>3</sup>. Dichos contenedores son almacenados dentro de celdas, también de hormigón armado, con capacidad para 320 contenedores (Zuloaga et al., 2006). Las celdas se van cerrando a medida que se llenan. El establecimiento cuenta con 28 celdas y está proyectada la construcción de coberturas que asilarán las celdas, evitando sobre todo el contacto de las mismas con la lluvia. La construcción de la cobertura se realizará en dos etapas.

La construcción de la primera cobertura se llevará a cabo cuando se hayan llenado las primeras 16 celdas, mientras tanto, cuentan con una capa de pintura impermeable como cobertura y se encuentran parcialmente enterradas.

A partir del año 2003 se comenzó a recoger agua del desagüe de una de las celdas (la N° 16), fenómeno que años después comenzó a darse en otras celdas. Al principio se plantearon varias hipótesis como una impermeabilización ineficiente o defectos en las juntas del hormigón. Dichas hipótesis fueron descartadas con la realización de varias pruebas de infiltración, excavaciones y chequeos de las juntas. También se observó que las precipitaciones no mostraban una correlación directa con el caudal recogido.

En la Fig 1, se puede apreciar la lluvia en el área y el caudal recogido. Se observa que el caudal procedente de la celda tiene un carácter estacional, mostrando dos periodos de recolección uno en verano, lo que confirma que las entradas no están ligadas a la lluvia, y otro en invierno, de mayor duración y un pico más alto.

Se planteó, pues, otra hipótesis atribuyendo el fenómeno a entradas por capilaridad desde la base de las celdas y a procesos de de evaporación y condensación en su interior, provocados éstos por variaciones térmicas en las paredes de la celda. Se elaboró un modelo conceptual y se realizaron varios modelos matemáticos cuyos resultados dan consistencia a la hipótesis planteada.

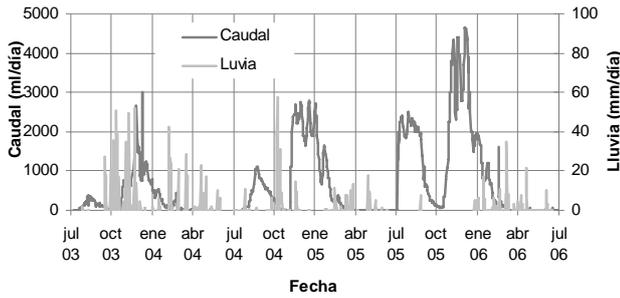


Fig. 1. Caudales recogidos en la celda N° 16 y precipitación

**2.- Modelo conceptual**

Las celdas son básicamente prismas de hormigón huecos, de 23.8m x 19.3m en planta, 10m de altura y un ancho de pared de 0.5m. En el interior, los contenedores se encuentran apoyados sobre una capa de hormigón poroso que permite conducir el agua que ingrese a la celda a un canal de recolección. Entre el hormigón poroso y la base de la celda se encuentra una capa de “Baytec” que impide el flujo de agua. Dicho material es un elastómero de poliuretano desarrollado por BAYER, que impide el flujo de agua tanto en fase líquida como gaseosa.

El nivel freático se encuentra varios metros por debajo de la base de las celdas (en la celda N° 16 el mismo se encuentra 4 metros por debajo).

Los contenedores se apilan en 4 grupos llenando prácticamente todo el interior de la celda, un espacio de aire de 2 cm separa cada grupo de contenedores de las paredes de la celda y la distancia ente grupo es de 20 cm.

En la

Fig. 2 puede apreciarse un corte de la celda.

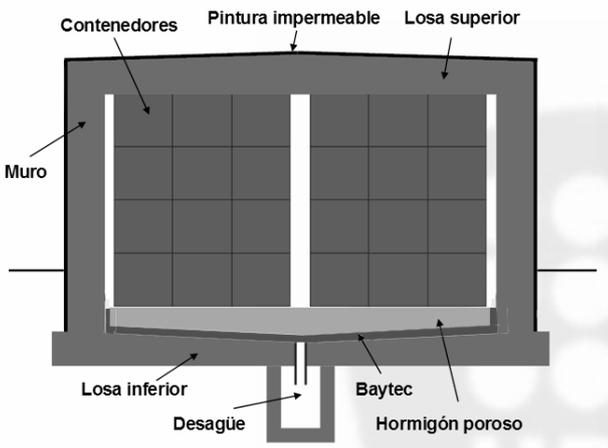


Fig. 2. Corte vertical de una celda

Este espacio de aire entre los contenedores y el muro de la celda, hace posible que exista una diferencia de temperatura entre el hormigón de los contenedores y el de las paredes de la celda ya que este último se encuentra expuesto a la intemperie (con una capa de pintura impermeable).

Al aumentar la temperatura de la pared exterior, la presión de saturación del vapor de agua presente en los poros del hormigón aumenta, produciendo que parte del agua que en ellos se encuentra cambie de fase líquida a gaseosa. Esto produce un flujo difusivo de vapor desde la pared de la celda hacia los contenedores. Como la temperatura en el contenedor es menor que en la pared, la presión de saturación del vapor es menor y este se condensa. El pasaje de agua de fase gaseosa a líquida, produce un aumento de la presión de líquido en el contenedor y un aumento en el grado de saturación. Este aumento de la presión de líquido genera un flujo de agua líquida (flujo capilar) hacia el interior de los contenedores. Si la tasa de condensación es mayor a la velocidad con que el agua fluye hacia el interior del contenedor, los poros del hormigón del contenedor podrían llegar a saturarse. Una vez saturados estos poros, el vapor de agua proveniente de la pared de la celda condensa y escurre por la superficie del contenedor pudiendo llegar al canal de recolección.

Esta hipótesis explica los caudales que se producen en verano. Un razonamiento análogo podría hacerse para el invierno, invirtiendo la dirección de los procesos ya que en esta época el exterior se encuentra a menor temperatura que el interior de la celda.

En la

Fig. 3 se presenta un diagrama los procesos hasta aquí descriptos.

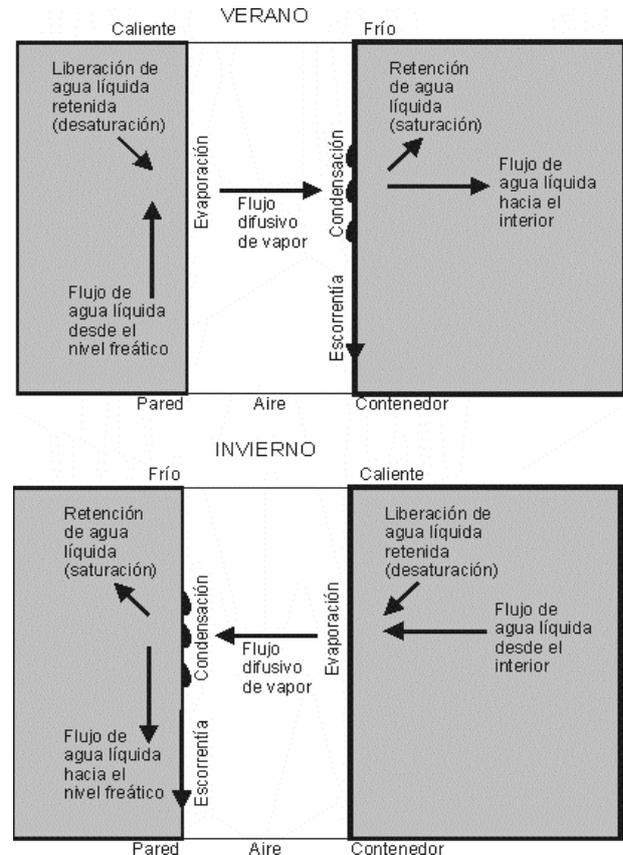


Fig. 3. Diagrama de procesos en verano e invierno

La evaporación en la pared de la celda produce una disminución en la presión de líquido en los poros de la misma lo cual genera un flujo de agua líquida hacia esta zona. Dicho flujo estaría “transportando” el agua hacia la zona donde la evaporación se produce, cambiando así el estado de saturación de toda la pared. Como puede apreciarse en la

Fig. 2 bajo el hormigón poroso se encuentra la capa de “Baytec” que impide el flujo de agua (tanto en fase líquida como gaseosa). Sin embargo las paredes de la celda se encuentran “conectadas” a la base de la misma, formando un medio continuo (a excepción de junta constructiva).

Esta conexión permite el flujo de agua desde la base de la celda hacia las paredes. La base de la celda se encuentra apoyada sobre el terreno sin ningún tipo de impermeabilización, por lo tanto la celda puede intercambiar agua con el terreno.

En verano cuando el agua se evapora en la pared de la celda, se produce un importante flujo de agua líquida hacia la zona de evaporación. Este flujo disminuye el grado de saturación y la presión del líquido en la base de la celda y por lo tanto se producirá un flujo de agua desde el terreno hacia el hormigón.

En invierno al revertirse el sentido de los procesos se produce un flujo de agua hacia el terreno a través de la base.

### 3.- Modelo Matemático

El modelo conceptual presentado ha sido corroborado mediante la realización de distintos modelos matemáticos utilizando el programa CodeBright, programa de elementos finitos escrito en Fortran, desarrollado por el Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica de la Universidad Politécnica de Cataluña (Olivella et al., 1996). Este programa permite resolver problemas mecánicos, hidráulicos y térmicos de forma acoplada en medios geológicos. Se consideraron como variables de estado del sistema la presión de líquido y la temperatura, la presión del aire se considera constante, por lo tanto el programa resuelve balances de agua y energía. Mediante el planteo de diversas leyes constitutivas el programa relaciona las variables del sistema (tales como viscosidad, densidad, etc) para las distintas fases presentes, con las variables de estado consideradas. Enfoques similares han sido adoptados por otros autores al estudiar el flujo de agua y calor en hormigón (Hauptl et al., 1997 y Xiaoshu, 2002).

A continuación se listan las principales leyes constitutivas consideradas.

#### 3.1. Retención de agua en el medio poroso

Se ha utilizado la ecuación de Van Genuchten para expresar la curva de retención de cada material.

$$S_e = \left( 1 + \left( \frac{\phi_c}{\phi_0} \right)^n \right)^{-m} \quad (1)$$

siendo  $S_e$  la saturación efectiva,  $\phi_c$  el potencial capilar,  $\phi_0$  un parámetro de ascenso capilar, y  $n$  y  $m$  parámetros de forma.

#### 3.2. Presión parcial de vapor

La presión parcial de saturación del vapor  $h_r$  depende principalmente de la temperatura y la humedad relativa se relaciona con el potencial capilar  $\phi_c$  (o presión matricial) mediante la ley psicrométrica

$$h_r = \exp \left[ \frac{g \phi_c P_{mw}}{R(T + 273.15)} \right] \quad (2)$$

siendo  $g$  es la gravedad,  $P_{mw}$  es el peso molecular del agua,  $R$  es la constante de los gases y  $T$  la temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ).

#### 3.3. Flujo de agua líquida

La permeabilidad relativa se calcula a partir del modelo de Van Genuchten

$$k_r = \sqrt{S_e} \left( 1 - \left( 1 - S_e^{1/m} \right)^m \right)^2 \quad (3)$$

El flujo de agua líquida es calculado mediante la ley de Darcy generalizada

$$q_l = - \frac{k_{int} k_r}{\mu_l} (\nabla P_l - \rho_l g) \quad (4)$$

siendo  $q_l$  el flujo de agua líquida,  $k_{int}$  la permeabilidad intrínseca,  $\mu_l$  la viscosidad del agua,  $P_l$  la presión y  $\rho_l$  la densidad de líquido.

#### 3.4. Difusión del vapor

El flujo difusivo de vapor de agua es calculado con la ley de Fick

$$q_v = -\theta \tau D_0 \nabla p_v \quad (5)$$

siendo  $q_v$  el flujo de vapor de agua,  $\theta$  la porosidad,  $\tau$  la tortuosidad,  $D_0$  el coeficiente de difusión del vapor,  $\nabla p_v$  el gradiente de presión parcial de vapor.

#### 3.5. Conducción de calor

El flujo de calor se representa mediante la ley de Fourier

$$q_c = -\lambda \nabla T \quad (6)$$

siendo  $q_c$  el flujo de calor,  $\lambda$  la conductividad térmica,  $\nabla T$  el gradiente de la temperatura.

### 3.6. Modelo 1D

Para corroborar la hipótesis se desarrolló en primera instancia un modelo unidimensional representando el muro de la celda, los contenedores y el espacio de aire entre ellos. Dicho modelo pudo reproducir de forma cualitativa los caudales recogidos, mostrando los dos periodos de salida de caudal siendo mayor el de invierno que el de verano. El mismo mostró ser muy sensible a los parámetros y permeabilidades que representaban los flujos verticales y muy poco a los parámetros térmicos (Saaltink et al., 2005).

El desarrollo de este modelo fue de suma importancia ya que brindó más elementos para fortalecer la hipótesis planteada y destacó la importancia de los flujos verticales en el problema, lo cual resultó en el posterior desarrollo de un modelo bidimensional.

### 4.- Modelo 2D

Para poder describir mejor los procesos involucrados, se modeló en 2 dimensiones un corte vertical de la celda.

#### 4.1. Zonas y parámetros físicos de las materiales

Se definieron las siguientes zonas correspondientes a distintos materiales con distintas características físicas: muros de la celda, contenedores, hormigón poroso, aire y roca (suelo). La zona correspondiente a los contenedores se consideró como un medio continuo y no como un conjunto con posibles separaciones. Todas las zonas se encuentran conectadas con excepción del hormigón poroso y la base de la celda, ya que en entre estas se encuentra la capa de "Baytec".

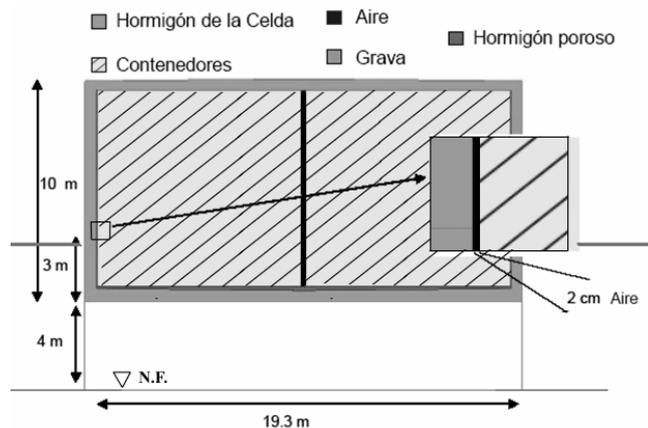


Fig. 4. Corte de la celda y zonas consideradas

Entre los contenedores y el techo de la celda se colocó una capa de polietileno. Esta capa no fue considerada en el modelo ya que se cree que la misma sufrió daños importantes.

Los valores de los parámetros térmicos proceden de la literatura (Gens et al., 1999).

Tabla 1- Valores de parámetros físicos considerados

	Curva de retención		$K_{int}$ (m <sup>2</sup> )	Porosidad	$\lambda_{térmico}$ (wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )
	$P_0$ (MPa)	$\lambda_{van Gen}$			
Hormigón Celda	1	0.3	$10^{-17}$	0.08	1.56
Hormigón Contenedor	1	0.3	$7.5 \times 10^{-18}$	0.08	1.56
Roca	0.3	0.3	$10^{-15}$	0.08	2.9
Hormigón Poroso	-	-	-	0.3	1.56
Aire	-	-	-	1	0.024

Tanto las porosidades como las permeabilidades intrínsecas de los hormigones fueron facilitada por ENRESA (2005). Se ha de comentar que los valores de las permeabilidades intrínsecas fueron obtenidos a partir de ensayos con gas. Dichos valores fueron ligeramente modificados para poder conseguir la variación estacional esperada, ya que como se comentará posteriormente, el modelo resultó ser muy sensible a el valor de estos parámetros.

Las curvas de retención utilizada son semejantes a las presentadas por Zuloaga et al. (2006).

Cabe destacar que a las zonas de hormigón poroso y aire se les ha asociado un tipo de ley de curva de retención especial que impide que las mismas retengan agua, por lo tanto su saturación siempre será nula.

#### 4.2. Condiciones de contorno

Se definieron 3 tipos diferentes de condiciones de contorno:

**Exterior:** Comprende el techo de la celda y la pared Sur (izquierda en Fig. 4) desde los 3 metros hacia arriba. Se supone flujo nulo debido a la capa de pintura impermeable y se impone la temperatura suponiendo una variación sinusoidal, con una temperatura media de 20°C y una amplitud de 20°C. Nótese que en esta zona no incluye la pared Norte (derecha en Fig. 4), ya que al no estar la misma expuesta directamente a los rayos de sol se espera una menor diferencia entre la temperatura de la celda y la de los contenedores.

**Freático:** Comprende el límite inferior del modelo. En este contorno se impone una presión de líquido igual a la atmosférica (0.1 MPa) y una temperatura igual a 20°C

**Paredes con escorrentía:** Comprende todos los contornos de los materiales sin capacidad de retención. En estos contornos se aplica la condición

$$q = \begin{cases} \gamma(P_{atm} - P_l) & \text{si } P_l > P_{atm} \\ 0 & \text{si } P_l < P_{atm} \end{cases} \quad (7)$$

siendo  $q$  el caudal de salida,  $\gamma$  un coeficiente,  $P_{am}$  la presión atmosférica y  $P_l$  la presión del líquido. Esta condición de contorno simular el hecho de que cuando el hormigón, tanto de la celda como el de los contenedores, se satura en su interfaz con un material sin capacidad de retención se produce un goteo por la superficie que puede llegar hasta el canal de recolección. En sentido estricto lo que la condición de contorno hace, es quitar el agua del sistema en el punto donde se produciría “el goteo”. No se está representando la trayectoria del agua por las paredes de hormigón y por la capa de Baytec hasta el canal de recolección. Por lo tanto no se está teniendo en cuenta una posible “reabsorción” por parte del hormigón o una eventual evaporación.

#### 4.3. Condiciones iniciales

El valor inicial para la presión de líquido considerada es la hidrostática, siendo esta una hipótesis razonable dada la incertidumbre que al respecto se tiene. La temperatura inicial se fijó en 20°C en todo el dominio.

### 5.- Resultados Modelo 2D

El modelo permitió obtener una descripción de la evolución temporal y espacial de las variables de estado y de los distintos flujos involucrados. Se analizó el comportamiento del modelo para un periodo de simulación de 10 años, sobre el cual se estudió la dinámica de los procesos, se ajustó el valor de los parámetros y se realizó el correspondiente análisis de sensibilidad (Massana y Saaltink, 2006).

#### 5.1. Temperatura

El modelo mostró, tal como era de esperarse, que las variaciones de temperatura del exterior producen un gradiente de temperatura, cuya magnitud va disminuyendo hacia el interior de los contenedores. Dicho gradiente es máximo en los períodos de temperatura extrema (pleno verano o invierno) y el sentido varía según la estación.

Se observó una importante diferencia de temperatura entre los muros de la celda y los contenedores (en la pared sur), debido al espacio ocupado por aire que hay entre los mismos, pudiendo esta diferencia llegar hasta 5 °C durante los periodos de temperatura extrema. La bidimensionalidad del modelo permitió apreciar que esta diferencia no es constante, sino que muestra variación en el sentido vertical, dada la conectividad térmica que existe entre los contenedores y el techo de la celda.

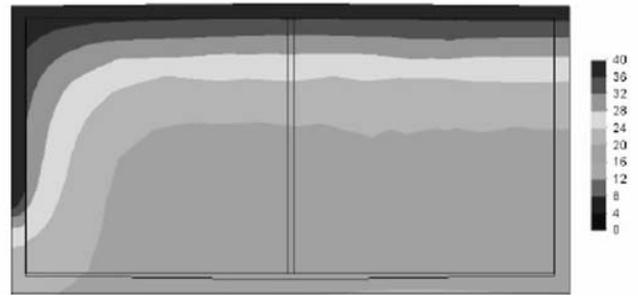


Fig. 5 Temperaturas en verano

#### 5.2. Saturación

El sistema se mantiene en general próximo al estado de saturación, solo se observaron variaciones significativas en la saturación del hormigón al rededor de la pared interna del muro de la celda y de la de los contenedores.

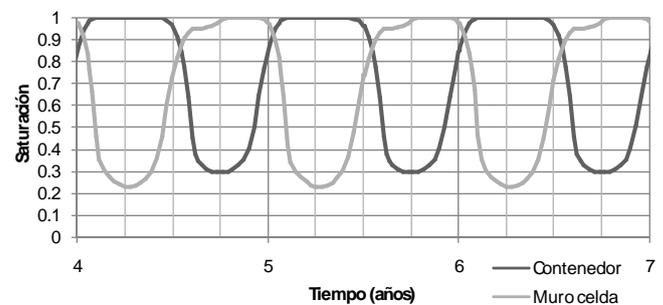


Fig. 6 Estado de saturación a 3.5 m sobre la base de la celda

El modelo mostró como conforme la temperatura aumenta al comenzar el verano, el hormigón del muro de la celda comienza a desaturarse desde su contacto con la cámara de aire hacia el exterior, mientras que en el hormigón del contenedor comienza a aumentar el grado de saturación desde la pared hacia el interior. Una vez que el hormigón de los contenedores se satura, se produce el goteo en la pared. En invierno estos procesos se invierten.

En la Fig. 6 se observa la evolución de la saturación sobre dos puntos en contacto con la cámara de aire a 3.5 metros sobre la base de la celda.

#### 5.3. Flujo de agua líquida

Debido a la posibilidad de que exista transporte de solutos a través de los contenedores, resulta necesario disponer de la mayor cantidad de información sobre flujo de agua líquida. El modelo permitió obtener una descripción cualitativa y cuantitativa del flujo en el interior de la celda. A grandes rasgos el flujo en verano es vertical ascendente en la roca y en la parte inferior del muro de la celda, y es horizontal en los contenedores. El modelo también acusó la existencia de un flujo importante en la zona de contacto entre los contenedores y el techo de la celda. En la Fig. 7 se

encuentran representados dichos flujos. En invierno los flujos se dan en sentido opuesto y cambian en magnitud.

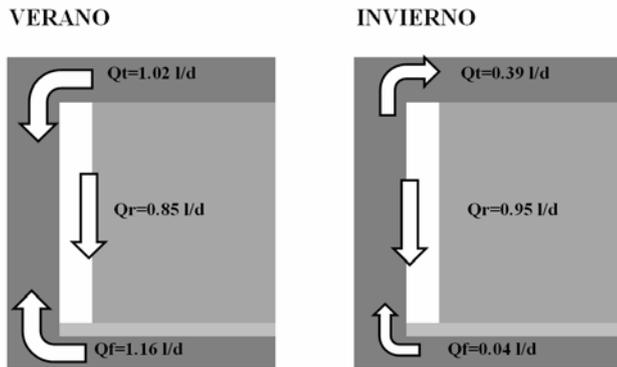


Fig. 7 Flujos de líquido medios para el 4º año de simulación

Tanto en el muro de la celda como en los contenedores, los flujos de agua líquida varían en dirección y sentido según la altura a la cual se evalúe, aunque la componente principal en ambos casos es el flujo horizontal. La magnitud del flujo de agua líquida va disminuyendo hacia el interior de los contenedores. Dada su naturaleza “reversible” (en una dirección en verano y en otra en invierno), los flujos netos son de un orden de magnitud menos, o incluso más pequeños, que los máximos que pueden llegar a darse. El modelo permitió evaluar la magnitud de los flujos netos y su valor máximo no llegó a superar los 5 mm /año. Este hecho resulta relevante a la hora de estudiar los mecanismos de transporte de solutos, ya que indica que los procesos difusivos serán más importantes que los advectivos. En la Fig. 8 se muestra la variación temporal del flujo horizontal de agua líquida en dos puntos a 4 cm de la cámara de aire, a 3.5 m sobre la base de la celda.

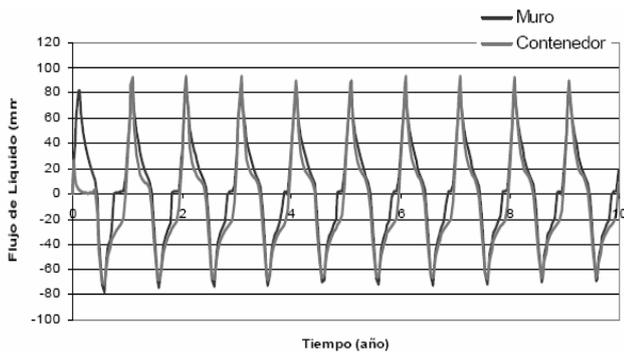


Fig. 8 Flujo horizontal de agua líquida a 3.5 metros

#### 5.4. Intercambio con el freático

Se observó que aunque si bien existe intercambio con el nivel freático en ambos sentidos, el caudal que el mismo cede en verano es un orden de magnitud mayor al que recibe en invierno. La diferencia de dichos caudales es lo que se recoge en el canal de la celda.

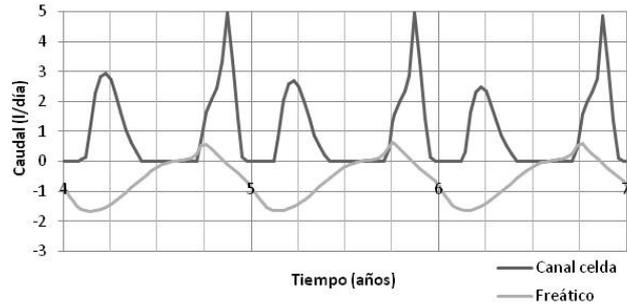


Fig. 9 Intercambio con el freático y caudal recogido

#### 5.5. Caudales recogidos

Las únicas zonas en las cuales se produjo goteo fueron las que están en contacto con la cámara de aire en la pared sur, en la pared de los contenedores en verano y en la pared de la celda en invierno. Los caudales entregados por el modelo mostraron la variación estacional existente en los datos medidos, y también mostraron un mayor caudal de invierno que de verano.

Debido a la condición inicial impuesta, seguramente muy saturada en comparación con la realidad, los caudales arrojados por el modelo en lugar de ir aumentando, fueron disminuyendo año a año simulado (el hecho de que este efecto sea causa de la condición inicial fue comprobado en el análisis de sensibilidad). Esta incertidumbre sumada a la que se tiene con respecto a los parámetros de los materiales y a las simplificaciones con respecto condición de contorno de la temperatura, restringen la capacidad de reproducir las observaciones a un nivel cualitativo.

En el apartado 9 se describen distintas mejoras en cuanto a procesos a simular, valores de parámetros y medias de las distintas variables de estado, que permitirían mejorar la respuesta del modelo.

### 6.- Análisis de sensibilidad

Con el fin de estudiar la sensibilidad del modelo a los distintos parámetros físicos considerados se realizó una serie de modelos en los cuales se modificaron los siguientes parámetros:

- posición del nivel freático
- presión de líquido inicial
- permeabilidades intrínsecas
- succión del hormigón

#### 6.1. Posición del nivel freático

Se llevó el nivel freático a 1 o 7 metros del fondo de la celda sin encontrar ninguna diferencia significativa respecto a los resultados obtenidos con el mismo a 3 metros. Esto se debe que a las altas presiones capilares que se dan en el sistema (equivalente a miles de metros de columna de agua)

hacen que estos cambios sean casi imperceptibles.

### 6.2. Presión de líquido inicial

Mediante la imposición de una menor presión de líquido inicial se consiguió retardar el tiempo en que la celda comienza a producir agua por el desagüe. Dicho tiempo se ve incrementado ya que la celda primero debe aumentar su estado de saturación antes de comenzar a producir caudal de salida.

### 6.3. Permeabilidad intrínseca

Se observó que el cambio de la permeabilidad intrínseca para el hormigón de las distintas zonas tiene un efecto directo sobre el volumen de agua involucrado en los distintos fenómenos en dichas zonas.

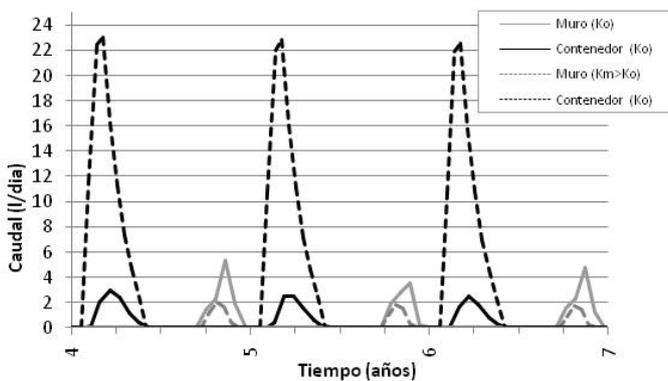


Fig. 10. Caudales aumentando la permeabilidad del hormigón de la celda (línea punteada) y con el valor base (línea continua)

Al aumentar, por ejemplo, la permeabilidad intrínseca del hormigón del muro de la celda, el agua puede fluir más fácilmente hacia esta zona y por lo tanto es mayor el volumen de agua que se evapora y por lo tanto aumenta el flujo de vapor. Si se mantiene el valor de la permeabilidad de los contenedores, los mismos se saturarán en superficie en relativamente poco tiempo y por lo tanto el caudal que se recoge en el desagüe en verano aumentaría. Sin embargo el caudal de invierno podría llegar a desaparecer ya que el muro de la celda sería capas de “distribuir mejor” el agua en sus poros y no llegar a la saturación. Si por otro lado también se aumenta la permeabilidad de los contenedores, la “eficiencia” con la que se distribuye la humedad podría mejorar hasta el punto en que no se produciría la saturación en superficie.

### 6.4. Curva de retención del hormigón

Los cambios en la succión de los materiales tienen dos efectos opuestos. Un material con una retención menor podrá secarse más fácilmente, aumentando así la cantidad

de agua vinculada a procesos de evaporación. Pero por otro lado al disminuir el grado de saturación del material la permeabilidad relativa disminuye, disminuyendo también el flujo de agua líquida.

Mediante distintas realizaciones del modelo se observó que el factor más importante es el de la permeabilidad, o sea que el considerar que un material tiene una mayor succión puede llegar a producir un efecto similar desde el punto de vista del caudal recogido, al que se tendría si se considerara una mayor conductividad.

## 7.- Modelación de celdas con cobertura

Una pregunta que naturalmente surge es: ¿Cómo se verán afectados estos procesos cuando se realice la cobertura?

Mediante la adición al modelo de una nueva zona se representó la futura cobrera. Dado que el principal efecto que se quiso simular fue el aislamiento térmico, a dicha zona se le asignaron las mismas propiedades que a la roca base. La condición de contorno de temperatura sinusoidal fue aplicada en el exterior de la cobertura. Para este modelo no se consideró la pintura impermeable en las paredes exteriores de la celda.

En el nuevo modelo no se produjeron caudales en el canal de recolección. Esto se debe además de a la reducción del gradiente de temperatura entre la celda y los contenedores, al hecho de que al no haber pintura impermeable es posible un mayor flujo de agua líquida entre el medio y la celda, lo cual reduce el flujo de vapor en la cámara de aire.

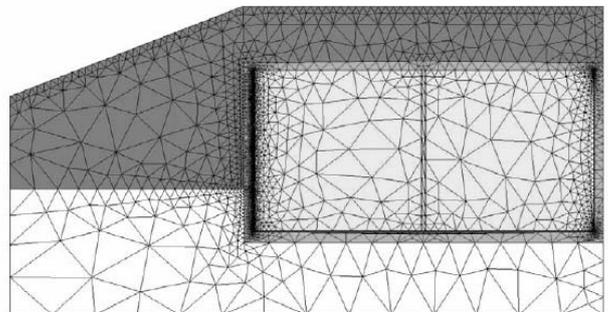


Fig. 11. Modelo de la celda con cobertura

## 8.- Medidas correctoras

Se propusieron distintas medidas correctoras para evitar que este fenómeno se siga dando en las celdas mientras no se construye la cobertura. Mediante la implementación de dichas medidas en el modelo se ha hecho una valuación de las mismas (Saaltink, 2006).

Las medidas propuestas fueron tres:

- rellenar los espacios de aire con grava, estableciendo así un puente térmico entre el muro de la celda y los contenedores
- rellenar los espacios de aire con arena fina o con lechada de cemento, esta medida además

establecer un puente térmico permitiría el flujo capilar entre los contenedores y el muro de la celda.

- Aislar térmicamente la celda, esto se ha implementado en el modelo disminuyendo la amplitud de las oscilaciones de la temperatura

De los resultados obtenidos se comprobó que aunque si bien el relleno de los espacios de aire y un eficiente aislamiento producen una dramática disminución en las diferencias de temperatura entre los contenedores y los muros de la celda, continúa reuniéndose agua en el desagüe. El relleno de arena produjo que los caudales cesaran, ya que la arena además de hacer de puente térmico permite el flujo de agua líquida y tiene capacidad de retención.

## 9.- Ampliación de datos base

Actualmente solo se han contrastado los resultados del modelo con los datos de caudal. Se colocará instrumental para medir humedad y temperatura en una celda que pronto será cerrada. Una vez se comiencen a generar medidas las mismas podrán ser contrastadas con el modelo. También se ha colocado instrumental en el exterior de una de las celdas ya cerradas y en breve se construirá una cobertura experimental instrumentada. De las observaciones que de esta se obtengan, se podrá mejorar el modelo de la celda con cobertera.

Se espera incorporar al modelo la nueva información sobre conductividad, saturación y transporte de solutos que nuevos trabajos experimentales aportarán.

Una vez se incorporen estos datos se espera que el modelo sea capaz de reproducir cuantitativamente los caudales

## 10.- Conclusiones

El modelo numérico desarrollado corrobora la hipótesis de que el agua recogida es producida por procesos de ascenso capilar y de evaporación y condensación en el interior de la celda provocados por variaciones térmicas en las paredes. También permite identificar las zonas en que se producen y evaluarlos cualitativamente.

Los flujos líquidos son importantes alrededor de la cámara de aire llegando a valores de cm/año, aunque la reversibilidad estacional de los procesos produce que los promedios anuales sean mucho menores. Esto permite identificar como mecanismo principales de transporte la difusión y dispersión en lugar de la advección.

Se observó que, pese a que la energía proviene de las fluctuaciones térmicas, el fenómeno más limitativo es el ascenso capilar, por lo que la variación de los parámetros térmicos apenas influye sobre el caudal recogido.

El modelo mostró ser muy sensible a los parámetros hidráulicos. Los cambios en la posición del nivel freático no afectaron de forma significativa los procesos modelados.

La condición inicial de saturación solo controla el tiempo

en que se comienza a recoger agua de la celda, pero no su evolución a largo plazo. Ello implica que el fenómeno se reproducirá en todas las celdas mientras se mantenga el diseño.

La medida correctora más efectiva consiste en llenar la cámara de aire con un material retentivo y conductivo (como arena fina o lechada de cemento).

La cobertera de ingeniería disminuye la magnitud de los procesos estudiados al punto de que no se produce escurrimiento en el hormigón de la celda y ni en el de los contenedores.

## Bibliografía

- Gens, A., Olivella, S. y Vallejan, B., 1999. *Modelling of the THM behaviour of a concrete based engineered barrier (B waste canister)*. CRC OUPC 99-001/A, ANDRA, Châtenay-Malabry Cedex.
- Haupt, P., Grunewald, J. y Fechner, H., 1997. Coupled heat air and moisture transfer in building structures. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 40, 1633-1642.
- Massana, J y Saaltink, M.W., 2006. *Modelo 2D de la celda 16*. UPC, Barcelona.
- 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, 87-112.
- Saaltink, M.W., Sánchez-Villa, 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, Barcelona.
- Saaltink, M.W., 2006. *Modelos bidimensionales de posibles medidas de remedio en las celdas de Cabril*. UPC, Barcelona.
- Xiaoshu, L., 2002. Modeling of heat and moisture transfer in buildings. *Energy Build.* 34, 1033-1043
- Zuloaga P., Andrade, C. y Saaltink, M.W., 2006. Long term water scenario in low-level waste disposal vaults, with particular regard to concrete structures in El Cabril, Cordoba, Spain. *J. Phys. IV France*, 136, 49-59.