

EQUIPO PARA EL ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HIDROMECAÁNICO DE LOS MEDIOS POROSOS

R.L. Rodríguez-Pacheco, L. Candela y A. Lloret

Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica. Escuela de Caminos Canales y Puerto de Barcelona. Universidad Politécnica de Cataluña. roberto.rodriguez-pacheco@upc.es

RESUMEN. Para realizar el estudio del comportamiento hidromecánica bajo diferentes condiciones de contorno y diversas variables ambientales fue diseñado y construido un sistema llamado columna. El equipo puede utilizarse para el estudio de flujo y transporte de solutos en condiciones saturadas o no saturadas con diversos materiales porosos (suelos naturales o antropogénicos, artificiales, resinas o residuos mineros). El equipo consiste básicamente en un sistema automático para la observación del comportamiento hidromecánico de los medios porosos y tiene tres componentes: Partes físicas, una interfaz electrónica y un sistema de control con un registro automático. Los resultados experimentales realizados con un residuo metalúrgico demostraron que el equipo es capaz de medir la succión en el suelo, la retracción vertical, la temperatura, la humedad relativa, el cambio en el contenido de humedad en la muestra y la evaporación. Con el equipo es posible aumentar o reducir el tamaño de la muestra y cambiar las condiciones de contorno en función de los objetivos de la investigación. El aparato fue utilizado para desarrollar un estudio del flujo y del transporte de solutos en condiciones saturadas y no saturadas. Los resultados han permitido comprobar la influencia del comportamiento hidromecánico sobre el flujo y el transporte de contaminantes.

ABSTRACT. A column for performing hydro-mechanical tests under different environmental and boundary conditions was designed and constructed. It is possible to use it for tests under saturated or unsaturated conditions with different porous materials (natural or anthropogenic soil, mine waste and resins). The equipment basically consists in an automatic system for the observation of the hydro-mechanical behaviour of a porous medium and has three components: Physical parts, an electronic interface and a control system with an automatic register. Experimental results obtained with metallurgical waste demonstrated that the apparatus is capable of measuring surface suction, vertical shrinkage, temperature, relative humidity, change in the water content at different points in the sample and evaporation. Under such conditions, the performance of the equipment was excellent showing that is possible to increase or reduce the size of the sample and

change the different parameters according to the aim of the tests. The apparatus was used to develop a study of flow and solutes transport under saturated and unsaturated conditions. The results show the influence of hydro-mechanical behaviour on flow and transport of contaminants.

1. Introducción

El comportamiento mecánico e hidráulico de los medios porosos (suelos naturales o antropogénicos) están muy influenciado por las condiciones ambientales. En el caso particular de los residuos mineros que es el material usado en este trabajo esta está también afectada por la forma de vertido en la superficie de la balsa. Tras el vertido, el residuo está en forma de lodo saturado, pero si las condiciones atmosféricas son favorables estos materiales se secan y se desarrolla un proceso de retracción y de formación de fisuras (Rodríguez-Pacheco, 2002). Estos procesos son también importantes en otros materiales como los suelos que constituyen las barreras arcillosas en balsas para almacenamiento de residuos o de agua (Yesiller et al., 2000).

La fisuración de estos materiales se traduce en cambios importantes en los patrones de flujo favoreciendo el movimiento del agua y el transporte de contaminantes a través de las fisuras. El estudio de estos procesos en condiciones controladas hace necesario el ensayo en laboratorio de columnas de suelo de tamaño apreciable, lo que suele conducir a periodos de ensayo de larga duración.

El flujo de agua y el transporte de contaminantes han sido estudiado mediante ensayos sobre columnas de materiales fisurados por Jørgensen et al., (1998), sin tener en cuenta el comportamiento hidromecánico. El proceso de formación de fisuras ha sido estudiado en laboratorio por diferentes investigadores (Yesiller et al., 2000; Rodríguez-Pacheco, 2002).

El objetivo de este artículo es presentar la investigación experimental realizada mediante la construcción de un equipo que permite: a) controlar las condiciones

ambientales en la superficie de una columna de suelo (por ejemplo generando ciclos de secado- humedecimiento) para estudiar la retracción y la formación de fisuras y b) realizar ensayos para estudiar el flujo y transporte de solutos reactivos o no. La columna de suelo cuyo comportamiento se analiza está instrumentada a fin de caracterizar los cambios de temperatura, humedad y succión del suelo durante los ensayos. El equipo desarrollado por su versatilidad, puede ser utilizado en el análisis de otros procesos ligados al flujo inducido por cambios ambientales, tanto en condiciones saturadas como no saturadas.

2. Material y métodos

2.1. Equipo

La Fig. 1 muestra un esquema del equipo desarrollado. El material a ensayar se coloca sobre una base constituida por una placa porosa de 30 cm de diámetro y 1 cm de altura

que tiene por objeto el reparto uniforme del flujo de agua en la base de la muestra. A fin de evitar el flujo preferencial por las paredes verticales, el material está rodeado lateralmente por una membrana de látex que le confiere un pequeño confinamiento, además entre la muestra y la membrana se coloca una película de grasa de silicona o parafina. La superficie superior de la columna queda abierta a la atmósfera. La altura de la muestra puede ser variable de acuerdo con los objetivos del trabajo. La columna está rodeada lateralmente por un cilindro de metacrilato de 5 mm de espesor. Tanto la membrana como el cilindro de plástico están perforados lateralmente en los lugares donde se colocan los diversos sensores.

Sobre la cabeza de la columna se sitúa el sistema de control de las condiciones de contorno y ambientales. La temperatura del aire se regula mediante una bombilla de luz infrarroja cuyo encendido está controlado para alcanzar en cada momento la temperatura deseada con un margen de ± 0.5 °C.

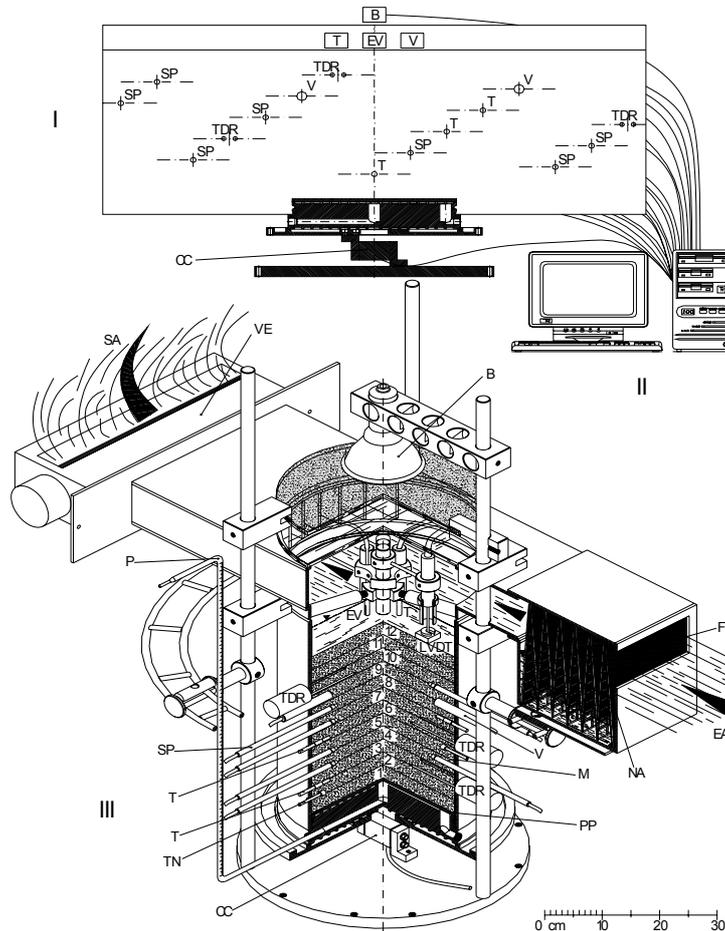


Fig. 1. Esquema de la columna. I) Desarrollo del cilindro que muestra la ubicación de cada uno de los sensores. II) Sistema de adquisición de datos y III) representación de la columna en 3-D. Los sensores no se colocaron en la misma vertical sino como se muestra en I. Los números indican la posición de la capa de residuo. CC: célula de carga; TN: tensiómetro; PP: placa porosa; M: membrana; TDR: medidor del contenido volumétrico de agua; T: termómetro; SP: psicrómetro; V: higrómetro; EA: entrada de aire; SA: salida del aire; NA: nivel del agua; F: filtro de algodón; VE: ventilador; B: bombilla; LVDT: transductor de desplazamiento; EV: electroválvula; P: piezómetro.

En las etapas de secado, el aire se hace circular por encima de la muestra con la ayuda de un ventilador cuya velocidad se puede regular. La humedad relativa del aire se impone haciéndolo circular a través de un tejido de algodón parcialmente sumergido en un recipiente con agua destilada cuyo nivel se controla mediante un detector de nivel de agua y una electro-válvula. Variando el número de capas del tejido y el nivel del agua en el recipiente se consigue mantener la humedad relativa del aire en el valor deseado con variaciones por debajo del 5%. La humedad relativa del aire y la temperatura se miden a una distancia de 2 cm por encima de la superficie de la muestra mediante un higrómetro capacitivo y una sonda Pt 100 respectivamente.

En las etapas con infiltración, se puede aplicar una recarga con un caudal prefijado. El agua se reparte uniformemente sobre la superficie de la muestra mediante un sistema de tubos perforados o bien se mantiene sobre la superficie de la muestra una altura de agua que se controla mediante un detector de nivel y una electro-válvula. El agua que se infiltra puede proceder de un depósito con agua o de un depósito con agua con diferentes solutos. La selección entre los depósitos es manual.

La medida del caudal de agua que se evapora o que se infiltra en la columna se realiza mediante una célula de carga que mide la variación del peso total de la columna. Los cambios de altura debidos a la retracción o a la consolidación del suelo se miden por medio de un sensor de desplazamiento de tipo LVDT. Los sensores situados sobre la superficie de la muestra (higrómetro, termómetro, detector de nivel y LVDT) están fijados en una plataforma que se coloca a la altura que se desee mediante tres brazos apoyados en las paredes internas del cilindro que confina la muestra.

El movimiento del agua en profundidad se caracteriza mediante sensores de diversos tipos, según la variable a medir y su rango de variación. Las principales características de los sensores utilizados en el equipo se recogen en la Tabla 1.

Tabla 1. Principales características de los sensores utilizados en el equipo (m.c.a.=metros de columna de agua).

Sensores de medida	Diámetro (mm)	Parámetro que mide	Rango	Precisión
Higrómetros (Vaisala)	12	Humedad relativa	0-99%	1.0 %
Psicrómetros (Wescor)	6	Temperatura	0-100 °C	0.5 °C
		Succión	0.1-10 MP	
TDR-Time Domain Reflectometry (IMKO)	2.5	Contenido volumétrico de agua	0-44%	2%
Termómetro	5	Temperatura	0-100 °C	0.2 °C
LVDT Transductor de desplazamiento	3	Retracción	0.005-30 mm	0.1%
Célula de carga		Pérdida de peso	de 100 kg	0.2 %
Tensiómetro	5	Succión	0.01-1.2 m.c.a.	0.005 m.c.a

Para la medida de la succión en un rango por encima de 3 MPa se ha utilizado higrómetros con sensores de tipo capacitivo (Albrecht et al., 2003) y la ley psicrométrica (ecuación de Kelvin, Bear, 1972) para obtener la succión a partir de la medida de la humedad relativa del aire en los poros de la muestra. La misma sonda proporciona la temperatura del material en el punto de medida de la humedad relativa. Para medir succiones en el rango de 0.5 a 7 MPa se ha utilizado psicrómetros de termopares (Ridley y Wray, 1996). Cuando la succión era muy baja (menor de 15 kPa) se ha medido directamente la succión mediante tensiómetros constituidos por un delgado tubo de plástico (2 mm de diámetro interior) doblado en forma de "U", con un extremo abierto a la atmósfera y el otro conectado al material de la columna a través de pequeña cerámica de 100 kPa de valor de entrada de aire. Por debajo de la placa porosa de la base de la columna está conectado un piezómetro para medir el nivel piezométrico en los ensayos en los que se mantenga saturada total o parcialmente la muestra.

El contenido volumétrico de agua se ha medido utilizando la técnica de la reflectometría en el dominio del tiempo (TDR) Topp et al. (1980).

Los sensores se han colocado siguiendo una línea helicoidal a fin de prevenir la formación de fisuras verticales. La situación de los sensores es la indicada en el desarrollo del cilindro mostrado en la Figura 1-I). Tanto el sistema de ventilación y de control de temperatura como los cables de los diversos sensores se encuentran apoyados en un armazón metálico cuyo peso recae fuera de la célula de carga ya que es independiente del resto de la columna (Fig. 1). Se ha comprobado que los pequeños movimientos de los cables de los sensores originados por los cambios de volumen del material no alteran de forma apreciable las medidas de la célula de carga.

Las medidas de los transductores se registran mediante un sistema de adquisición de datos constituido por dos placas internas de PC (National Instruments, AT-mio-16xe-10) con 16 canales de entrada analógica con un convertidor analógico-digital de 16 bits y 16 canales de salida digital que permiten gobernar las electro-válvulas y el sistema de imposición de temperatura en la superficie de la muestra. Las lecturas en los psicrómetros de termopares se realizaron de forma manual. Se ha desarrollado un programa interactivo utilizando el lenguaje Visual Basic para facilitar la programación de la recogida de datos y el control del ensayo. Usualmente se ha utilizado un ritmo de almacenamiento automático de una medida de todos los sensores cada 10 minutos.

2.2. Material

El equipo desarrollado se ha aplicado al estudio experimental de la influencia de la formación de fisuras por desecación en el flujo y transporte de metales pesados en balsas de la zona minera de Moa (Cuba). En la tabla 2 se dan las principales características físicas del residuo. El residuo esta compuesto por óxidos e hidróxidos de hierro, hematita (40-60%), magnetita (17-24%) y cuarzo (2-4.2%),

espínelas (2.6-4.9%) Gibbsita (1-3%), serpentina (0.1-1.2%) (Rodríguez-Pacheco, 2002).

Tabla 2. Propiedades físicas del residuo.

Parámetros /Número de ensayos	n=6
Densidad natural (g/cm ³)	2.38-2.29
Densidad seca (g/cm ³)	1.83-1.64
Peso específico de las partículas (g/cm ³)	3.8-4.04
Humedad (%)	35-25
Limite líquido (LL)	44-40
Limite plástico (LP)	40-36
Índice plástico (IP)	6-4
Índice de poros	2.2-1.3
pH	6.1-6.5
Capacidad de intercambio Catiónico	8 meq/100 g sólido

2.3. Procedimiento de ensayo

Se han realizado dos ensayos variando la forma de colocación del material en la columna. El material se vierte en la columna tras ser remoldeado con agua destilada hasta conseguir una consistencia líquida con una humedad del 143%. En el primero la muestra se construye capa a capa vertiendo cada vez 5.6 kg de material. Tras el vertido de cada capa, se fija una temperatura de 26 °C, una humedad relativa del 60 % y una velocidad del viento de 2 m/s durante una semana induciendo un proceso de secado en el material. Durante este proceso se desarrolla la fisuración del material que se registra con una cámara fotográfica digital accionada manualmente, la Fig. 2 muestra las fisuras desarrolladas tras el secado de la capa número 11, además se dibujaba un mapa con la distribución de las fisuras y se determinaba el área y el volumen ocupado por las grietas, así como los puntos de contacto entre las fisuras de las capas contiguas. Paralelamente, se registra la retracción vertical, la pérdida de peso de la columna y la evolución del contenido volumétrico de agua, la succión y la temperatura en diferentes profundidades de la columna. Se han colocado 12 capas que tras este proceso alcanzan una altura final total de 315 mm. La capa 12 fue vertida para sellar las grietas de la capa 11 una vez saturada la columna y esta no se sometió a proceso de secado hasta después de realizado los ensayos de flujo y transporte de solutos. En el segundo ensayo, el material preparado con la misma humedad inicial se colocó de una vez en el interior de la lámina de látex formando una columna de altura similar (320 mm).

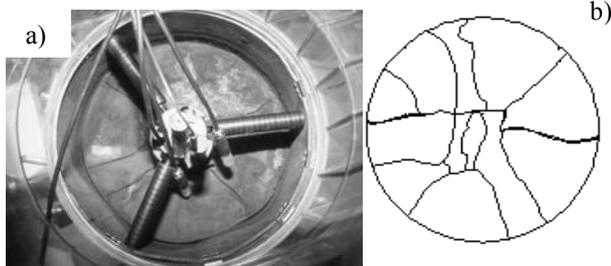


Fig. 2. Fisuras desarrolladas durante el secado de la capa número 11. a) Foto y b) Plano de grietas.

En la columna construida capa a capa se ha realizado un proceso de infiltración a fin de saturar la columna. Para ello, se ha aplicado inicialmente sobre la superficie de la columna un caudal unitario de 0.083 mm/s hasta alcanzar una lamina de agua de 2 mm en la superficie de la columna, a partir de entonces (unos 10 minutos tras el inicio de la infiltración) se mantuvo constante ese nivel. La salida del agua en la base de la columna estaba cerrada. Durante este proceso se controló la temperatura de la superficie de la columna y se registró la evolución del peso, la altura de la columna, la succión y el contenido de agua en el interior del material.

Seguidamente, en las dos muestras se evaluó la permeabilidad saturada midiendo el caudal de salida en la base de la columna mientras se mantenía constante el nivel del agua en la cara superior a una altura de 80 mm sobre la superficie de la muestra. El ensayo se prolongó durante 8 días, a fin de poder asegurar que se han alcanzado las condiciones estacionarias. Finalmente se procedió en ambas columnas a un proceso de secado aplicando las mismas condiciones ambientales que se han utilizado en las etapas de secado durante la construcción por capas. Tras el secado se extrajeron muestras para determinar la densidad y la humedad final del material a lo largo de 3 perfiles.

3. Resultados y discusión

3.1. Medidas durante la construcción de la columna

La Fig. 3 muestra un registro típico de la temperatura y la humedad relativa del aire sobre la superficie de la columna durante un periodo de secado tras la colocación de la capa 1. Puede observarse como el sistema de control mantiene estas variables entre unos límites prefijados.

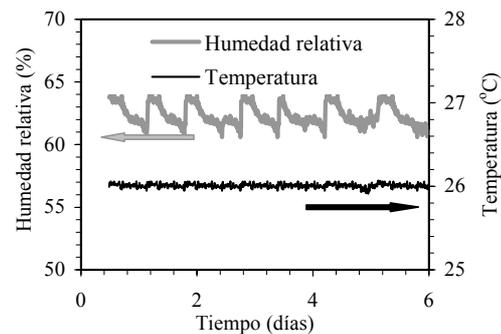


Fig. 3. Registro de la temperatura y la humedad relativa del aire sobre la superficie de la columna.

La Fig. 4 muestra la evolución de temperatura a diversas profundidades de la columna. Las variaciones de temperatura son debidas fundamentalmente a las fluctuaciones de la temperatura en el ambiente del laboratorio cuyo valor siempre estaba por debajo del valor impuesto en la superficie de la muestra (26 °C).

La evolución del peso de la columna tras la colocación de las capas 10 y 11 se recoge en la Fig. 5. Puede observarse como durante los dos primeros días la pérdida de peso es

casi lineal con el tiempo, resultando una velocidad de evaporación de aproximadamente 7 mm/días. Las primeras grietas aparecen tras un periodo de unas 20 horas del vertido de cada capa; se ha constatado que el grado de saturación en el momento de inicio de la fisuración es mayor del 85%. Durante el periodo de secado se han registrado importantes cambios de altura en la columna debido a la desecación del material.

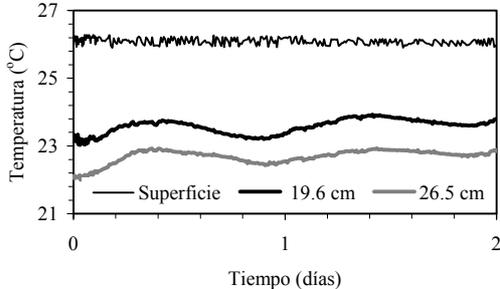


Fig. 4. Evolución de temperatura a diversas profundidades de la columna

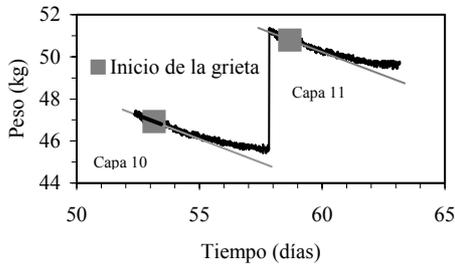


Fig. 5. Evolución del peso de la columna tras la colocación de las capas 10 y 11.

La Figura 6 muestra la evolución de la retracción medida en la columna tras la colocación y secado de una capa y como se estabiliza al cabo de unas 30 horas. El valor unitario de la retracción en cada capa puede estimarse en un 8.2%.

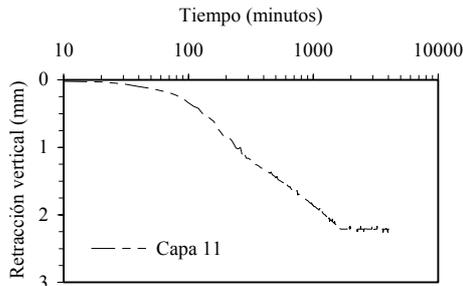


Fig. 6. Retracción vertical capa 11.

3.2. Medidas durante la etapa de recarga o saturación

En la evolución de la cantidad de agua infiltrada en la columna que se muestra en la Fig. 7 pueden distinguirse dos etapas. En la primera que transcurre antes de los diez minutos se produce un rápido llenado del volumen ocupado por las fisuras y los poros de mayor tamaño en contacto con ellas. Más tarde y a una velocidad mucho menor se completa la saturación de los huecos de menor tamaño.

En la Fig. 8 se recogen las relaciones entre la succión y el contenido de agua obtenidas a partir de las medidas de

succión realizadas con los psicrómetros y de las medidas de contenido volumétrico de agua realizadas con sensores TDR en puntos situados a alturas similares. Puede observarse que pese a que estos sensores pueden estar situados en zonas de la columna alejadas entre sí horizontalmente, esta relación es análoga a la indicada por la curva de retención del material (Rodríguez-Pacheco, 2002). Se utiliza para el ajuste la expresión propuesta por Van Genuchten (1978),

$$S_r = \left(1 + \left(\frac{s}{P_0} \right)^{\frac{1}{1-\lambda}} \right)^{-\lambda} \quad (1)$$

Donde S_r es el grado de saturación, s la succión, λ y P_0 parámetros que pueden ser estimados a partir de los resultados experimentales, en este caso $\lambda = 0.379$ y $P_0 = 0.109$ MPa.

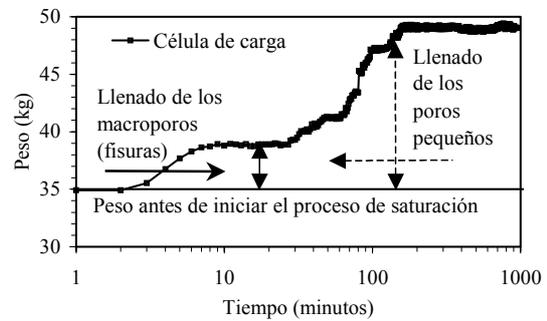


Fig. 7. Evolución de la cantidad de agua infiltrada en la columna registrada por la célula de carga.

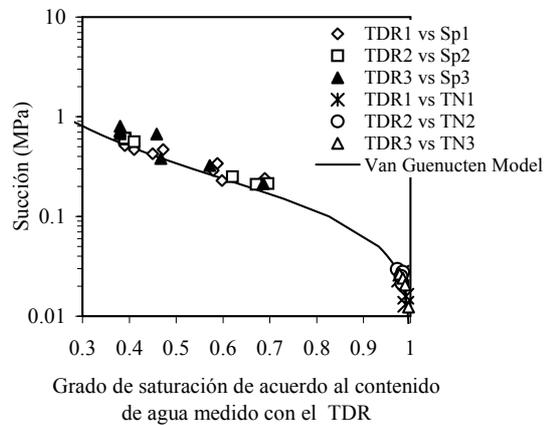


Fig. 8. Curva de retención.

La doble estructura ocasionada por la fisuración hace que el movimiento del agua en la columna sea complejo. En una primera etapa el flujo se desarrolla desde la superficie hacia el interior pero cuando, gracias al flujo preferencial a través de las fisuras, el agua llega a la placa porosa de la base de la columna se inicia un proceso de imbibición desde esta base hacia el interior de la muestra en dirección ascendente que se combina con el flujo descendente desde la superficie. Este patrón de flujo preferencial provocado por las fisuras se puede observar en la Fig. 9a donde se muestra el perfil de humedad en la muestra obtenido a

partir de las medidas del contenido de agua basados en la técnica del TDR y en la Fig. 9b con los valores de succión procedentes de las medidas realizadas con los psicrómetros. Durante el proceso de saturación la muestra sufre un proceso de consolidación (Fig. 10). Este aspecto hay que tenerlo en cuenta pues los cambios de volumen provocan variaciones en las propiedades físicas e hidrogeológicas de los medios porosos.

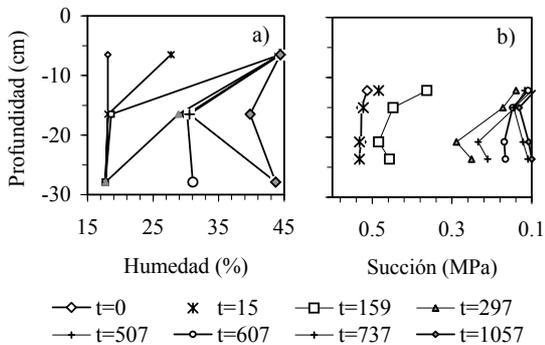


Fig. 9. Variación de la humedad y la succión en profundidad para diferentes intervalos de tiempo durante la saturación de la muestra estratificada. a) Medidas de humedad realizadas con el TDR (Time domine reflectometry). b) Perfiles de succión medidos psicrómetro.

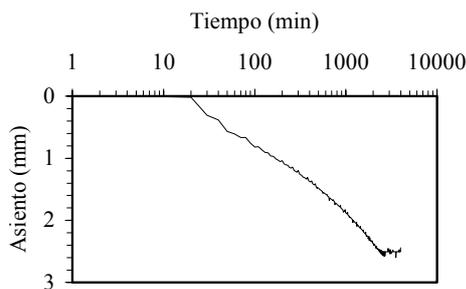


Fig. 10. Consolidación de la muestra durante la saturación.

3.3. Medida de la permeabilidad

En la Fig. 11 se muestra el valor del volumen de salida de agua en la base de las muestras una vez alcanzado un régimen de flujo estacionario. Puede observarse como la fisuración del material incrementa en más de un orden de magnitud el valor de la permeabilidad, a pesar de que las fisuras se rellenan durante la colocación de las nuevas capas de residuo. Este incremento de permeabilidad está de acuerdo con otros resultados sobre suelos arcillosos saturados con fisuras rellenas (Jørguensen et al., 1998). Como se observa las fisuras tienen un efecto muy relevante en los procesos de flujo y transporte de solutos en los medios porosos, disminuyendo su tiempo de tránsito.

4. Conclusiones

La metodología de ensayo presentada se ha utilizado con éxito para estudiar en condiciones controladas los efectos de las condiciones de contorno y ambientales en la repuesta hidro-mecánica de un material poroso. El equipo desarrollado posee una amplia versatilidad ya que sobre la

superficie del material a ensayar se pueden controlar la temperatura, la humedad relativa, la velocidad del aire, imponer una recarga y el nivel del fluido que se infiltra en el material. Durante los ensayos se mide automáticamente la cantidad de agua que se infiltra o evapora, los cambios de altura del material y las variaciones de succión, contenido de agua y temperatura en profundidad.

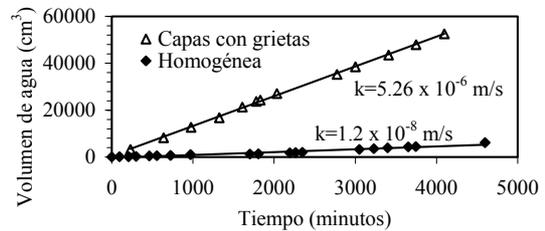


Fig. 11. Permeabilidad en muestra homogénea y agrietada.

La numerosa información recogida durante las diferentes fases de los ensayos realizados ha puesto de manifiesto la influencia de las fisuras generadas por desecación en el proceso de saturación y en el tiempo de tránsito del agua y solutos a través de un residuo minero depositado por capas agrietadas y en forma homogénea.

El equipo desarrollado constituye una nueva herramienta para estudiar los fenómenos de flujo y transporte de contaminantes sobre diversos tipos de materiales porosos (suelos, residuos mineros y barreras geoquímicas) expuestos a ciclos de secado-humedecimiento.

Agradecimientos. Este trabajo se desarrolla dentro de los proyectos PPQ2001-2100-C04 del plan nacional de I+D+I. (2001-2003) y PB/44/FS/2002, Financiado por la Fundación Séneca. A Tomás Pérez y a Fernando Cortés por su importante contribución en la construcción del equipo.

Referencias

- Albrecht B.A., Benson C.H., Beuermann S., 2003. Polymer Capacitance Sensors for Measuring Soil Gas Humidity in Drier Soils. *Geotechnical Testing J.*, 26(1), 3-11.
- Bear, J., 1972. *Dynamic of fluids in porous media.* Dover Publications INC. New York, pp. 764.
- Jørguensen, P.R., Mackay, L.D. and Spliid, N.H., 1998. Evaluation of chloride and pesticide transport in a fractured clayey till using large undisturbed columns and numerical modeling, *Water Resources Research*, 34(4): 539-553.
- Ridley, A.M. and Wray, W.K. 1996. Suction measurement: A review of current theory and practices. *Proc. 1st Int. Conf. On Unsaturated Soils*, Paris. E.E. Alonso and P. Delage (eds.), Balkema/Presses Des Ponts et Chaussées, 3: 1293-1322.
- Rodríguez-Pacheco, R.L. (2002). Estudio experimental de flujo y transporte de cromo, níquel y manganeso en residuos de la zona minera de Moa (Cuba): influencia del comportamiento hidromecánico. Ph.D. Thesis. University Polytechnic of Catalonia (UPC), Barcelona, Spain.
- Topp, G.C., Davis, J.L. Annan.A.P. 1980. Soil Electromagnetic determination of water content. *Water Resour. Res.*, 16(3), 574-582.
- Yesiller, N., Miller, C.J., Inci, G., and Yaldo, K., 2000. Desiccation and cracking behaviour of three compacted landfill liner soils, *Engineering Geology*, 57: 105-121.
- Van Genuchten, R. (1978). Calculating the unsaturated hydraulic conductivity with a new closed-form analytical model. *Water Resources Research*, 37(1), 21-28.