

# Diseño Experimental para la Caracterización de los Procesos de Hidratación de la Bentonita

A. Bru  
D. Casero  
J. M. Pastor

32 / 46



ES0100243



MINISTERIO  
DE CIENCIA  
Y TECNOLOGÍA

**Ciemat**

Centro de Investigaciones  
Energéticas, Medioambientales  
y Tecnológicas

# Diseño Experimental para la Caracterización de los Procesos de Hidratación de la Bentonita

A. Bru  
D. Casero  
J. M. Pastor

Toda correspondencia en relación con este trabajo debe dirigirse al Servicio de Información y Documentación, Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, Ciudad Universitaria, 28040-MADRID, ESPAÑA.

Las solicitudes de ejemplares deben dirigirse a este mismo Servicio.

Los descriptores se han seleccionado del Thesaurus del DOE para describir las materias que contiene este informe con vistas a su recuperación. La catalogación se ha hecho utilizando el documento DOE/TIC-4602 (Rev. 1) Descriptive Cataloguing On-Line, y la clasificación de acuerdo con el documento DOE/TIC.4584-R7 Subject Categories and Scope publicados por el Office of Scientific and Technical Information del Departamento de Energía de los Estados Unidos.

Se autoriza la reproducción de los resúmenes analíticos que aparecen en esta publicación.

Depósito Legal: M-14226-1995  
ISSN: 1135-9420  
NIPO: 402-01-008-3

Editorial CIEMAT

CLASIFICACIÓN DOE Y DESCRIPTORES

S58

BENTONITE; CLAYS; RADIATION TRANSPORT; POLLUTANTS; RADIONUCLIDE  
MIGRATION; POROSITY; TRACER AMOUNTS; HYDRATION; DESIGN.

## **Diseño Experimental para la Caracterización de los Procesos de Hidratación de la Bentonita**

Bru, A.; Casero, D., Pastor, J.M.  
23 pp. 10 figs. 6 refs.

### **Resumen**

Presentamos el diseño experimental para el seguimiento de un proceso de hidratación de una bentonita. Se fabricaron muestras de potencias 2 cm x 12 cm x 12 cm y se introdujeron en una celda de Hele-Shaw con dos paredes de metacrilato y un marco de acero. En los experimentos de hidratación, se introduce un fluido por unos orificios del marco situados en la parte superior y en la parte inferior de la celda, con el fin de realizar experimentos de hidratación en ambos sentidos. Para tener una hidratación uniforme, colocamos un difusor cerca del orificio. La entrada de volumen se almacena en el tiempo. La evolución de las interfases que se desarrollan se graba en un vídeo. La cámara de vídeo se fija en un soporte de manera que la dirección vertical en el monitor sea la misma que la mayor dimensión de la celda.

## **Experimental Setup to Characterize Bentonite Hydration Processes**

Bru, A.; Casero, D., Pastor, J.M.  
23 pp. 10 figs. 6 refs.

### **Abstract**

We present an experimental setup to follow-up the hydration process of a bentonite. Clay samples, of 2 cm x 12 cm x 12 cm, were made and introduced in a Hele-Shaw cell with two PMM windows and two steel frames. In hydration experiments, a fluid enters by an orifice in the frame, located both at the top and the bottom of the cell, to perform hydration in both senses. To get a uniform hydration we place a diffuser near the orifice. Volume influxes in hydration cells are registered in time. The evolution of the developed interface was recorded on a videotape. The video camera was fixed to a holder so that the vertical direction in the monitor was the same as the direction of the larger extension of the cell.

## 1. Objetivos

Los fenómenos de transporte en fase fluida presentan gran relevancia en cuanto a posibles causas de mecanismos de escape e infiltración de residuos (tanto desde el punto de vista de los vertederos, como de los almacenamientos de residuos radiactivos). En general es esperable que a largo plazo todos los materiales porosos que rodean a los vertederos y contenedores en los almacenamientos sufran importantes procesos de hidratación debido a filtraciones.

Por otro lado, durante el proceso de hidratación se producen cambios estructurales en el material que afectan de manera crucial a las propiedades de transporte del medio. Por tanto, dicho proceso de hidratación es fundamentalmente no estacionario y los procesos de flujo posteriores a través del medio dependen en gran medida del proceso de hidratación. De todo lo anterior se deduce la importancia de realizar estudios experimentales detallados sobre los fenómenos de transporte de origen termohidrodinámico y de interfases en arcillas hidratadas y no hidratadas; fundamentados especialmente en métodos visuales que permitan determinar más directamente los cambios que están ocurriendo en el proceso de hidratación.

Respecto a la hidratación de arcillas no hidratadas, no parece existir un buen acuerdo entre los diferentes modelos numéricos y los experimentos realizados hasta el momento. Es por ello que decidimos investigar de forma más directa el proceso de hidratación visualizando el propio frente, es decir, con técnicas de imagen. De esta forma se han realizado los experimentos que se detallan más adelante.

Los objetivos generales del laboratorio, en una primera etapa, los podemos sintetizar de la siguiente manera:

- a) Estudio experimental de la fenomenología asociada al proceso de hidratación de arcillas porosas naturales.
- b) Desarrollo de un modelo teórico que describa el proceso de hidratación de medios porosos reactivos naturales.

## 2. Descripción

Existen dos líneas de investigación que proponemos en este trabajo. Por una parte está la caracterización de la interfase y su aplicación como caracterización del comportamiento del medio poroso en el fenómeno de transporte. Por otra parte la modelización, simulación y posible reducción a ecuaciones estocásticas de transporte. Posteriormente, para lograr modelar interfases con morfologías complicadas y predecir su evolución en el tiempo se requieren técnicas de simulación en las que se introducen mecanismos de crecimiento de las interfases consideradas relevantes. En una segunda fase se trata de reproducir el modelo con ecuaciones identificando así su clase de universalidad si fuera posible.

a) La caracterización de una interfase rugosa evolucionando, a partir de exponentes característicos se ha aplicado con gran éxito a gran variedad de sistemas, que van desde el crecimiento de depósitos (ya sea en celdas electroquímicas [Kahanda et al. 1992, Kahanda et al. 1994, Pastor y Rubio 1996, Salvarezza et al. 1998], como en deposición controlada de capas atómicas), frentes de llama [Zhang et al. 1992], crecimiento de tumores [Brú et al. 1998], hasta el desplazamiento de fluidos inmiscibles en medios porosos con alto grado de homogeneidad [Rubio et al. 1989]. Desde el punto de vista teórico, han dado origen a los modelos clásicos conocidos como KPZ (Kardar-Parisi-Zhang) y EW (Edwards-Wilkinson). En este caso, las interfases son autoafines con exponentes de escalados fijos. Solamente dos exponentes, el llamado de rugosidad y el dinámico, son suficientes para caracterizar todo el proceso. En fenómenos más complejos, como el de la propagación de un frente líquido en un medio poroso, la interfase puede ser compacta pero no necesariamente autoafín. Proponemos la caracterización de estas interfases para obtener los exponentes característicos, y poder establecer así su relación con las técnicas de caracterización multifractal y la investigación de un nuevo escalado anómalo.

b) La forma clásica de caracterizar un fenómeno de transporte en un medio poroso es a través de coeficientes como el de porosidad que requiere medidas de laboratorio. Nos proponemos investigar si los exponentes que caracterizan la morfología de la interfase son capaces por sí mismos de caracterizar el fenómeno, su posible relación con los coeficientes de porosidad y sus ventajas prácticas frente a otros métodos. La idea de la caracterización por estos exponentes reside en el hecho demostrado de que son más

robustos frente a cambios en las condiciones externas que cualquier coeficiente. En modelos simples estos exponentes son universales; en modelos complejos podrían al menos servir como caracterizadores.

c) Los modelos más recientes que tratan de incorporar un medio poroso en la evolución de un frente (modelos KPZ de congelado: QKPZ (*quenched* Kardar-Parisi-Zhang)) predicen fenómenos críticos de *pinning* que no aparecen en los experimentos realizados hasta ahora. Propondremos comprobar experimentalmente si estos fenómenos aparecen, en qué condiciones lo hacen y si su evolución es la predicha por la teoría.

d) Otro aspecto importante que consideraremos es la importancia de la existencia de agua en fases vapor, con lo que sus propiedades de empuje serán muy similares a las del Hidrógeno. es decir, en la arcilla estarán compitiendo agua en estado líquido, agua en estado vapor e hidrógeno en estado gaseoso. Este aspecto es importante porque al estar sometido el proceso de transporte a la acción de un gradiente de temperaturas habrá una determinada cantidad de agua que se evaporará o condensará. Se tratará por lo tanto de estudiar su influencia.

Pretendemos por tanto el desarrollo de un sistema experimental que reúna las condiciones necesarias para la obtención de los observables necesarios que nos permitan hacer un estudio de éste tipo.

### **3. Estudio experimental de la dinámica de la interfase en el proceso de hidratación**

Los objetivos experimentales que se han planteado, en esta primera etapa, se pueden resumir en los siguientes puntos.

- 1) Medida del caudal de entrada en el proceso de hidratación, en condiciones de succión directa de la arcilla y con presión de entrada constante.
- 2) Medida de la velocidad del frente en el proceso de hidratación a presión constante.
- 3) Medida de la velocidad media del frente de saturación.
- 4) Caracterización de la geometría de la interfase en el proceso de hidratación a través de la medida de la función *rugosidad*.



- 5) Estudio de la función de correlación de la interfase.
- 6) Estudio del espectro de potencia de las interfases.

Entre los próximos objetivos a cubrir, destaca el estudio de la dependencia de las dinámicas de los procesos de hidratación y saturación, con la densidad seca de la muestra, así como con la presión de entrada, y la temperatura. También se pretende abordar la influencia de la estanqueidad de la celda, para poder comparar más directamente con las experiencias realizadas en otros laboratorios, así como con la maqueta (Mock-up test) que se está hidratando en el CIEMAT.

Los procesos de invasión en un medio poroso, cuya estructura no cambia con el tiempo, por un líquido que moja bien han sido estudiados en los últimos años. El caso más similar al de la hidratación de las arcillas por agua es aquél en el que el fluido desplazante es más viscoso que el fluido desplazado, con lo que no existe inestabilidad de tipo viscoso y el frente de invasión se ve únicamente perturbado por la distribución de tamaños de poro. Sin embargo, en el caso de las arcillas, existen dos diferencias sustanciales: la gran amplitud de rango en la distribución de tamaño de poro, y el hecho de que la penetración del agua modifica fuertemente la estructura del medio poroso produciendo una fenomenología específica de gran interés. Con este objeto hemos diseñado una serie de experimentos de hidratación de arcilla en una celda de experimentación transparente, paralelepípeda, con una dirección espacial restringida, de forma que se pueda seguir la evolución de la geometría de la interfase por medio de técnicas de tratamiento digital de imagen. Para ello se registrará la imagen con una cámara CCD conectada a un ordenador con tarjeta de digitalización de imagen. La presión constante se consigue por medio de una bomba de cilindro (actuando por medio de un motor paso a paso) con un sistema de retroalimentación. Tanto la presión como el caudal se monitorizará a través del ordenador que irá registrando, a través del puerto serie, los valores que envíe la bomba a través de su salida RS-232. Además se medirá la velocidad media de avance de la interfase (trabajando a presión constante). El *frenado* de la interfase y el aumento de la presión, respectivamente, serán funciones no lineales de la presión o del flujo fijados debido a que la estructura del medio poroso cambia con la hidratación.

En esta primera etapa del laboratorio se han realizado diversas experiencias de hidratación de arcillas compactas en distintas condiciones. Los parámetros que se han barajado inicialmente han sido la densidad seca de la arcilla, el sistema de hidratación y el tamaño del sistema. Así pues, para su identificación a lo largo del presente informe, vamos a etiquetar los experimentos de acuerdo con la siguiente tabla:

**Tabla 1: Características de las muestras de bentonita.**

Denominación	Densidad	Tamaño	Humedad	Presión
<b>D15</b>	<b>1,50 gr/cm<sup>3</sup>.</b>	<b>12 cm</b>	<b>13.6</b>	<b>Succión</b>
<b>D16</b>	<b>1,65 gr/cm<sup>3</sup>.</b>	<b>12 cm</b>	<b>13.6</b>	<b>Succión</b>
<b>D17</b>	<b>1,75 gr/cm<sup>3</sup>.</b>	<b>12 cm</b>	<b>12.9</b>	<b>Succión</b>
<b>L2</b>	<b>1,65 gr/cm<sup>3</sup>.</b>	<b>2 cm</b>	<b>12.9</b>	<b>Succión</b>
<b>P5</b>	<b>1,65 gr/cm<sup>3</sup>.</b>	<b>12 cm</b>	<b>13.6</b>	<b>P=500 kPa</b>
<b>MAQ</b>	<b>1,65 gr/cm<sup>3</sup>.</b>	<b>80 cm</b>	<b>13.6</b>	<b>P=600 kPa</b>

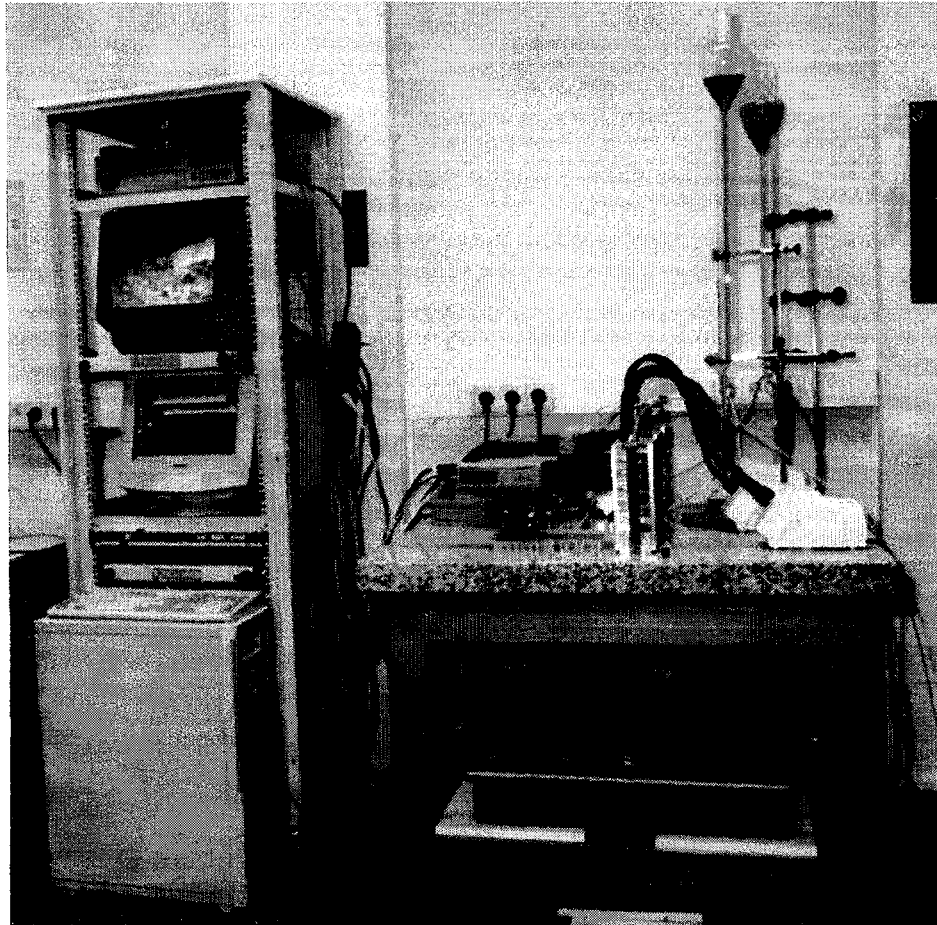
Dada la limitación en el número de celdas, así como en la instrumentación, el tiempo máximo de ejecución de los experimentos ha sido de seis meses, con el fin de poder realizar nuevos montajes. Los experimentos que se han realizado se han centrado en la etapa inicial del proceso en la que se espera puedan existir mayores diferencias entre las distintas condiciones del experimento: densidad seca de la arcilla, tamaño de la muestra y sistema de hidratación.

Cabe señalar que anteriormente a estos experimentos que aquí se detallan, se realizaron una serie de experiencias en un laboratorio ajeno al CIEMAT (Laboratorio de Sistemas Complejos del departamento de Física Fundamental, de la UNED), en las que se pusieron a punto las técnicas de digitalización y tratamiento de imagen, se estudió la correlación entre las distintas variables de color y el grado de humedad y se hicieron las primeras pruebas: con distintas celdas, distintos colorantes, distintas configuraciones del

sistema de hidratación; así como se desarrollaron las técnicas de análisis de las interfases obtenidas y se obtuvieron los primeros resultados.

### 1.1.1 Esquema general

Como primer paso para la elaboración de los experimentos, se ha constituido un nuevo laboratorio en la División de Caracterización Hidrogeoquímica de Emplazamientos: Laboratorio de Imágenes y Modelización de Medios Porosos. Por ello, una primera serie de experimentos se realizaron en el Laboratorio de Sistemas Complejos, del Departamento de Física Fundamental de la UNED, a partir de los cuales se definió el sistema experimental, así como el conjunto de necesidades básicas del Laboratorio de Imágenes.

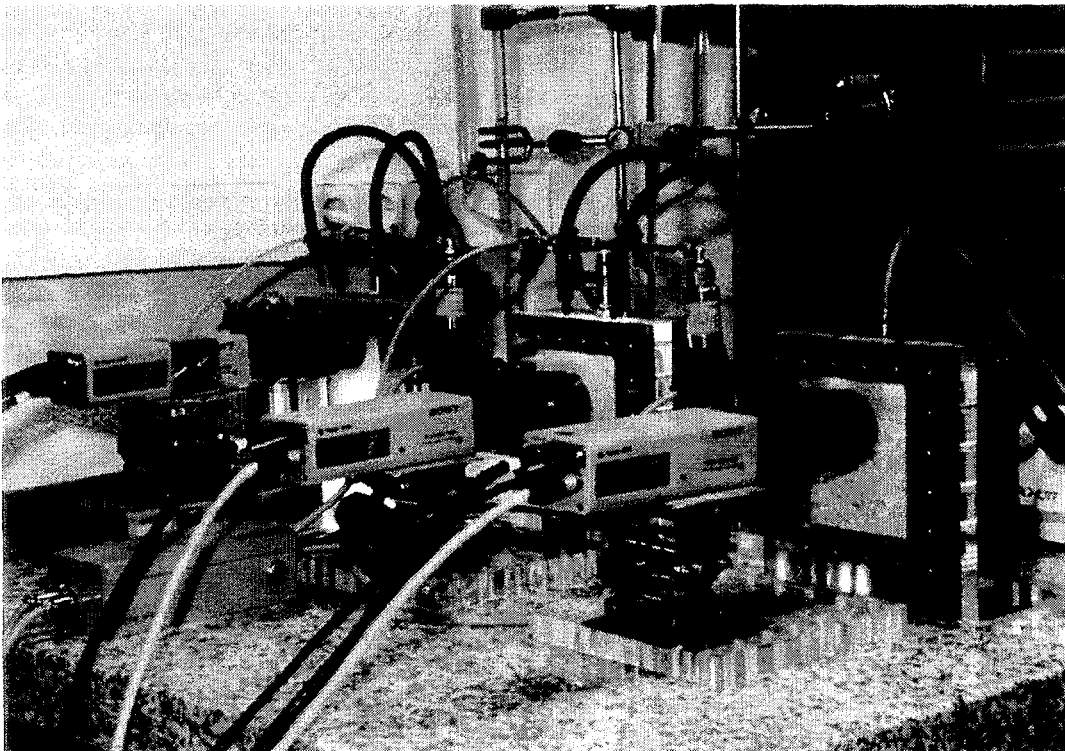


**Figura 1**

Una imagen general del Laboratorio se muestra en la figura anterior, en la que se ven los elementos básicos del dispositivo experimental. En primer lugar, una mesa de granito

robusta (de gran estabilidad que permite aislar los experimentos), provista de una matriz de casquillos M6 que permite atornillar los distintos elementos a la mesa. Sobre ésta, se puede observar la disposición de las celdas, las cámaras, el sistema de iluminación, y el sistema de hidratación. Respecto a éste último, en la parte inferior de la mesa se observa la bomba controladora de presión; y sobre la mesa, unas buretas que alimentan las celdas hidratadas por succión. A la izquierda de la mesa se observa un rack donde se distribuye gran parte del equipo: alimentación de las cámaras, el monitor, un vídeo de intervalo variable (que permite grabar hasta 160 veces más lento que los normales) para registrar ciertos eventos para que puedan ser reanalizados posteriormente, el *conmutador* que selecciona la cámara que va a mandar la señal a la tarjeta de adquisición y el ordenador que se comunica con los sistemas externos, como son la bomba y el datalogger (que guarda la señal de la presión de los transductores).

Una visión general del dispositivo experimental se muestra en la siguiente figura.



**Figura 2**

Esquemáticamente, el sistema consta de una celda (1) donde se encuentra la arcilla a hidratar, un sistema de hidratación que aportará el agua para el experimento y un sistema

de visualización que nos permite determinar la posición del frente de hidratación y otros valores determinados a partir de las variables de color.

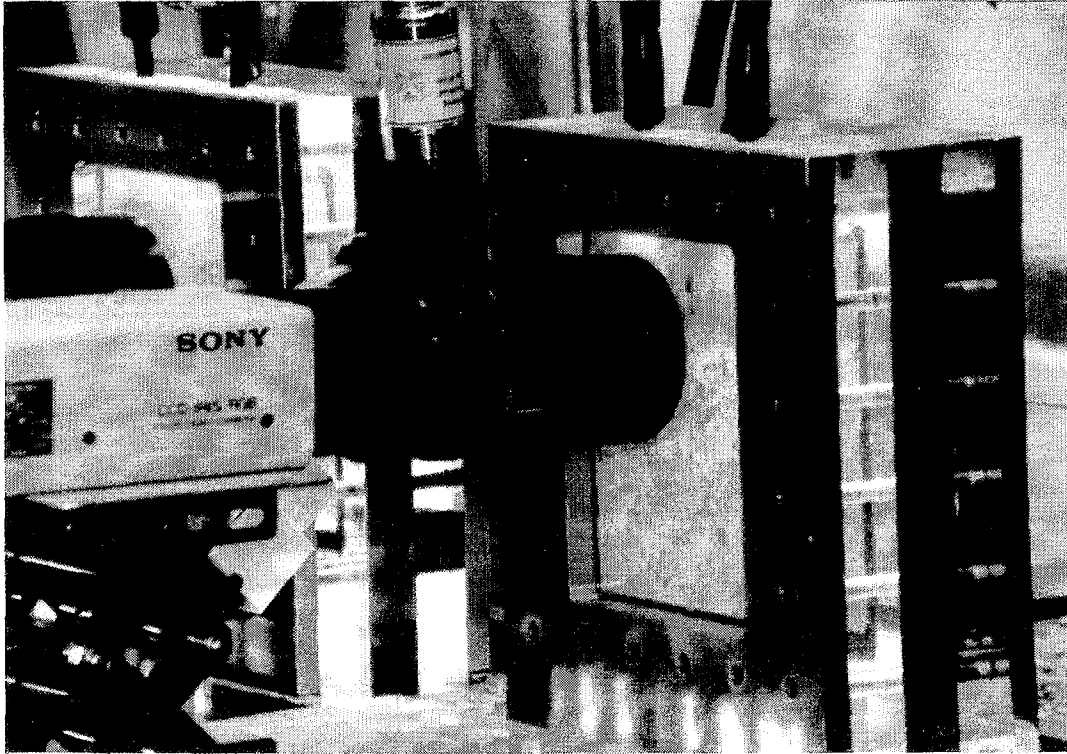
En la fotografía se observan tres experimentos de hidratación. La entrada de agua se realiza por el punto central superior; la celda A (correspondiente al experimento P5) está alimentada mediante una bomba (B) a través de conectores Legris; las celdas B y C (correspondientes a los experimentos D15 y D17, respectivamente) están alimentadas por medio de una bureta (Bu), presentando una "T" a la entrada de la celda para conectar un transductor de presión (T) que registrará las variaciones de volumen de la bureta. Estas variaciones de volumen corresponden directamente a la entrada de agua en la celda.

Sobre la zona superior de la celda se observan también los brazos del sistema de iluminación fría (I) que transmiten la luz a través del borde superior del metacrilato. De esta forma se obtiene una iluminación tangencial que resalta el relieve y permite detectar los cambios de textura que ocurren con la saturación de la arcilla. Además, el sistema de iluminación por fibra óptica elimina el infrarrojo evitando así un calentamiento de la muestra.

Para complementar la iluminación por transmisión dentro del metacrilato, se ilumina de forma indirecta (II) con luz de tipo fluorescente (blanca o negra según el tipo de estudio que se quiera realizar), y de forma indirecta para evitar zonas saturadas de luz.

La adquisición de la imagen se hace a través de las cámaras de vídeo CCD con objetivo zoom-macro. Este tipo de objetivos nos permite variar el campo de visión desde toda la muestra hasta un par de centímetros; esto, junto con el tipo de cámara utilizada se traduce en una resolución variable entre 25 micras y 0,15 mm. Como se puede ver en la Imagen (Cámaras), las cámaras están fijadas sobre unas plataformas elevadoras (tipo labjack) para poder desplazarlas cuando el frente de hidratación alcanza el extremo de la zona de visión. El desplazamiento se mide a partir de puntos particulares sobre la imagen digitalizada antes y después del desplazamiento. En la Imagen (Cámara-Celda) se observa el tipo de imagen que recoge la cámara, reconociéndose la región hidratada por su color amarillento debido a la fluoresceína del agua; con la configuración de macro utilizada, el campo de visión de la cámara es de aproximadamente 2 cm. En la Foto (arcilla) se ve con más detalle la imagen que recoge la cámara. Además del cambio

de color, se observa el cambio de textura en los granos dependiente del grado de saturación de la muestra, adquiriendo un aspecto más difuso y pastoso cuando alcanza alto grado de saturación. También se puede reconocer en la imagen, en el borde superior de la celda la capa de geotextil (en blanco) que difunde el agua entrante.



**Figura 3**

Estas cámaras de vídeo presentan dos tipos de salidas, una RGB que se digitaliza mediante la tarjeta del ordenador, y otra de vídeo compuesto que permite conectarse a un vídeo de grabación lenta (de intervalo variable) para registrar la evolución de la imagen completa durante largos periodos de tiempo.

Para poder realizar varios experimentos a la vez se ha utilizado un *conmutador* de vídeo controlable por ordenador, de modo que el programa que controla el experimento va cambiando el canal de entrada del *conmutador* para tomar una imagen de cada celda y procesarla cada cierto intervalo de tiempo.

A continuación se pasa a detallar los elementos y sistemas principales del dispositivo experimental.

### **1.1.1.1 La celda**

Para poder visualizar el frente de hidratación de la arcilla se ha diseñado una celda transparente. Esta consiste básicamente en un marco de acero de forma cuadrada y con un espesor de 2 cm en el que se inserta la arcilla compactada (denominada *pastilla*), y cerrada por dos tapas transparentes a través de las cuales se podrá ver y seguir la evolución del frente de hidratación. El interior del marco de acero, donde se aloja la arcilla es de 120x120x20 mm; sin embargo, es posible limitar una de las dimensiones por medio de unos suplementos de metacrilato de 20 mm de espesor, que se colocan para rellenar la celda entre la arcilla y el final de la celda de modo que se pueden conseguir longitudes de 2, 4, 6, 8 10 y 12 cm de muestra. Las tapas de la celda son 2 placas transparentes de metacrilato de 20 mm de espesor. El marco de la celda es de acero y presenta 2 orificios centrados en 2 de sus caras (diametralmente opuestas) para la entrada del agua y la salida del aire (cabe mencionar que el hecho de permitir la salida del aire desplazado en el proceso de avance del agua podría influir en la dinámica general cuando se compara con experimentos similares en los que no existe vía de escape para este aire contenido inicialmente en la arcilla; este hecho se comentará más adelante). Para soportar la presión de hinchamiento las caras de metacrilato están, a su vez, cogidas por sendos marcos de acero de 10 mm que cierran firmemente la celda y evitan la flexión del metacrilato por la presión interna.

Entre la arcilla y el marco de acero, en la región por donde va a entrar el agua, se coloca una capa de geotextil (TERRAM 4000), de forma que la hidratación de la arcilla no sea puntual sino que se obligue al agua a difundir a lo largo de toda la longitud de la celda, presentando así un frente de avance uniforme. Este hecho está mencionado en anteriores informes, y se constata al observar una entrada inicial uniforme de agua a lo largo de toda la arcilla.

### **1.1.1.2 Sistema de hidratación**

Los experimentos se han realizado con dos sistemas de hidratación sustancialmente distintos: con presión de entrada (por medio de una bomba dotada de presostato) y con entrada libre controlada únicamente por la succión de la arcilla.

Los experimentos sin presión de entrada se realizan alimentando la celda por medio de una bureta, de modo que el flujo de entrada lo determinará la propia dinámica del

sistema; la bureta se abre al comienzo del experimento dejando que la arcilla tome toda el agua que quiera. El volumen de agua infiltrada se obtiene a partir del volumen de la bureta. Como comentaremos más adelante, la hidratación de la celda no se ve condicionada por las pequeñas variaciones de presión que existan en la bureta a medida que ésta se va vaciando al llenarse la celda. De la misma manera hemos verificado que, respecto a la dinámica del proceso de hidratación, no influye el sentido de entrada de agua, ya sea ésta a favor de la gravedad o en contra. Esta verificación se ha realizado alimentando la celda por el orificio inferior, siendo la evolución de la entrada de agua a la celda la misma para ambos casos.

En la figura siguiente se observa la variación de la presión en el datalogger cuando se procede a llenar la bureta. Las regiones planas corresponden a intervalos de tiempo en los que no se varió el volumen de la bureta. Se muestra la dependencia lineal de la presión registrada por el datalogger a partir del transductor en función del volumen de la bureta. La medida del volumen de agua infiltrada en la muestra se determina sencillamente por la presión de la columna de agua de la bureta. Este sencillo (y económico) método nos permite determinar el volumen de agua que resta en la bureta, y consecuentemente, el volumen infiltrado será la diferencia con el volumen inicial. La presión se mide con un transductor de presión localizado justo a la entrada de la celda, por medio de conexión en "T". La señal del transductor se recoge en un datalogger a una frecuencia típica de 1 Muestra/s al comienzo de los experimentos, pasando después a ser de una muestra por minuto (cuando el flujo de entrada se hace extremadamente pequeño). Con este sencillo sistema, la resolución final en el volumen, a la salida del datalogger es, sin considerar fluctuaciones térmicas, de  $\pm 0,06 \text{ cm}^3$ . De este modo, la manera habitual de proceder es la siguiente: se purga previamente el transductor y los conductos; se rellena completamente la bureta, situada en la misma mesa que la celda; y se abre la llave que está situada directamente sobre la entrada de la celda. El volumen de entrada se determinará restando al valor inicial de la presión de la columna de agua la presión que vaya registrando el datalogger.

La hidratación mediante bomba se ha realizado a una presión comparable a la de entrada en la maqueta (500 kPa). El control de la presión se hace mediante un sistema de retroalimentación que lleva incorporada la bomba, lo que a su vez permite conocer en cada instante la presión y el volumen de agua en el sistema. Mediante una salida RS-232



de la bomba, podemos ir leyendo estos parámetros con una frecuencia prefijada, que varía entre 1M/s para el comienzo del experimento, hasta 1 muestra por minuto cuando el flujo se hace muy pequeño. La precisión de la bomba en el ajuste de la presión es de 1 kPa (siendo la presión máxima de 3 Mpa), y la resolución en el valor del volumen es de  $\pm 1\text{mm}^3$ .

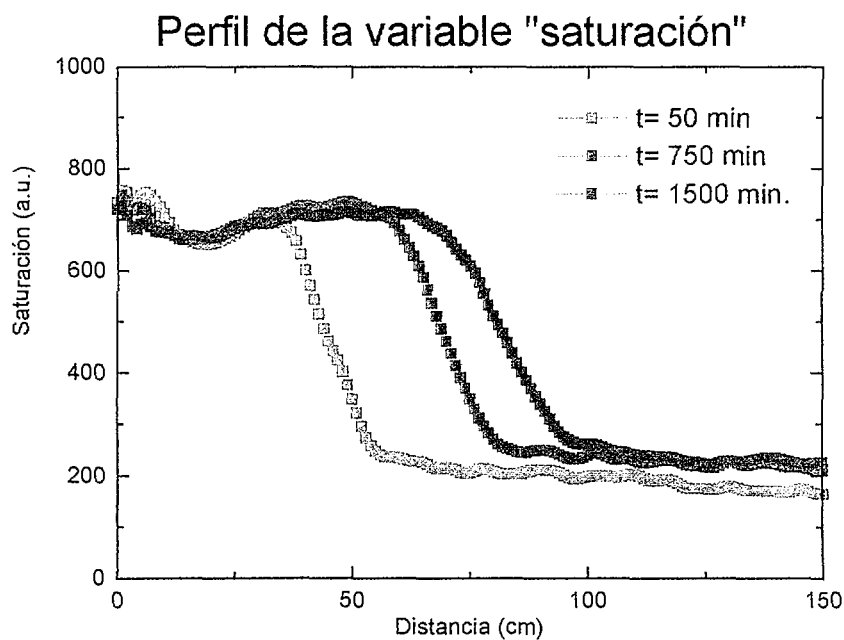
### ***1.1.1.3 Sistema de visualización***

El seguimiento de la interfase se hace a partir de un sistema de visualización. Para ello es necesario teñir el agua, de forma que se pueda observar su avance a través de la arcilla. Inicialmente se probaron diversos colorantes, hasta seleccionar la fluoresceína por su alto grado de disolución a nivel molecular, evitando que fuera filtrada en su avance a través de la arcilla. Este hecho se ha verificado varias veces, al seccionar muestras de arcilla, después de varios meses de hidratación, y midiendo la humedad en pequeñas secciones respecto a la dirección de avance del frente; se observa una clara correlación entre el color de la arcilla y el grado de humedad medido. Se tiene previsto hacer un estudio para obtener una medida cuantitativa indirecta de la humedad de la arcilla a partir de medidas de color.

El sistema de visualización consta de una cámara de vídeo CCD/RGB, con un objetivo macro, que cubre un campo visual de aproximadamente 2-3 cm; el CCD de la cámara es una matriz de sensores que recoge el valor de intensidad de los tres colores fundamentales (rojo, verde y azul) en cada pixel, representando así la imagen de la arcilla en 400.000 puntos. Esta envía la señal de color (R,G y B) a una tarjeta digitalizadora instalada en un ordenador. De esta forma, cada cierto tiempo, la tarjeta toma una imagen de la cámara, la digitaliza y un programa especialmente diseñado para tal efecto, obtiene la información requerida a partir de los valores de las variables de color en cada pixel. Principalmente determina un frente de hidratación a partir del cambio de tonalidad, y obtiene unos vectores (promediado a lo largo del ancho de la imagen) de los valores de ciertas variables de color a lo largo de la dirección de avance del frente.

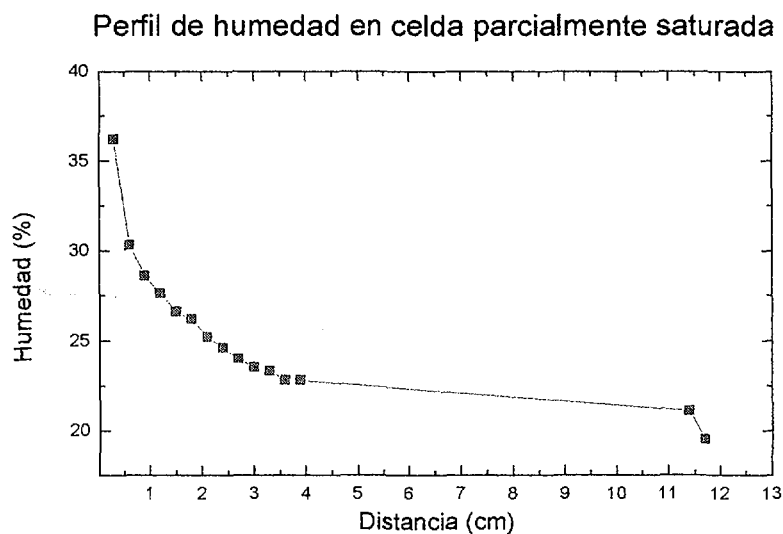
La posición de la interfase del frente de hidratación la determina a partir de los valores en cada punto de una cierta variable de color (la “*saturación*” –S-). Se determina un

valor de referencia en la zona hidratada (con altos valores de *saturación*), y un valor en la zona seca (con una *saturación* pequeña), de modo que se puede definir arbitrariamente como frente de hidratación aquel en el que la *saturación* toma el valor intermedio entre la referencia de zona hidratada y la de zona seca (cabe señalar que esta definición, siendo arbitraria, no condiciona la dinámica del frente, puesto que otras referencias únicamente cambiarían sistemáticamente la posición exacta de la interfase pero no su evolución). El programa captura tres imágenes consecutivas (en menos de un segundo) y las promedia para reducir el efecto de las fluctuaciones de luminosidad. Una vez almacenada la imagen promediada, determina dos primeros puntos cuya saturación corresponda al valor umbral, y a partir de estos, va buscando entre los próximos vecinos, y desde la zona hidratada, el siguiente punto cuya *saturación* sea menor o igual que el valor umbral. De esta forma se obtiene una interfase que nos diferencia la zona *hidratada* de la zona *seca*, esto es, que presenta un contenido en agua inferior al umbral (aunque el color vendrá dado por la concentración de colorante, hemos verificado que ésta no cambia durante el avance del agua a través de la arcilla, de modo que podemos asociar un contenido de agua con esta variable de color). Una visión general de la arcilla se muestra en la foto. Se puede observar en la parte superior la región saturada en tono rojizo, pasando a continuación a una región amarillenta donde se puede definir la interfase de hidratación; más abajo se puede ver la arcilla compactada donde todavía no ha llegado el frente de hidratación.



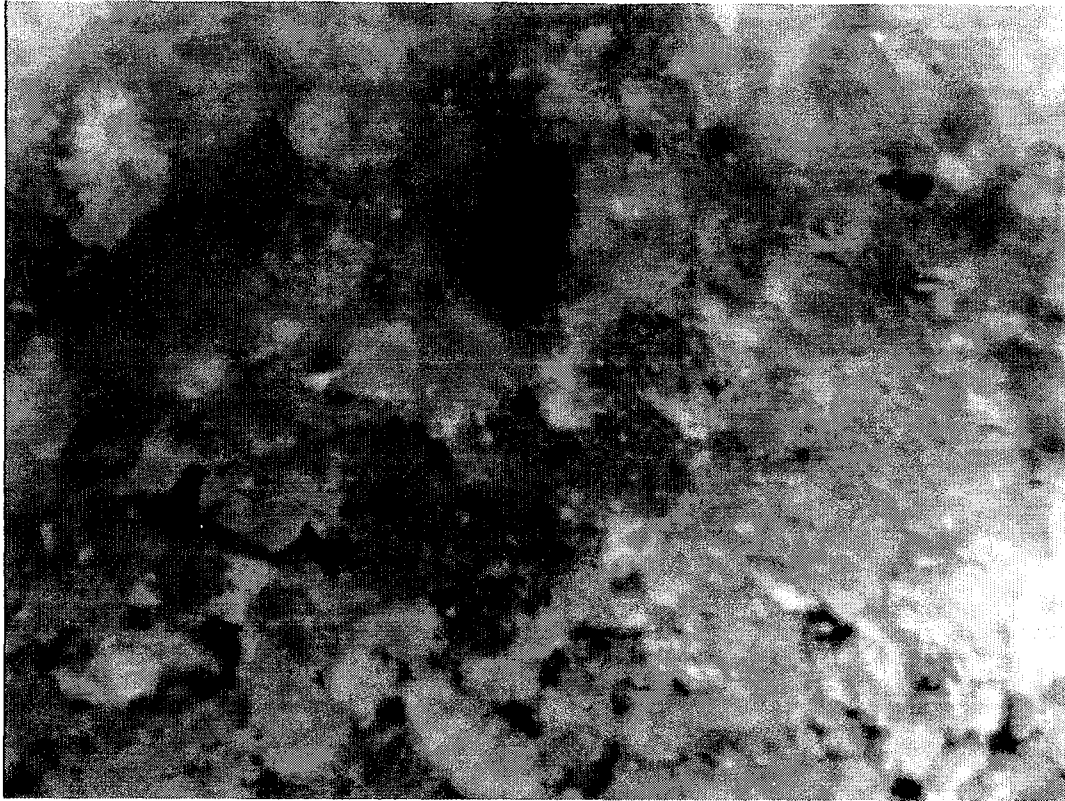
En la Figura 4 se muestra una sucesión de perfiles de la variable *saturación* para distintos tiempos. Se observa como presenta una región inicial con un alto valor de esta variable, aunque con algunas fluctuaciones debido a los cambios de color debido a distintos grados de saturación de la arcilla; por otra parte, en la zona más alejada de la entrada de agua se observa un valor medio de la variable *saturación* bastante más bajo, correspondiente a la zona seca de la arcilla. También podemos comentar que aunque la forma de la curva del perfil de *saturación* es semejante para distintos tiempos, se puede observar cómo el valor de “seco” va aumentando ligeramente (aunque esto no influirá en la determinación de la posición media del frente de hidratación puesto que toma los valores iniciales de “húmedo” y “seco”), lo que indica que existe un proceso de hidratación previo de pequeña magnitud por delante del frente propio de hidratación.

En unas primeras pruebas iniciales, para una determinada concentración de colorante y un determinado sistema de iluminación, se determinó que el valor umbral definido para



**Figura 5**

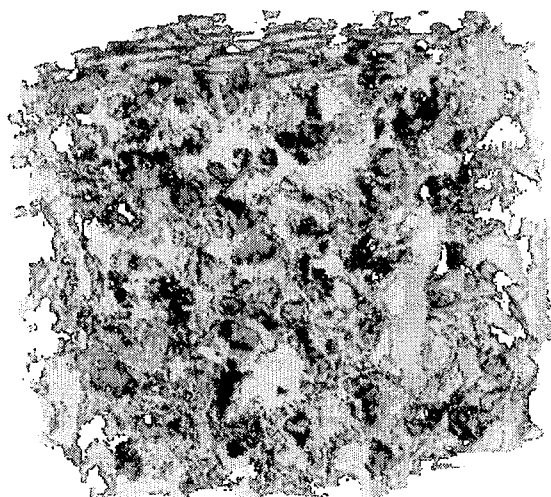
el perfil de hidratación correspondía a una humedad del 25% (determinada *a posteriori* realizando un estudio de humedades para distintas secciones de la arcilla). En la Figura 5 se muestra un perfil de humedad a lo largo de la celda, obtenida para una muestra de arcilla hidratada durante 90 días, cuya densidad seca inicial era de  $1,65 \text{ gr/cm}^3$ .



**Figura 6**

Por otra parte, el agua que va hidratando la muestra deja a su paso una estructura distinta de material que se puede observar directamente. En la imagen anterior se muestra una porción de pastilla hidratada. Se puede observar que la región superior (el agua avanza hacia abajo) muestra una textura claramente diferente debido al cambio de estructura de la arcilla completamente saturada; a continuación existe una región con cierta variación de color, correspondiente a la zona que se está saturando; a partir de aquí se observa (no en la imagen) una degradación de color (en aproximadamente en un centímetro) hasta el color propio de la arcilla. Este cambio de textura de la imagen se va a traducir en un cambio en otra variable de color distinta (para el cambio de unidades, de RGB a HSI, el *matiz* (denominada H, del inglés “hue”). A partir de los cambios de esta variable, vamos a poder definir un frente medio de saturación, que va a corresponder a la región de la arcilla que se encuentra saturada de agua en un 80 % aproximadamente. Para ello se obtienen los valores de *matiz* para una columna de puntos (en la dirección de avance del frente), y se promedia para todas las columnas de

la imagen. El resultado es una curva como la mostrada en la Figura , en la que se observa un valor inicial creciente hasta alcanzar un máximo, y luego una caída, correspondiente a la región en la que se observa un tono ligeramente verdoso en la muestra. Esta región debe corresponder a una saturación prácticamente completa de la arcilla. A partir del cambio de inflexión de esta curva, podemos definir un frente medio de saturación. A lo largo del proceso de hidratación de la pastilla se observa cómo se va desplazando ese mínimo.



**Figura 7**

**Bibliografía:**

F. A. L. Dullien, M. S. El-Sayed and V. K. Batra, *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 60, N° 3, July 1977.

R. D. Laughlin and J. E. Davies, "Some Aspects of Capillary Absorption in Fibrous textile Wicking", *Textile Research Journal*, October, 1961.

M. Kardar, G. Parisi, and Y. -C. Zhang, *Phys. Rev. Lett*, **56**, 889(1986).

M. A. Rubio, C. A. Edwards, A. Dougherty, and J. P. Gollub, Phys. Rev. Lett, **63**, 1685 (1990).

V. K. Horváth, F. Family, and T. Vicsek, Phys. Rev. Lett. **67**, 3207(1991).

S. He, Galathara L. M. K. S. Kahanda, and Po-zen Wong,PRL, **69**, 3731(1992).