

Capítulo 3: Metodología y programa experimental

Para plantear el programa experimental de caracterización del comportamiento hidromecánico de las mezclas de pellets de bentonita se tuvieron en cuenta dos factores. Por un lado las características estructurales propias del material y por otro las características del emplazamiento del material y su utilización como barrera de ingeniería. Como antecedentes al planteo de los trabajos experimentales se consideraron los trabajos de Villar (2000) y los trabajos experimentales realizados en el proyecto FEBEX, (ENRESA, 2000). De acuerdo con las características estructurales del material observadas en el Capítulo 1, se trata de una mezcla granular formada por unidades muy expansivas. Es un material que en su estado de fábrica presenta una estructura abierta y caracterizada por una porosidad muy interconectada. Esta estructura permite el acceso de agua en el material durante los procesos de mojado inyección. Una vez en contacto con el agua y durante el proceso de hidratación, el material sufre grandes cambios estructurales. Los pellets de bentonita se hidratan, expanden, se desarrolla una fuerte presión de hinchamiento y la permeabilidad del material baja drásticamente. El desarrollo de presiones de hinchamiento y su baja permeabilidad en estado saturado, determinan la necesidad de aplicar grandes presiones de confinamiento para mantener la condición de volumen constante y aplicar elevados gradientes hidráulicos para que el agua que circula dentro de la probeta se pueda medir.

La utilización de este material en la construcción de barreras de ingeniería de aislamiento profundo, determina que el proceso de hidratación del material se desarrolle en condiciones de confinamiento o semi-confinamiento. Debido a la baja porosidad ($n=0.07$) y la poca cantidad de agua disponible en la roca que aloja la barrera, se utilizó un sistema de inyección de agua adicional. Se colocaron una serie de tubos longitudinales y paralelos entre si, que permiten inyectar agua dentro del material. El agua es inyectada en los tubos desde un único punto. Los tubos están conectados entre sí por niveles y el proceso de llenado sigue un recorrido de abajo a arriba y desde delante hacia atrás. Esto determina que la hidratación del material no se dé en forma homogénea y uniforme. El agua inyectada entra en el material provocando diferentes ritmos y cinemáticas de hidratación. En zonas del material ubicadas en las cercanías a los tubos de inyección, el material se inundará muy rápidamente. Mientras que en las zonas del relleno más alejadas de los inyectores, el material se mojará de forma más

lenta y progresiva. En la Figura 3.1 se muestran diferentes detalles del sistema de inyección de agua. En la Figura 3.1-a se presenta un corte longitudinal del ensayo a escala real y se indica el recorrido del agua durante el proceso de inyección. En la Figura 3.1-b se muestra un detalle de un tubo inyector dentro del material ya emplazado y una vista frontal del ensayo previo a la instalación de los pellets.

Tomando en cuenta estos factores se ha desarrollado una metodología de trabajo adecuada a la caracterización hidro-mecánica de las mezclas de pellets de bentonita siguiendo tres etapas. En una primera instancia, se estudio el comportamiento del material en condiciones saturadas. En una segunda etapa, se plantearon ensayos para el estudio de la condición no saturada. Ensayos con succión controlada donde se estudio la variación del comportamiento del material con el grado de saturación. Finalmente, se realizó un tercer grupo de ensayos cuyo objetivo fue reproducir las distintas condiciones y cinemáticas de hidratación determinadas por las características naturales del emplazamiento y el sistema de inyección. En muchos casos no se ha encontrado o no existe una normativa o procedimiento de ensayo estándar que permita reproducir las condiciones de emplazamiento. De igual forma y debido a las características particulares del material, los equipos convencionales resultan inadecuados para la realización de los ensayos planteados. Estos factores han obligado en muchos casos al diseño de equipos de laboratorio y a la adaptación de protocolos de ensayo.

A continuación se presenta la descripción de cada uno de los distintos ensayos. La presentación de los ensayos y la descripción de procedimientos, se ha realizado de acuerdo al tipo de ensayo y de forma independientemente de la cronología seguida en el programa experimental. En cada ensayo se indican los principios fundamentales del ensayo, el tipo de información que se obtiene, se describe el procedimiento y dispositivo de ensayo y en el caso que corresponda, la normativa utilizada. En todos los ensayos y a no ser que se indique lo contrario, las muestras ensayadas se fabricaron utilizando una mezcla de pellets preparada de acuerdo a la curva granulométrica óptima, indicada en el apartado 1.3.1.3 y siguiendo el procedimiento de compactación estática indicado en el apartado 1.1.4. Como agua de hidratación se utilizó el agua de la formación geológica que contiene el almacenamiento (Mon Terri), agua de Pearson (2002). Los ensayos se realizaron a temperatura constante e igual a 21 °C.

Los ensayos realizados se pueden describir agrupados de la siguiente manera:

- Comportamiento hidráulico
 - Permeabilidad saturada
 - Ensayos de infiltración
 - Curvas de retención
- Comportamiento de hinchamiento, expansión y compresibilidad
 - Presión de hinchamiento
 - Hinchamiento bajo carga
 - Compresibilidad con control de la succión
 - Presión de hinchamiento con control de la succión
- Influencia del tipo de transferencia y del ritmo de inyección de agua.
 - Ensayos de transferencia de vapor y transferencia líquida
 - Ensayos con distintos ritmos de inyección

3.1 Comportamiento hidráulico

Para caracterizar el comportamiento hidráulico del material se realizaron ensayos de permeabilidad saturada, ensayos de infiltración y se estudió la relación entre la succión y el contenido de agua o curva de retención. En todos los casos los ensayos se realizaron en condiciones de volumen constante.

3.1.1 Ensayo de permeabilidad saturada

La medida de la conductividad hidráulica en materiales con un alto contenido de bentonita se hace difícil utilizando los equipos convencionales debido a su baja permeabilidad y a su gran capacidad expansiva. Como permeámetros se utilizaron los equipos descritos en el apartado 2.3.1.3, células edométricas de volumen constante con control de la tensión vertical. La utilización de estas células permite aplicar diferentes gradientes hidráulicos, asegurar la condición de volumen constante y obtener una medida de la presión vertical de hinchamiento del material. El principio de este ensayo consiste en medir el volumen de agua que atraviesa una probeta de material por unidad de tiempo en condiciones de gradiente hidráulico constante ($(p_{w2} - p_{w1})$) en la Figura 3.2). La normativa utilizada como base para la realización de este ensayo fue la ASTM

D 4511-00. En la Figura 3.2 se muestra de forma esquemática el dispositivo utilizado en este tipo de ensayos.

Una vez preparada la muestra se coloca en la célula edométrica, se ajusta el cabezal superior de cierre para asegurar la condición de volumen constante. Para controlar el ajuste e imponer el mismo confinamiento inicial en todos los ensayos realizados, se controló la medida de la carga vertical durante las operaciones de ajuste. El ensayo se realiza siguiendo dos etapas: una primera etapa de saturación y una vez alcanzada la saturación, una etapa donde se mide la permeabilidad. Durante la etapa de saturación se impone un flujo en la muestra desde la parte inferior y se registran los caudales entrante y saliente de la muestra. La muestra se considera saturada cuando se igualan ambos caudales y se alcanza el estado estacionario. En la segunda etapa, se aplica una presión de inyección de agua y se mide el volumen de agua (ΔV) que circula a través de la muestra en un intervalo de tiempo (Δt). La permeabilidad se calcula a partir de la diferencia de presión Δp_w a ambos extremos de la muestra de altura H_{muestra} . Aplicando la ley de Darcy para flujo en medios porosos saturados dada por:

Equation Chapter 3 Section 1

$$k_w = \frac{q}{i} = \frac{\Delta V \cdot \gamma_w \cdot H_{\text{muestra}}}{\Delta t \cdot A \cdot \Delta p_w} \quad (3.1)$$

donde γ_w es la densidad del agua y A es el área de la muestra.

3.1.2 Ensayos de infiltración

El estudio de la permeabilidad en condiciones saturadas nos determina una condición límite en el comportamiento del material. Este valor que resulta determinante en el diseño de las características de la barrera en condiciones de servicio (largo plazo). Sin embargo, el conocimiento de la evolución de la permeabilidad a lo largo del proceso de saturación, resulta de fundamental importancia en la determinación del tiempo necesario para alcanzar y completar la saturación de la barrera. Para estudiar la evolución de la permeabilidad con el grado de saturación se realizaron distintos ensayos de infiltración. El principio de estos ensayos es el de inyectar agua en una muestra que se mantiene en condiciones de volumen constante y estudiar la evolución de las diferentes variables a lo largo del proceso de saturación.

Se realizaron tres tipos de ensayos: ensayos de infiltración preliminares, ensayos de infiltración en células de volumen constante y ensayos de infiltración y almacenamiento. El primer tipo de ensayos de infiltración, se corresponde con los ensayos realizados para la selección de la mezcla óptima (apartado 1.2.2.1). A continuación se describen los procedimientos experimentales, dispositivos de ensayo e información obtenida a partir de cada uno de los últimos dos grupos de ensayos.

3.1.2.1 Ensayos de infiltración en células de volumen constante

El objetivo de estos ensayos es obtener información sobre la evolución del contenido de agua y de la densidad seca de una muestra a lo largo del proceso de saturación. Para realizar estos ensayos se utilizaron las células de infiltración de volumen constante descritas en el apartado 2.3.3.2. El mayor tamaño de las muestras permite utilizar un material con un tamaño máximo de pellet de hasta 20 mm.

Se realizaron dos grupos de ensayos sobre muestras idénticas y con un mismo valor de densidad seca igual a 1.5 Mg/m^3 . En cada grupo de ensayos se aplicó una evolución de la presión de inyección de agua diferente (Figura 3.3). El tiempo cero indica el inicio del proceso de inyección de agua. En un grupo de ensayos, indicados como ensayos de inyección rápida, se adoptó un valor de presión de inyección constante e igual a 500 kPa desde un principio del ensayo (Figura 3.3-a). En el segundo grupo de ensayos, indicados como ensayos de inyección lenta, se incremento la presión de inyección partiendo de cero y llegando a un valor igual a 500 kPa durante el primer minuto de inyección (Figura 3.3-b). Se realizaron varios ensayos siguiendo cada uno de estos procedimientos y variando el tiempo total de inyección.

El procedimiento general de ensayo fue el siguiente: se prepararon muestras de 75 mm de diámetro y 100 mm de altura. Para ellos se utilizó una compactación estática en cuatro capas de 25 mm cada una de acuerdo con el procedimiento indicado en el apartado 1.4.1. Una vez preparada la muestra, se cerró la célula de infiltración asegurando así la condición de volumen constante y se conectó el dispositivo de ensayo indicado en la Figura 3.4. Seguidamente, se realizó la inyección de agua de acuerdo con el tipo de ensayo seleccionado, rápido o lento. El sistema de inyección de agua se compone de un reservorio formado por un tubo de metacrilato presurizado y que como fluido de presión utiliza aire. El agua se inyectó en la muestra desde su parte inferior y el volumen inyectado se controló midiendo la variación del peso del reservorio durante

el ensayo. Para ello se utilizó una balanza electrónica (+/- 0.01 g). Finalizada la etapa de inyección, se extrae la muestra, se corta en rebanadas transversales y se mide el contenido de agua y la densidad seca de cada una de las rebanadas. La medida de la densidad seca se realizó utilizando el procedimiento de parafina de acuerdo con la normativa ASTM 4531-86.

Como resultado de estos ensayos, se obtiene información de la evolución de la distribución del contenido de agua y de la densidad seca a lo largo de la muestra en correspondencia con un tipo de inyección y con un grado de saturación global. A partir de esta información, es posible reconstruir la historia de la evolución del contenido de agua y de la densidad seca del material a lo largo del proceso de hidratación. La interpretación de los ensayos de infiltración no se puede realizar en forma directa y requiere de la utilización de herramientas de análisis numérico. En este caso se utilizó una técnica de retro análisis mediante el código numérico CODE_BRIGHT. Este código numérico, implementado en Fortran utiliza la técnica de elementos finitos para resolver el problema de flujo planteado en estos ensayos.

3.1.2.2 Ensayos de infiltración y almacenamiento

En los ensayos de infiltración y almacenamiento se estudió la evolución de la permeabilidad y el almacenamiento de agua en el material durante el proceso de saturación. El principio de estos ensayos es el de imponer un flujo de agua a través de una muestra de pellets mantenida a volumen constante. A lo largo del proceso de inyección se controla la evolución de: el flujo entrante (q_T), el flujo saliente (q_M) y la cantidad de agua almacenada en la probeta (q_{Al}). El principio de estos ensayos se muestra en forma simplificada en la Figura 3.5. El objetivo de estos ensayos es reproducir el comportamiento del material durante el proceso de saturación por inyección de agua y obtener información constitutiva sobre la evolución de la permeabilidad con el grado de saturación ($k(S_r)$).

Para realizar estos ensayos se utilizaron las células edométricas de volumen constante descritas en el apartado 2.3.1.3. Se prepararon muestras de 20 mm de altura y 50 mm de diámetro utilizando compactación estática. Como material para la fabricación de las muestras se utilizó una mezcla de pellets de tamaño medio uniforme de 4 mm. Una vez preparada la muestra, se colocó en la célula edométrica y se conectó al dispositivo de

ensayo, Figura 3.6. Para el control del volumen de agua inyectado (ΔV_1) por unidad de tiempo (Δt) se utilizó un reservorio de metacrilato presurizado con aire, mientras que para control del volumen saliente (ΔV_2) se utilizó un reservorio mantenido a presión atmosférica. La medida de los flujos entrante y saliente de la muestra se realizó controlando el peso de ambos reservorios utilizando balanzas electrónicas (± 0.01 g). Luego de realizado el montaje del dispositivo de ensayo, se da comienzo a la inyección de agua abriendo la llave indicada como A en la Figura 3.6. La presión de inyección se mantiene constante e igual a 200 kPa durante todo el ensayo. Parte del agua inyectada atraviesa la muestra y es recogida en el reservorio de salida (ΔV_2) mientras la restante queda almacenada. La evolución del agua almacenada en la muestra se calcula a partir de la diferencia entre el flujo entrante y el flujo saliente, $\Delta V_{Al} = \Delta V_2 - \Delta V_1$. Considerando el volumen de agua que sale de la muestra ΔV_2 por unidad de tiempo Δt , y aplicando la ley de Darcy expresada como:

$$k_{wM} = \frac{q_M}{i} = \frac{\Delta V_2 \cdot \gamma_w \cdot H_{\text{muestra}}}{\Delta t \cdot A \cdot \Delta p_w} \quad (3.2)$$

se calcula la permeabilidad de la muestra asociada a los vacíos entre pellets, porosidad macro. Como resultado de estos ensayos se obtiene la evolución de la permeabilidad del material en función del grado de saturación ($k_{wM}(Sr)$). Esta información permite describir el proceso de hidratación de las mezclas de pellets por inyección de agua líquida.

3.1.3 Curvas de retención a volumen constante

La curva de retención del material representa la relación constitutiva entre el contenido de agua o grado de saturación y la succión. Se obtuvieron curvas de retención a volumen constante en trayectorias de humedecimiento y secado sobre muestras preparadas a valores de densidad seca de 1.3, 1.5 y 1.9 Mg/m³. La comparación de estos resultados permite estudiar la influencia del índice de vacíos en el almacenamiento de agua del material. El contenido de agua inicial en las muestras fue de 4-6 % en correspondencia con un valor de succión de 250–300 MPa (valor medido en equilibrio con soluciones de ácido sulfúrico utilizando la técnica de transferencia de vapor). Para obtener las curvas de retención y debido al amplio rango de succiones a estudiar, se

combinaron distintas técnicas experimentales de control y medida de la succión. Las distintas técnicas experimentales se utilizaron dependiendo del rango de valores a aplicar. En rangos de succión altos, entre 300 y 3 MPa, se controló la succión utilizando la técnica de transferencia de vapor, mientras que para valores entre 3 MPa y saturación se utilizó la técnica de traslación de ejes.

3.1.3.1 Curva de retención a volumen constante utilizando transferencia de vapor (300-3 MPa).

Una vez preparada la muestra se colocó en una célula edométrica de volumen constante del tipo de la descrita en el apartado 2.3.1.3. Para acelerar el proceso de transferencia de agua por vapor, se utilizó un sistema de convección forzada de acuerdo con lo que se muestra en la Figura 3.7. La evolución del contenido de agua se controló mediante el pesado de la célula edométrica y del recipiente con la solución salina, utilizando balanzas electrónica con una precisión de +/- 0.01 g. Cada etapa de mojado o secado se mantuvo hasta que el sistema alcanza su estado de equilibrio, es decir no hay intercambio de agua entre la célula edométrica y el recipiente con la solución. Se considera que el sistema ha alcanzado el equilibrio cuando la medida del peso de la célula edométrica y del recipiente se mantienen constantes durante 24 hrs. La duración media de cada una de las etapas de estos ensayos, para el caso de una muestra con una densidad seca de 1.5 Mg/m³ fue de 10 días. Una vez alcanzado el equilibrio, se sustituye la solución y se repite el procedimiento anterior. Utilizando transferencia de vapor se controló la succión en un rango de valores entre 300 y 3 MPa.

3.1.3.2 Curva de retención a volumen constante utilizando traslación de ejes (1.5 MPa – saturación).

Para obtener las curvas de retención en valores de succión entre 3 MPa y saturación se utilizó la técnica de traslación de ejes. Para la realización de estos ensayos se utilizaron células edométricas del tipo de las descritas en el apartado 2.3.1.2 y un dispositivo de ensayo como el que se muestra en la Figura 3.8. Previo a la realización del ensayo se saturó la piedra cerámica y se midió su conductividad hidráulica. Posteriormente, se colocó la muestra en del edómetro y se ajustó el cabezal de carga aplicando una presión vertical de 25 kPa. Partiendo del estado inicial se aplicaron etapas de mojado hasta saturación y posterior secado. La primera de las etapas de mojado se realizó partiendo de las condiciones de fábrica iniciales, 300 MPa de succión, hasta un valor de 1.5 MPa. Este valor se corresponde con el máximo valor de succión que se puede aplicar,

utilizando la técnica de traslación de ejes en este equipo. A partir de este punto se aplicaron sucesivas etapas de mojado hasta alcanzar la saturación y luego de secado. A lo largo de todo el ensayo se mide el cambio en el contenido de agua de la muestra en las diferentes etapas y se mantiene la muestra a volumen constante. Cada una de las etapas se mantuvo hasta que se alcanzó la condición de equilibrio. Esta condición se asume cuando no hay cambios en la carga vertical y la velocidad de variación del contenido de agua en la muestra es menor de 0.05 ml/día. Una vez finalizado el ensayo se extrae la muestra y se miden sus dimensiones y el contenido de agua.

3.1.3.3 Medida de la curva de retención con psicrómetro de transistores

Adicionalmente se realizaron medidas de la succión a lo largo de trayectorias de secado utilizando el psicrómetro de transistores descrito en el apartado 2.2.3. Previo a realizar la medida de la succión utilizando este dispositivo, se realizó la calibración del equipo. La calibración del psicrómetro de transistores consiste en determinar la relación entre los milivoltios de salida del transistor y el valor de la humedad relativa existente en la cámara. Las sondas se calibraron utilizando diferentes soluciones salinas preparadas a diferentes concentraciones y que imponen diferentes valores de humedad relativa (Tabla 3.1). Previo a su calibración, el psicrómetro es llevado al equilibrio con agua destilada (succión cero) y se ajusta el valor de salida del voltaje. El procedimiento de calibración y medida de la succión se realizó de acuerdo con el procedimiento propuesto por Mata *et al.* (2002).

Tabla 3.1. Diferentes soluciones de NaCl utilizadas durante la calibración de los sensores del psicrómetro de transistores y la correspondiente succión aplicada.

Succión total, ψ (MPa)	Concentración de NaCl (mol/L)
0	0
12.2	2.5
28.9	5
40.1	6.3

3.2 Comportamiento de hinchamiento, expansión y compresibilidad

3.2.1 Ensayos de hinchamiento bajo carga

Para estudiar la influencia de la carga de confinamiento en el hinchamiento y capacidad de deformación del material durante la hidratación, se realizaron ensayos de saturación a carga constante. Para realizar estos ensayos se utilizaron edómetros convencionales como los descritos en el apartado 2.3.1.1. El procedimiento de ensayo utilizado se basa en el descrito en la normativa D 4546-90. Una vez preparada la muestra, se coloca el anillo edométrico en la célula, se disponen en la bancada de carga y se ajusta y nivela el marco de carga que apoya sobre el cabezal de la célula edométrica. El ensayo se desarrolla en dos etapas diferentes. Una primera etapa en la cual se carga la muestra en las condiciones de fábrica, y una segunda donde se satura la muestra por inundación. Durante el ensayo se registra la evolución de la deformación vertical y el contenido de agua de la muestra en función del tiempo. El ensayo se da por finalizado cuando la muestra alcanza la saturación y no se registran cambios en la deformación vertical de la muestra en un período de 24 hrs. Luego del ensayo se extrae la muestra, se miden sus dimensiones y el contenido de agua. El dispositivo de ensayo utilizado se muestra en la Figura 3.9.

3.2.2 Ensayos de presión de hinchamiento

Los materiales que contienen minerales arcillosos de estructura laminar, se caracterizan por el desarrollo de deformaciones de expansión durante el proceso de hidratación. Si el proceso de saturación se produce en condiciones de confinamiento o volumen constante, las partículas de suelo aplican una presión sobre la estructura confinante. Al final del proceso de hidratación, cuando la muestra se encuentra completamente saturada y la succión es nula, se alcanza un valor de equilibrio el cual se denomina presión de hinchamiento.

El ensayo de presión de hinchamiento permite determinar el valor de la presión de expansión de una muestra al saturarse en condiciones de volumen constante. Los distintos procedimientos de ensayo se encuentran descritos en la normativa D 4546-90. En este caso se utilizaron las células edométricas de volumen constante y con control de la presión vertical descritas en el apartado 2.3.1.2. El dispositivo de ensayo utilizado se muestra en la Figura 3.10.

La muestra se prepara mediante compactación estática a la densidad de ensayo, se coloca en la célula de volumen constante y se ajusta el cabezal de cierre. Para asegurar el buen contacto entre el cabezal y la muestra, así como para imponer una misma presión de confinamiento inicial en todos los ensayos, se controla la medida de la célula de carga vertical durante el ajuste. Una vez finalizadas estas operaciones, se da comienzo al ensayo abriendo la válvula que permite el acceso de agua en la muestra. A lo largo del proceso de hidratación, se controla el contenido de agua en la muestra utilizando un medidor de bureta graduada y se mide la presión vertical de hinchamiento. El ensayo finaliza cuando no se registran cambios en la presión de hinchamiento durante al menos 24 horas y se ha alcanzado la saturación total de la muestra. Finalizado el ensayo se extrae la muestra, se miden sus dimensiones y el contenido de agua.

3.2.3 Ensayos con succión controlada. Estudio de la compresibilidad

Para poder estudiar la compresibilidad del material y su evolución durante el proceso de humedecimiento, se realizaron ensayos edométricos siguiendo trayectorias de carga a succión constante. Estos ensayos se realizaron tomando como base el procedimiento indicado en la normativa ASTM D 2435-90 y se utilizó la célula edométrica descrita en el apartado 2.3.1.2. Este equipo permite utilizar distintas técnicas experimentales para el control de la succión. En éste caso se utilizaron dos técnicas experimentales distintas dependiendo del valor de la succión aplicado. Para valores de succión entre 300 y 3 MPa se aplicó la técnica de transferencia de vapor mientras que para valores de succión entre 3 MPa y saturación se aplicó la traslación de ejes. Las diferentes configuraciones de ensayo utilizadas se muestran en las Figuras 3.11 y 3.12.

Una vez preparadas las muestras a la densidad seca correspondiente, se coloca en la célula edométrica y se aplica una presión de ajuste (25 kPa). Este estado se considera el estado inicial de ensayo. Los ensayos se desarrollan aplicando una trayectoria de tensiones en dos etapas, Figura 3.13. Una primera etapa, en la que se aplica una trayectoria de mojado a carga constante partiendo de las condiciones de fábrica hasta el valor de la succión prevista en el ensayo. Mientras que en una segunda etapa, se aplica una trayectoria de carga-descarga en condiciones de succión constante.

A lo largo del todo el ensayo se controlaron tanto la deformación vertical como la variación del contenido de agua de la muestra. Cada escalón de carga se mantiene hasta que la velocidad de deformación en la muestra es menor a 0.001 mm/día, que representa

un cambio volumétrico del $1/1000$ y la variación en el contenido de agua es menor a 0.05 ml/día. Una vez finalizada la trayectoria de carga y descarga se extrae la muestra, se miden sus dimensiones y el contenido de agua. Esta información puede ser utilizada en forma complementaria como valor para la curva de retención de la muestra. La condición saturada se estudió como una condición particular de succión nula.

3.2.4 Ensayos con control de la succión

Para obtener información constitutiva sobre el comportamiento de expansión e hinchamiento se realizaron ensayos de mojado a carga constante y ensayos de humedecimiento a volumen constante con control de la succión.

3.2.4.1 Ensayos de humedecimiento a carga constante

Para caracterizar el comportamiento de cambio volumétrico provocado por cambios en la succión, se realizaron ensayos aplicando trayectorias de humedecimiento a carga constante con control de la succión. Para el control de la succión, dependiendo del valor aplicado, se utilizaron tanto la transferencia de vapor como la traslación de ejes. Partiendo de una succión inicial de 300 MPa, se aplicaron sucesivas etapas de humedecimiento por vapor hasta alcanzar un valor de 3 MPa en correspondencia con una solución de sulfato de cobre (CuSO_4), Tabla 2.1. Una vez alcanzado este valor de succión, correspondiente al final del humedecimiento por vapor (3 MPa), se sustituyen las conexiones y se inyecta agua hasta completar la saturación en una única etapa. El dispositivo utilizado para realizar estos ensayos se indica en la Figura 3.11. Cada una de las etapas de humedecimiento se mantuvo hasta que los cambios en la deformación vertical resultan menores de 0.001 mm/día y el cambio en el peso del reservorio que contiene la solución menor de 0.05 g/día. La duración media de cada una de las etapas del ensayo fue de aproximadamente 10 días. Este tiempo resulta en ensayos con una duración media de 60 días. Al final del ensayo se extrae la muestra, se miden sus dimensiones y el contenido de agua.

3.2.4.2 Ensayos de humedecimiento a volumen constante

Para investigar en detalle el desarrollo de la presión de hinchamiento a lo largo del proceso de humedecimiento, se realizaron ensayos siguiendo trayectorias de mojado a volumen constante con control de la succión. Para lograr un control de la succión a lo largo de todo el rango de succiones se utilizaron diferentes técnicas experimentales de forma combinada. Para el control de la succión entre 300 y 3 MPa se utilizó la

transferencia de vapor, mientras que para valores entre 1.5 MPa y saturación se utilizó la traslación de ejes. En estos ensayos se utilizó la célula edométrica descrita en el apartado 2.3.1.2 con una base de tipo III (Figura 2.23).

Una vez preparada la muestra, se realizó el montaje del edómetro de acuerdo con el dispositivo indicado en la Figura 3.14 para la utilización de la técnica de transferencia de vapor. Partiendo de un valor de succión inicial de 300 MPa se aplicaron etapas de mojado hasta un valor mínimo de 3 MPa. Alcanzado este valor, se cambió la configuración del ensayo y se preparó para la utilización de la técnica de traslación de ejes. Se sustituyen las conexiones utilizadas para la circulación con aire de humedad relativa controlada y se conecta al sistema de presión de aire y se abre la válvula de entrada de agua (indicada como C en la Figura 3.14). Utilizando la nueva configuración se aplicó una primera etapa de humedecimiento desde 3.0 a 1.0 MPa, etapa de transición. Partiendo de este valor, se aplicaron distintas etapas de humedecimiento hasta alcanzar la saturación.

Durante todo el ensayo, se mantuvo la condición de volumen constante variando la presión vertical de confinamiento y se controló la variación del contenido de agua de la muestra. Cada etapa de succión se mantuvo hasta que se alcanza el equilibrio. Esto es, la velocidad del desplazamiento vertical es 0.001 mm/día y la velocidad en el cambio del contenido de agua es inferior a 0.05 ml/día. En estas condiciones la duración media de cada una de las etapas del ensayo resultó de 10 días. Una vez finalizado el ensayo se extrae la muestra, se miden sus dimensiones y el contenido de agua.

Para poder aplicar la técnica de traslación de ejes, es necesario que tanto la piedra de alto valor de entrada de aire (A.V.E.A), como las conexiones utilizadas para el control de la presión de agua se encuentren llenos de agua. Esto determina entonces que para poder aplicar con éxito el cambio entre ambas técnicas experimentales durante trayectorias de humedecimiento, la piedra cerámica se encuentre saturada desde un comienzo del ensayo de humedecimiento y permanecer saturada durante la utilización de la técnica de traslación de ejes. Por este motivo la piedra cerámica se satura al principio del ensayo de forma previa a la colocación de la muestra.

En este caso y debido al alto valor de succión inicial existente en la muestra (300MPa), es posible que se produzca la desaturación de la piedra porosa durante las etapas de

mojado por vapor. Para limitar esta posibilidad, se utilizó una única etapa de mojado por vapor desde 300 a 3 MPa reduciendo al máximo el tiempo de utilización de la técnica de transferencia de vapor. Para completar la información correspondiente a la etapa de humedecimiento por vapor en valores intermedios de succión (entre 300 y 3 MPa), se repitió el ensayo utilizando una muestra de idénticas características a la anterior y se aplicaron varias etapas de mojado por vapor con valores intermedios de succión.

3.3 Influencia del tipo de transferencia y del ritmo de inyección de agua.

Las características del sistema de inyección de agua utilizado en el ensayo a escala real (Figura 3.1) determina la existencia de situaciones de hidratación muy diferentes durante la etapa de saturación. La inyección de agua provoca que las zonas del material que rodean los tubos de inyección se saturen de forma rápida por efecto de la inundación. Por otra parte, las zonas más alejadas del punto de inyección se hidratan de forma más lenta y progresiva a partir del intercambio de agua con las zonas ya saturadas. El intercambio de agua entre zonas del relleno con diferente grado de saturación ocurre de varias formas: por un lado existe una transferencia líquida y por otro una transferencia de agua en forma de vapor. Para estudiar la respuesta del material frente a las diferentes situaciones de humedecimiento (distintos ritmos de inyección de agua y distintos tipos de transferencia de agua) se diseñaron ensayos adaptados a cada una ellas. En estos ensayos se estudio el comportamiento de expansión e hinchamiento del material a lo largo del proceso de saturación utilizando diferentes condiciones de hidratación. Se realizaron dos grupos de ensayos diferentes: un grupo donde se estudio la influencia del tipo de transferencia de agua y otro grupo donde se estudio la influencia del ritmo de inyección de agua en la respuesta del material.

3.3.1 Ensayos de humedecimiento por transferencia de vapor y por transferencia líquida

El objetivo de estos ensayos es estudiar de forma comparativa la influencia del tipo de transferencia de agua en el comportamiento constitutivo del material durante el proceso de saturación. Se realizaron ensayos de mojado a carga constante y ensayos de humedecimiento a volumen constante utilizando una transferencia de agua por vapor y

un humedecimiento por transferencia líquida. A continuación se describen las características generales y procedimientos utilizados para cada uno de los casos.

3.3.1.1 Ensayo de humedecimiento a carga constante

Se realizaron ensayos de humedecimiento a carga constante utilizando distintas técnicas experimentales de humedecimiento. En un primer caso, se saturó la muestra por inyección de agua líquida y en un segundo caso se utilizó un humedecimiento por transferencia de vapor. Las trayectorias de tensiones y las características de cada uno de los ensayos se muestran en la Figura 3.15. En el caso del ensayo realizado utilizando inyección de agua, se controló el contenido de agua de la muestra durante el humedecimiento y dedujeron los correspondientes valores de succión a partir de la curva de retención del material. Cada etapa de humedecimiento se mantuvo hasta que se alcanzó el equilibrio, la medida de la variación del contenido de agua en la muestra fue menor a 0.05 ml/día durante al menos 24 horas. El dispositivo de ensayo utilizado se indica en la Figura 3.10. En el caso del ensayo de humedecimiento por vapor, se utilizó la técnica de transferencia de vapor con diferentes soluciones salinas. La succión se disminuyó por etapas desde 300 MPa hasta 3 MPa. Una vez alcanzado este valor se saturó la muestra en una única etapa utilizando inyección de agua. Cada escalón de succión se mantuvo hasta que no se observaron cambios en la deformación volumétrica de la muestra (velocidad de deformación menor de 0.001 mm/día). El dispositivo de ensayo utilizado se indica en la Figura 3.14.

3.3.1.2 Ensayos de humedecimiento a volumen constante

De forma similar a los ensayos descritos anteriormente, se realizaron ensayos de humedecimiento a volumen constante utilizando ambas técnicas experimentales (humedecimiento por inyección de agua y por vapor). Las trayectorias de tensiones y las características de cada uno de los ensayos se muestran en la Figura 3.16. En el caso del ensayo que utiliza humedecimiento por inyección de agua, se controló el contenido de agua de la muestra y se midió la presión vertical de hinchamiento. La succión se dedujo considerando el contenido de agua de la muestra a partir de la curva de retención del material. Los criterios de equilibrado utilizados fueron los mismos que los utilizados en el ensayo anterior. El dispositivo de ensayo utilizado en estos ensayos se indica en la Figura 3.9. En el ensayo de humedecimiento por vapor se controló la humedad relativa del aire circulante por los poros de la muestra mediante distintas soluciones salinas. Se aplicaron diferentes etapas de mojado desde 300 MPa hasta alcanzar un valor mínimo

de 3 MPa (CuSO_4). Posteriormente se inyectó agua líquida hasta alcanzar la saturación en una única etapa. Para realizar estos ensayos, se utilizaron células edométricas especialmente acondicionadas para este tipo de ensayos descritas en el apartado 2.3.1.3. El contenido de agua de la muestra se controló a partir de la medida del peso de la célula de edométrica con una balanza electrónica. Cada uno de las etapas de succión se mantuvo hasta que no se registraron cambios en la medida de la carga vertical, en el peso de la célula edométrica y del reservorio con la solución salina (0.05g/día). El dispositivo utilizado en este tipo de ensayos se muestra en la Figura 3.7.

3.3.2 Ensayos de humedecimiento a volumen constante utilizando distintos ritmos de inyección de agua. Ensayos de presión de hinchamiento.

Para estudiar el efecto del gradiente de inyección de agua en el desarrollo de la presión de expansión se realizaron ensayos de saturación a volumen constante aplicando diferentes gradientes de inyección de agua. Se inyectó agua líquida sobre muestras con idénticas características: 50 mm de diámetro y 20 mm de altura y con un mismo valor de densidad seca igual a 1.3 Mg/m^3 . Las muestras se saturaron a volumen constante inyectando agua a diferentes valores de presión. En un primer caso se aplicó una presión de agua correspondiente a una carga hidráulica de 2 m y en el segundo caso una presión correspondiente a una carga de 20 m. En el ensayo con gradiente hidráulico de 2 m, se utilizó una célula edométrica convencional de acuerdo con el dispositivo de ensayo que se muestra en la Figura 3.17. Para mantener la condición de volumen constante, se bloqueó el desplazamiento vertical del brazo de carga del edómetro utilizando una célula de carga y se midió la carga vertical de expansión. Se controló el contenido de agua de la muestra mediante un tubo medidor de cambio de volumen y se calculó la succión de la muestra a partir de la curva de retención. En el caso del ensayo realizado con un gradiente hidráulico de 20 m se utilizó el dispositivo de ensayo indicado en la Figura 3.18. Debido a la estructura granular y gran permeabilidad que caracteriza a la muestra, durante la parte inicial del ensayo parte del agua inyectada atraviesa la muestra generando un flujo saliente. Por este motivo se utilizaron células edométricas de volumen constante y se midieron: la presión vertical de hinchamiento y los flujos entrante y saliente de la muestra. A partir de estos datos y se calculó el agua almacenada en la muestra. El control de los flujos entrante y saliente de la muestra se realizó mediante el pesado de los reservorios de agua correspondientes utilizando balanzas electrónicas ($\pm 0.01\text{g}$).