

Capítulo 4: Resultados experimentales

En el siguiente capítulo se presentan los resultados experimentales obtenidos durante el programa de ensayos de laboratorio realizados de acuerdo con lo descrito en el Capítulo 3. Se realizaron ensayos sobre muestras preparadas a distintos valores de densidad seca entre 1.3 y 1.9 Mg/m³. Dado que el valor de densidad seca del material en el problema a escala real fue cercano a 1.36 Mg/m³ (NAGRA, 2003), la mayoría de los ensayos de laboratorio se realizaron sobre muestras con valores de densidad seca de entre 1.3 y 1.5 Mg/m³. Los resultados se presentan divididos en tres partes. Primero se describen los resultados obtenidos en los ensayos realizados para caracterizar el comportamiento hidráulico del material: ensayos de permeabilidad saturada, ensayos de infiltración y curvas de retención. En un segundo lugar se presentan los resultados obtenidos en ensayos realizados para estudiar el comportamiento de hinchamiento y expansión y la variación de la compresibilidad con la succión: ensayos de humedecimiento a carga constante, ensayos de humedecimiento a volumen constante y ensayos de compresibilidad. Finalmente se describe la respuesta del material a lo largo de proceso de humedecimiento, considerando diferentes tipos de transferencia de agua (vapor o líquida) y velocidades de inyección.

4.1 Caracterización del comportamiento hidráulico

Para caracterizar el comportamiento hidráulico del material se realizaron dos tipos de ensayos diferentes, ensayos de permeabilidad saturada y ensayos de infiltración. Adicionalmente se estudió la evolución del contenido de agua con la succión (curvas de retención a volumen constante).

4.1.1 Ensayos de permeabilidad saturada

La condición saturada del material se estudió como un caso particular del estado no saturado donde la succión es nula. El estado saturado permite establecer una condición de contorno en el comportamiento del material y resulta determinante para establecer las características que debe tener de la barrera de ingeniería para su buen funcionamiento a largo plazo. Para determinar la permeabilidad saturada del material y su evolución con el índice de vacíos, se realizaron ensayos de permeabilidad con gradiente constante sobre muestras con diferentes valores de densidad seca. Los ensayos se realizaron de acuerdo al procedimiento descrito en el apartado 3.1.1. Se impuso un flujo a través de

una muestra en condiciones saturadas y utilizando un gradiente constante. Se registró la cantidad de agua (ΔV) que atraviesa la muestra por unidad de tiempo (Δt) y se calculó la permeabilidad a partir de la ley de Darcy:

$$k_w = \frac{q}{i} = \frac{\Delta V \cdot \gamma_w \cdot H_{\text{muestra}}}{\Delta t \cdot A \cdot \Delta p_w} \quad (4.1)$$

donde γ_w es la densidad del agua, A y H_{muestra} son el área y altura de la muestra respectivamente y Δp_w la diferencia de presión de agua a ambos lados de la muestra. Se prepararon muestras con valores de densidad seca entre 1.05 y 1.6 Mg/m³ y se realizaron ensayos de acuerdo al procedimiento descrito en el apartado 3.1.1.

Tabla 4.1. Permeabilidad saturada. Muestras de pellets de bentonita compactada.

ρ_d [Mg/m ³]	Permeabilidad [m/s]
1.50	6.0E-13
1.50	3.0E-13
1.60	3.9E-13
1.28	1.6E-12
1.37	6.3E-11
1.46	2.8E-12
1.53	3.1E-13
1.05	1.8E-11
1.04	1.1E-09
1.05	5.2E-11
1.11	2.1E-11
1.19	2.9E-12
1.23	3.9E-12
1.22	2.4E-13
1.34	5.6E-12
1.44	9.1E-13
1.52	8.2E-13
1.56	2.4E-13
1.41	6.5E-13
1.43	5.9E-13
1.46	5.8E-13
1.49	4.2E-13
1.44	2.2E-13
1.46	3.6E-13
1.48	4.2E-13
1.50	4.5E-13
1.53	3.3E-13

Los valores de permeabilidad saturada obtenidos experimentalmente se resumen en la Tabla 4.1 y se muestran en la Figura 4.1. A partir estos, se estableció una expresión matemática que relaciona la permeabilidad saturada con la densidad seca del material de acuerdo con:

$$\ln(k_w) = -9.73 * \rho_d - 13.79 \quad (4.2)$$

donde k_w es la permeabilidad en m/s y ρ_d es la densidad seca de la muestra expresada en Mg/m³. En el mismo gráfico se encuentra representado el ajuste correspondiente a la bentonita FEBEX, (ENRESA, 2000).

4.1.2 Ensayos de infiltración

Una vez determinada la permeabilidad del material en condiciones saturadas se estudio la evolución de la permeabilidad a lo largo del proceso de hidratación. Para ello se realizaron ensayos de infiltración. El principio de estos ensayos es el de inyectar agua en una muestra en condiciones de volumen constante y estudiar la evolución de las diferentes variables en la muestra durante el proceso de saturación. Se realizaron dos tipos de ensayos de infiltración diferentes: ensayos de infiltración en células de volumen constante, sobre muestras cilíndricas de de 75 x 100 mm de diámetro y altura respectivamente, y ensayos de infiltración y almacenamiento, sobre muestras de 50 x 20 mm. Los ensayos se realizaron de acuerdo con los procedimientos descritos en el apartado 3.1.2. A continuación se describen los resultados obtenidos en cada unos estos ensayos y se describe el comportamiento general del material durante el proceso de saturación.

4.1.2.1 Ensayos de infiltración en células de volumen constante

De acuerdo con lo descrito en el apartado 3.1.2.1, el objetivo de estos ensayos es poder determinar como evolucionan el contenido de agua y la densidad seca del material durante el proceso de hidratación. Para minimizar los posibles efectos de escala relativos a la curva granulométrica de la mezcla de pellets, se utilizó un material con un tamaño máximo de pellet de 20 mm y se utilizaron células de infiltración de volumen constante que permiten ensayar muestras de 100 mm de altura y 75 mm de diámetro. Esto permite que una vez finalizada la etapa de inyección, sea posible obtener información sobre la distribución del contenido de agua y densidad seca en distintos puntos de la muestra. Se realizaron dos grupos de ensayos para estudiar el

comportamiento del material frente a dos ritmos de inyección de agua diferentes: ensayos “rápidos” y ensayos “lentos”. En todos los ensayos realizados se ensayaron muestras con una densidad seca de 1.5 Mg/m^3 . En los ensayos “rápidos”, se fijó la presión de inyección de agua en un valor de 500 kPa desde el comienzo del ensayo. Y en el caso de los ensayos “lentos” la presión de inyección se incrementó de forma gradual, partiendo de cero y llegando a un valor de 500 kPa durante el primer minuto del ensayo. La evolución temporal de la presión de inyección durante la etapa inicial de cada tipo de ensayo se muestra en las Figuras 4.2-a y 4.2-b. Las características generales de cada uno de los ensayos de infiltración realizados se resumen en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Características de los ensayos de infiltración realizados utilizando las células de volumen constante.

ENSAYO	ρ_d [Mg/m ³]	Tipo de Inyección	Agua	Granulometría		Grado de saturación	
				Fracc. <0.4mm	D_{max} [mm]	$S_{r\text{Inicial}}$	$S_{r\text{final}}$
M151	1.51	Rápida	Pearson (*)	No	25	0.18	0.58
M152	1.44	Rápida	Pearson (*)	No	25	0.20	0.80
M153	1.47	Lenta	Pearson (*)	No	25	0.19	0.53
M154	1.51	Rápida	Pearson (*)	No	25	0.14	0.67
M155	1.51	Lenta	Pearson (*)	No	25	0.11	0.66

(*) Agua de Pearson es el agua existente en el macizo rocoso que contiene el ensayo a escala real, Mont Terri, Suiza.

Se realizaron un total de 5 ensayos: 3 de inyección rápida y 2 de inyección lenta. La duración de cada uno de los ensayos se determinó en función del grado de saturación total de la muestra (indicado como $S_{r\text{final}}$ en la Tabla 4.2). A partir de estos ensayos es posible reconstruir la evolución del contenido de agua en la muestra durante el proceso de hidratación. En el caso de los ensayos de infiltración “rápida”, indicados como M151, M152, M154, la inyección se interrumpió cuando el grado de saturación de la muestra era de 0.58, 0.67 y 0.80. En el caso de los ensayos con un comienzo de inyección “lenta”, indicados como M153 y M155, la inyección de agua se detuvo cuando las muestras alcanzaron un grado de saturación total de 0.53 y 0.66. La evolución temporal del volumen de agua inyectado para dos de los ensayos realizados (M152 y M155) se muestra en la Figura 4.3 junto con los valores correspondientes a los restantes ensayos. De acuerdo con los resultados obtenidos en los ensayos de inyección

“rápida”, se distinguen dos etapas de inyección bien diferenciadas. Una etapa inicial caracterizada por una gran entrada de agua y una segunda etapa donde se produce una caída en el ritmo de inyección y la entrada de agua en la muestra se hace mucho más lenta. El grado de saturación pasa de 0.18 a 0.58 durante los primeros 40 segundos de inyección y luego de esta fase inicial, se observa una caída importante en el ritmo de inyección. Por otra parte en los ensayos de inyección “lenta”, no se observan cambios en el ritmo de entrada de agua durante todo el ensayo. La inyección se produce de forma lenta desde un comienzo del ensayo. La evolución del volumen de agua inyectado en la muestra para ambos ensayos se muestra en la Figuras 4.3. Una vez finalizado el ensayo, se extrajo la muestra de la célula de infiltración, se cortó en rebanadas transversales, se midió el contenido de agua y la densidad seca de cada una de ellas. A partir de esta información, se determinó la distribución del contenido de agua y densidad seca en correspondencia con dos procesos de inyección de agua diferentes. En las Figuras 4.4 y 4.5 se muestra la evolución de la distribución del contenido de agua, grado de saturación y densidad seca para ambos ensayos (inyección “rápida” y “lenta”). Se observa que la evolución del contenido de agua y la cinemática de hidratación resultan dependientes del tipo de inyección utilizada. En los ensayos de inyección “rápida” y durante la primera parte del ensayo, el agua circula y se almacena en los poros entre pellets provocando un incremento más o menos uniforme en el contenido de agua (T_1 en la Figura 4.4-a). Se observa un incremento en el contenido de agua en el extremo de “salida” del agua provocado por cierto efecto de borde. Luego de la etapa inicial, los pellets se expanden y bloquean el acceso de agua provocando una caída en el ritmo de inyección de hasta cuatro órdenes de magnitud. A partir de ese momento y hasta el final del ensayo, la entrada de agua se hace más lenta y el frente de hidratación avanza de forma más uniforme. El contenido de agua para diferentes tiempos de ensayo luego de la primera etapa, se puede asumir como la “superposición” del estado inicial T_1 , con el avance de un frente de hidratación uniforme, T_2 y T_3 en Figura 4.4-a. Durante los ensayos de inyección “lenta”, el incremento de la presión de inyección se produce en forma progresiva. Esto permite que el proceso de expansión de los pellets y bloqueo de la permeabilidad del material se produzcan en forma simultánea. En estos ensayos la hidratación de la muestra se produce de forma lenta y por el avance de un frente de hidratación uniforme. El agua entra en la muestra través del material ya saturado y con una estructura cerrada que disminuye el ritmo en la entrada de agua en la muestra, T_1 , T_2 , y T_3 en la Figura 4.4-b. En la Figura 4.5 se muestra la distribución de la densidad

seca en la muestra correspondiente al final de cada ensayo. En todos los casos se observa un incremento de la densidad seca en la parte superior de la muestra por un efecto de “compresión” provocado por la expansión de la parte baja. No se observan diferencias significativas en la distribución de la densidad seca de la muestra.

De acuerdo con los resultados obtenidos, podemos decir que la respuesta del material a lo largo del proceso de hidratación está condicionada por la estructura interna del material y por las condiciones de contorno aplicadas durante proceso de inyección de agua. La estructura interna del material está formada dos redes de poros vinculadas jerárquicamente entre si: una red de poros formada por los vacíos entre pellets o macroporos y varios conjuntos de poros independientes entre si, formados por las redes de poros interiores a cada uno de los pellets (microporos). De acuerdo a la propia génesis del material, podemos decir que el conjunto de poros macro “contiene y conecta” a los conjuntos de poros micro. Al inicio del ensayo el agua entra y se almacena en la muestra a través de los poros entre pellets. Un instante posterior, los pellets comienzan a hidratarse a partir del intercambio con el agua de los macroporos, expanden, invaden la porosidad macro y bloquean la permeabilidad. Se tiene un material más uniforme, con un tamaño de poro más pequeño y con valores de conductividad hidráulica mucho menores. La respuesta del material, la duración e ingreso de agua a lo largo de de cada una de estas etapas dependerá tanto de las características estructurales del material como de las condiciones de inyección.

4.1.2.2 Ensayos de infiltración y almacenamiento

Para obtener información sobre la evolución de la permeabilidad del material durante el proceso de saturación por inyección de agua, se realizaron una serie de ensayos de infiltración y almacenamiento. En estos ensayos se establece un flujo de agua a través de la muestra y se estudia la velocidad de hidratación y capacidad de almacenamiento del material. Los ensayos se realizaron de acuerdo con el procedimiento descrito en el apartado 3.1.2.2.

Durante el ensayo, las condiciones de presión de inyección de agua se mantienen constantes y se registran los caudales entrante y saliente en la muestra (q_T y q_M en la Figura 4.6 respectivamente). A partir de estos caudales se calcula el ritmo de agua almacenada y el grado de saturación neto de la muestra. Asumiendo que durante la fase inicial de la inyección, el agua atraviesa la muestra a través de la macroporosidad

interconectada (poros entre pellets), se puede obtener un valor de permeabilidad equivalente para la macroporosidad k_M aplicando la ley de Darcy, de acuerdo con:

$$q_M = -k_M (h_2 - h_1) / H_{\text{muestra}} \quad (4.3)$$

En esta expresión h es la carga hidráulica a la entrada y salida de la muestra, H_{muestra} la altura de la muestra y q_M el caudal (volumen por unidad de tiempo) que atraviesa la muestra. Utilizando (4.3) se calcula la permeabilidad equivalente asociada a la macroporosidad de la muestra y su variación con el grado de saturación global $k_M(S_r)$.

Un esquema del ensayo planteado y sus características se muestran en la Figura 4.6. Se fabricaron muestras con una densidad seca media de 1.28 Mg/m^3 y con una granulometría de pellets de tamaño uniforme e igual a 4 mm. Se realizaron 4 ensayos en idénticas condiciones de inyección (200 kPa) y se variaron los tiempos totales de inyección. La duración de los ensayos (indicada como T_f en la Tabla 4.3) fue de 15, 30 y 45 segundos y hasta completar la saturación. Una vez finalizado cada uno de los ensayos se midió el contenido de agua de la muestra y se calculo el grado de saturación. Las características de cada uno de los ensayos se indican en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3. Características de los ensayos de infiltración y almacenamiento.

ENSAYO	ρ_d [Mg/m ³]	Presión de Inyección	Agua	D_{Uniforme} [mm]	$W_0(\%)$	T_{final}
M131	1.27	200 kPa	Pearson	4	10.1	15 s
M132	1.26	200 kPa	Pearson	4	10.1	30 s
M133	1.28	200 kPa	Pearson	4	10.1	45 s
M134	1.28	200 kPa	Pearson	4	10.1	Sat.

La evolución de los caudales entrante (q_T) y saliente (q_M) de la muestra, registrados durante el ensayo M134 se muestran en la Figura 4.7. Considerando la diferencia entre las áreas encerradas bajo las curvas de volumen de agua entrante y saliente, se obtiene la evolución del volumen de agua almacenado en la muestra. Esto permite calcular la evolución del contenido de agua y del grado de saturación total de la muestra. En la Figura 4.8 se presenta la evolución temporal del grado de saturación en el ensayo M134 y los valores medidos al final de cada uno de los ensayos M131, M132 y M 133. A

partir de la expresión (4.3) se calculó la evolución temporal de la permeabilidad y con el grado de saturación de la evolución (Figuras 4.9 y 4.10). Durante la etapa inicial de estos ensayos el agua atraviesa la muestra circulando a través de los macroporos y se registran valores de permeabilidad característicos de un material granular, (Fair & Hatch, 1933; Krumbein & Monk, 1943 y Kozeny-Carman en Carman, 1937). Luego de esta primera etapa, los pellets comienzan a hidratarse y a desarrollar deformaciones de expansión. Los pellets expanden, invaden la macroporosidad bloqueando el paso del agua. Se observa una caída en los valores de permeabilidad equivalente de casi 4 órdenes de magnitud. Este hecho pone de manifiesto la importancia que tiene la estructura interna del material y su evolución en el comportamiento hidráulico.

4.1.3 Curvas de retención a volumen constante

La capacidad de almacenamiento de las muestras de pellets y su evolución con la succión se estudió a partir de las curvas de retención. Se obtuvieron curvas de retención en trayectorias de humedecimiento y secado a volumen constante para muestras con valores de densidad seca igual a 1.3, 1.5 y 1.9 Mg/m³. Para poder controlar la succión a lo largo de todo el rango de succiones (300 MPa y saturación), se utilizaron diferentes técnicas experimentales dependiendo del rango de succión (Romero, 2001). Para valores de succión entre 300 y 3 MPa, se utilizó la técnica de transferencia de vapor y para valores de succión entre 3 MPa y saturación se utilizó la técnica de traslación de ejes. De forma complementaria se realizaron medidas de la succión en trayectorias de secado utilizando un psicrómetro de transistores de tipo SIM (apartado 2.2.3). En las Figuras 4.11, 4.12 y 4.13 se muestran los resultados experimentales obtenidos en ensayos realizados sobre muestras con valores de densidad seca de 1.3, 1.5 y 1.9 Mg/m³ respectivamente. Estos resultados se ajustaron mediante una expresión de Van Genuchten modificado de acuerdo con la expresión:

$$Sr = \frac{1}{w_{sat}} \left[1 + (\alpha s)^n \right]^m \left(1 - \frac{s}{P_s} \right)^{\lambda_s} \quad (4.4)$$

donde $\alpha, n, m, \lambda_s, P_s$ son parámetros de la ecuación y w_{sat} es el contenido de agua en condiciones de saturación. Los valores de los parámetros obtenidos para cada valor de densidad seca se presentan resumidos en la Tabla 4.4. Los valores de w_{sat} obtenidos experimentalmente fueron sistemáticamente mayores a los deducidos a partir de la

relación $e\gamma_w/\gamma_s$ considerando $\gamma_w=1$. Resultados similares fueron reportados por Villar (2000) y explicados por el aumento en la densidad del agua de hidratación al incorporarse entre las partículas de arcilla. Un análisis detallado de estos valores se presenta en el Anexo II.

Para estudiar la influencia del índice de vacíos (compactación) en la curva de retención, se compararon los resultados experimentales obtenidos a lo largo de trayectorias de humedecimiento en muestras con diferente valor de densidad seca, Figura 4.14. De acuerdo con estos resultados se pueden definir dos zonas de almacenamiento de agua: una zona dominada por la capilaridad del material y una zona caracterizada por el almacenamiento dentro de las unidades expansivas o pellets. En la zona de almacenamiento caracterizada por el efecto capilar, las muestras presentan un almacenamiento diferente y que varía con la densidad seca. Esto se debe a que a lo largo del proceso de compactación, se produce una reducción de los vacíos correspondientes a los poros entre gránulos de arcilla que afecta los meniscos y al almacenamiento de agua a nivel macroestructural. Por otra parte, a contenidos a agua menores de 0.2 y en correspondencia con valores de succión mayores de 20 MPa, las curvas presentan una zona de almacenamiento común. Esta zona está caracterizada por el almacenamiento de agua dentro de los gránulos de bentonita y resulta independiente del índice de vacíos de la mezcla, almacenamiento microestructural en la Figura 4.14

Tabla 4.4. Parámetros de las curvas de retención ajustadas para expresiones de Van Genuchten modificadas.

Parámetro	Valor (1.3 Mg/m ³)		Valor (1.5 Mg/m ³)		Valor (1.9Mg/m ³)
	Humedecimiento	Secado	Humedecimiento	Secado	Humedecimiento
w_{sat}	0.48	0.48	0.382	0.382	0.247
α [MPa ⁻¹]	0.0813	0.15	1.916x10 ⁻⁴	0.237	6.27x10 ⁻⁵
n	0.638	1.43	0.39	0.01	0.452
m	0.418	0.29	4.24	0.247	5.43
P_s [MPa]	338	3000	338	2000	338
λ_s	0.389	0.6	0.395	0.8	0.387

4.2 Comportamiento de hinchamiento, expansión y compresibilidad.

Uno de los requerimientos de un material para que sea utilizado como barrera aislante en la construcción de almacenamientos de residuos radioactivos de larga duración, es tener una buena capacidad de expansión. La capacidad expansiva del material debe garantizar entre otras cosas, el confinamiento del residuo, el sellado de grietas y fisuras provocadas por la excavación y la restitución total o parcial del estado de tensiones *in situ*. Para caracterizar el comportamiento de hinchamiento del material de forma general, se realizaron ensayos de expansión (ensayos de humedecimiento a carga constante) y ensayo de presión de hinchamiento (ensayos de humedecimiento a volumen constante). Se trata de ensayos que nos aportan información sobre el comportamiento de cambio volumétrico del material en procesos de humedecimiento. Para obtener información constitutiva a lo largo de procesos de hinchamiento y expansión se realizaron ensayos con control de la succión. Por otra parte, para estudiar el efecto de la carga en el cambio volumétrico se realizaron ensayos de compresibilidad a succión constante. Se realizaron ensayos a distintos valores de succión sobre muestras con valores de densidad seca de entre 1.3 y 1.9 Mg/m³. En primer lugar se presentan los ensayos de hinchamiento y expansión por inundación. En segundo lugar se presentan los ensayos de compresibilidad a succión constante y finalmente se presentan los ensayos de hinchamiento y expansión con control de la succión.

4.2.1 Ensayos de hinchamiento bajo carga. Ensayos de humedecimiento a carga constante.

Para estudiar la expansión del material sometido a diferentes condiciones de confinamiento, se realizaron ensayos de humedecimiento a carga constante sobre muestras con valores de densidad seca de 1.3, 1.5, 1.7 y 1.9 Mg/m³. Las trayectorias de tensiones seguidas en estos ensayos se pueden describir en dos etapas, etapa de carga en condiciones de fábrica y etapa de humedecimiento (trayectorias 1-2 y 2-3 en Figura 4.15 respectivamente). Durante la etapa de carga a succión constante (tramo 1-2) se obtiene información sobre la compresibilidad del material en condiciones de fábrica ($s_0 \cong 250$ MPa) y durante la etapa de humedecimiento a carga constante (tramo 2-3), se obtiene información sobre el comportamiento de hinchamiento.

Los resultados experimentales obtenidos en muestras con una densidad seca de 1.3 Mg/m³ se muestran en la Figura 4.16. En la Figura 4.16-a se presenta la compresibilidad

del material en condiciones de fábrica (tramo 1-2) y en la Figura 4.16-b, la evolución temporal del hinchamiento vertical ($\Delta H/H_0$) a carga constante (tramo 2-3). Se observa que el hinchamiento final del material depende del nivel de carga aplicado en la muestra, (Ladd, 1960; Romero, 1999; Brackley, 1975). En estos ensayos se observa un comportamiento de colapso al inicio de la trayectoria de humedecimiento, Figura 4.16-b. Este fenómeno aparece de forma inmediatamente posterior a la inundación y su magnitud depende del nivel de carga vertical, de la densidad seca y granulometría inicial de la muestra. La variación del colapso con el nivel de carga se observa en los ensayos realizados sobre muestras con densidad seca de 1.3 Mg/m^3 . El colapso es nulo para un valor de carga vertical de 10 kPa, se hace máximo para un valor de tensión vertical de 300 kPa (Figura 4.17) y luego disminuye con el aumento de la carga. Al analizar los resultados obtenidos en ensayos sobre muestras con densidad seca de 1.7 Mg/m^3 (Figura 4.18), se observa una disminución del colapso. Esto se debe a que muestras con mayor densidad seca tienen una estructura intergranular más cerrada y menos susceptible de colapsar. Finalmente, y para estudiar el efecto de la granulometría del material en el colapso se realizaron ensayos sobre muestras preparadas con tres granulometrías iniciales diferentes. Se prepararon tres muestras con un mismo valor de densidad seca de 1.3 Mg/m^3 y utilizando tres mezclas de pelles con distinta granulometría. En un primer caso se utilizó una muestra preparada a partir de polvo de bentonita, partículas de tamaño menor de 0.4 mm. En un segundo caso se estudió una mezcla de pellets con tamaños entre 0.4 mm y 2 mm. Finalmente se utilizó una mezcla de pellets con una curva tipo Fuller con tamaños de pellets entre 0.4mm y 4 mm. Los resultados obtenidos durante la etapa de humedecimiento a carga constante (tramo 2-3 de la trayectoria de tensiones) se muestran en las Figuras 4.19-a y 4.19-b. Comparando los resultados obtenidos se observa que la magnitud del colapso varía con el nivel de carga aplicado y con la granulometría inicial. Las muestras fabricadas a partir de polvo de bentonita presentan un colapso de menor magnitud.

Los resultados de deformación vertical relativa ($\Delta H/H_0$) luego de aplicada la trayectoria de carga y humedecimiento (1-2-3) se presentan agrupados por densidad seca en la Figura 4.20. De acuerdo con estos resultados, la deformación vertical relativa del material ($\Delta H/H_0$) se puede expresar en función de la densidad seca (ρ_d) y de la tensión vertical neta ($\sigma_v - u_a$) a partir de la expresión:

$$\frac{\Delta H}{H_0} = -0.094 \ln(\sigma_v - u_a) + 0.732 \rho_d - 0.416 \quad (4.5)$$

donde $[\sigma] = \text{kPa}$ y $[\rho_d] = \text{Mg/m}^3$. La expresión (4.5) representa la deformación relativa de la muestra luego de aplicadas las trayectorias de carga (1-2) y humedecimiento (2-3). Considerando el caso $\Delta H/H_0 = 0$ se tiene:

$$\sigma_v^*(\rho_d) = 0.0611 e^{6.744 \rho_d} \quad (4.6)$$

donde $\sigma_v^*(\rho_d)$ representa el valor de carga vertical para el cual la deformación volumétrica es nula luego de la trayectoria de carga y humedecimiento. Este valor se puede considerar como un valor indicativo de la presión de hinchamiento vertical del material.

De los resultados anteriores se puede deducir que el comportamiento de hinchamiento está condicionado por el nivel de carga actuante en la muestra. En muestras con una estructura abierta se observa la existencia de colapsos (deformaciones de compresión) en procesos de humedecimiento e inundación. La magnitud y características del mismo están estrechamente ligadas al nivel de carga actuante en la muestra y con las características de la muestra, densidad seca y granulometría. La aparición de deformaciones de colapso está ligada al debilitamiento de los contactos intergranulares producido por la inundación. El colapso disminuye en muestras más densas y que presentan una estructura más resistente. También se observa una disminución del colapso en muestras formadas por partículas más finas debido al aumento en el número de contactos intergranulares y que tienen una menor permeabilidad (se hace más difícil la inundación)

4.2.2 Ensayos de presión de hinchamiento. Humedecimiento a volumen constante.

Para estudiar la condición de volumen constante se realizaron ensayos de presión de hinchamiento (ensayos de humedecimiento a volumen constante). Se prepararon muestras con densidades secas entre 1.2 y 1.7 Mg/m^3 y se aplicaron trayectorias de humedecimiento a volumen constante. Durante estos ensayos se midieron la presión de hinchamiento vertical y la variación del contenido de agua en la muestra. El valor de la succión se calculó en función del contenido de agua a partir de la curva de retención. En

la Figura 4.21 se presenta de forma simplificada, la trayectoria de tensiones seguida a lo largo de estos ensayos en términos tensión vertical neta y succión ($\sigma'_{v,s}$). La presión de hinchamiento se define como el valor de la presión de hinchamiento vertical al final del ensayo, punto 3 en la Figura 4.21. En esta figura también se indica la superficie de fluencia de carga y colapso (indicada como LC_0) propuesta por Alonso *et al.* (1990). Esta superficie define el límite elástico de un suelo a lo largo de una trayectoria de carga y humedecimiento y determina la aparición de deformaciones no recuperables. Está asociada al valor de la carga de preconsolidación y su variación con la succión y resulta de gran utilidad conceptual en la interpretación de resultados.

Para realizar estos ensayos se utilizaron dos equipos y dispositivos de ensayo distintos. Células edométricas de volumen constante descritas en el apartado 2.3.1.3 y células edométricas con control de la tensión vertical y horizontal descrita en el apartado 2.3.1.4. Las primeras se utilizaron para realizar ensayos de presión hinchamiento a volumen constante con inyección de agua a presión. Esto permite reducir los tiempos necesarios para alcanzar la saturación y realizar una mayor cantidad de ensayos. Se utilizó el dispositivo de ensayo descrito en el apartado 3.2.2. Las segundas se utilizan para conocer la evolución del estado total de tensiones en la muestra durante el proceso de hidratación (célula edométrica con control de la tensión vertical (σ_v) y horizontal (σ_h)). Se utilizó un dispositivo de ensayo similar al indicado en la Figura 3.17 y se controló la entrada de agua utilizando un sistema automático (apartado 2.3.3.2). Las características de las muestras ensayadas se resumen en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5. Características de los ensayos de presión de hinchamiento.

ENSAYO	ρ_d [Mg/m ³]	Contenido de agua W ₀ (%)	(*)Succión [MPa]
VC13-1	1.24	10.1	170
VC13-2	1.30	7.6	260
VC15-1	1.49	11.1	110
VC15-2	1.51	7.3	245
(*) Valores calculados a partir de la curva de retención			

La evolución de la tensión vertical, tensión horizontal y el grado de saturación durante el proceso de hidratación observado en los ensayos VC13 y VC15 se muestran en las Figuras 4.22 a 4.30. También se incluyen las trayectorias de tensiones (p', s) y (p', q) . De acuerdo con los resultados experimentales obtenidos en los ensayos VC13-1 y VC13-2, se observa una disminución de la tensión lateral por efecto de la inundación inicial de la muestra. Este fenómeno está asociado al debilitamiento de los contactos entre gránulos por efecto del humedecimiento y provoca un cierto colapso de la estructura granular (Figuras 4.22 y 4.23). Luego de esta etapa inicial, se observa un aumento en el valor de la presión de expansión hasta alcanzar un valor máximo en correspondencia con un valor de succión de entre 10 y 2 MPa. A partir de este punto, la presión de hinchamiento disminuye hasta completar la saturación. A los efectos de interpretar el comportamiento observado se representaron las trayectorias de tensiones en términos de tensión vertical y succión (Figura 4.23). También se han representado las superficies de fluencia LC correspondientes a mezclas de pellets con densidad seca de 1.3 Mg/m^3 y obtenidas a partir de ensayos de compresión a succión constante (ver apartado 4.2.3). De acuerdo con la trayectoria de tensiones, la presión de expansión crece debido a la expansión de los pellets hasta alcanzar un máximo. Dicho máximo se corresponde con el punto en cual se “activa” la superficie de fluencia. A partir de este punto la estructura granular no es capaz de soportar la carga y se producen colapsos. Se observa una disminución de la presión de hinchamiento. La estructura granular formada por los pellets es muy abierta y la expansión de los pellets es compensada por un efecto de “invasión” de los poros. En la Figura 4.24 se presenta la evolución de la tensión media neta con la succión y en la Figura 4.25 se representan las trayectorias de tensiones (p', q) . Comportamientos similares fueron reportados por Romero (1999) en ensayos de humedecimiento a volumen constante realizados sobre un material moderadamente expansivo (Boom Clay).

En el caso de los ensayos realizados sobre muestras con densidad seca de 1.5 Mg/m^3 (ensayos VC15-1 y VC15-2), las curvas de presión de hinchamiento se caracterizan por la existencia de dos ramas de crecimiento con velocidades diferentes (Figuras 4.26 y 4.27). Similares resultados fueron reportados en ensayos de hinchamiento a volumen constante realizados sobre muestras fabricadas utilizando una mezcla de pellets de tamaño uniforme y polvo de bentonita (RESEAL, 2000). La existencia de varios niveles estructurales con características hidráulicas y constitutivas diferentes resulta

determinante en la evolución de la presión de hinchamiento. Durante la primera etapa del humedecimiento la presión de hinchamiento aumenta debido tanto a las propiedades elásticas de los contactos entre pellets como a la hidratación de los propios pellets. Al continuar el proceso de humedecimiento, los contactos se debilitan y colapsan provocando un efecto de meseta en la curva de presión de hinchamiento. En la Figura 4.27 se han representado las superficies de fluencia de carga y colapso correspondientes a muestras con una densidad seca de 1.5 Mg/m^3 (indicadas como LC_0). Se observa que el primer máximo coincide con el punto en el que se “activa” la superficie de fluencia, provocando el colapso de la estructura granular. A continuación los pellets continúan hinchando y se observa una segunda rama de crecimiento en la presión de hinchamiento. A diferencia de los ensayos VC13, la estructura granular es más cerrada y la “invasión” de los poros macro no es capaz de compensar toda la expansión de los pellets. Esto determina que la presión de hinchamiento continúe creciendo aún luego del primer máximo. Finalmente en las Figuras 4.28 y 4.29 se representa la evolución de la tensión media neta con respecto de la succión y la trayectoria de tensiones (p', q) para ambos ensayos.

Los valores de presión de hinchamiento vertical obtenidos (punto 3 en la Figura 4.21), se presentan Figura 4.30 y se resumen en la Tabla 4.6. En la Figura 4.30 se incluye la presión de hinchamiento prevista para el caso de la bentonite FEBEX (línea continua) dada por:

$$\sigma_v^* = e^{(5.9\rho_d - 7.9)} \quad (4.7)$$

En esta expresión, σ_v^* es la presión de hinchamiento vertical expresada en MPa y ρ_d es la densidad seca del material en $[\text{Mg/m}^3]$. También se ha representado el valor de presión de hinchamiento prevista a partir de los ensayos de humedecimiento a carga constante (trayectoria indicada como (1-2-3) en la Figura 4.30), de acuerdo con la expresión (4.6). Se observa que los valores de presión de hinchamiento obtenidos en ensayos de humedecimiento a volumen constante son mayores que los correspondientes a ensayos de humedecimiento a carga constante. Esto evidencia la dependencia del valor de la presión de hinchamiento con la trayectoria de tensiones y la existencia de un acoplamiento entre las trayectorias de humedecimiento y el valor de la presión de hinchamiento. En términos constitutivos este fenómeno se puede asumir como un

acoplamiento entre la superficie de fluencia (superficie de carga y colapso (LC)) y las trayectorias de humedecimiento. Estas observaciones están de acuerdo con los resultados experimentales reportados por Romero (1999), en ensayos con de humedecimiento a carga constante y humedecimiento a volumen constante realizados sobre arcilla de Boom.

Tabla 4.6. Resultados obtenidos en los ensayos de presión de hinchamiento.

ρ_d [Mg/m ³]	σ_V [MPa]
1.43	1.29
1.43	1.29
1.50	2.64
1.51	2.5
1.39	1.35
1.30	0.78
1.50	2.87
1.50	2.96
1.24	0.27
1.30	0.62
1.42	2.55
1.49	3.17
1.28	0.58
1.40	0.87
1.72	9.65

4.2.3 Compresibilidad del material. Ensayos con control de la succión.

Para estudiar la compresibilidad del material y su evolución con la succión se realizaron ensayos aplicando trayectorias de carga-descarga a succión constante y a distintos valores de succión (300, 60 y 2 MPa y saturación). Se ensayaron muestras con valores de densidad seca entre 1.3 y 1.9 Mg/m³, sin embargo, y de acuerdo con el valor de densidad seca reportado para el ensayo *in situ* (1.36 Mg/m³), la mayor parte de los ensayos se realizaron sobre muestras con valores de densidad seca entre 1.3 y 1.5 Mg/m³. A partir de estos ensayos se obtuvo información sobre las características del material en condiciones de fábrica, en condiciones saturadas y semi saturadas. Para

realizar los ensayos se utilizaron dos equipos diferentes. Para estudiar la condición saturada se utilizó una célula edométrica convencional de acuerdo con lo descrito en el apartado 2.3.1.1, mientras que para el resto de los ensayos, se utilizó la célula edométrica con control de la succión descrita en el apartado 2.3.1.2.

Los resultados obtenidos en cada ensayo se presentan agrupados por valor de densidad seca y utilizando el siguiente esquema de presentación para cada ensayo. Primero se presenta la trayectoria de tensiones en términos de tensión vertical neta y succión $(\ln(\sigma_v - u_a), s)$. En segundo lugar se presentan la curva de compresibilidad, la evolución del trabajo incremental entregado a la muestra durante la etapa de carga y la evolución de la rigidez en función de la tensión vertical neta (Figuras 4.31 a 4.40).

A partir de las curvas de compresibilidad edométrica obtenidas en los distintos ensayos (volumen específico de la muestra: $v = (1 + e)$, en función de la carga vertical neta aplicada; $(v - \ln(\sigma'_v))$), se observa que el material presenta dos zonas de comportamiento diferente. Una zona elástica o zona de pre-fluencia y una zona de comportamiento plástico o de pos-fluencia. Cada una de estas zonas está caracterizada por un coeficiente de rigidez. Rigidez elástica $\kappa_{oed}(s)$ y rigidez elastoplástica $\lambda_{oed}(s)$ respectivamente. Dichos coeficientes se definen tal que:

$$\delta v_{descarga} = \kappa_{oed}(s) \frac{\delta \sigma'_v}{\sigma'_v} \quad (4.8)$$

y

$$\delta v_{carga} = \lambda_{oed}(s) \frac{\delta \sigma'_v}{\sigma'_v} \quad (4.9)$$

El límite entre ambas zonas se denomina carga de preconsolidación $\sigma_v^*(s)$ y representa el nivel de carga a partir del cual se producen cambios volumétricos irreversibles en el material (límite elástico). El valor de la carga de preconsolidación depende de numerosos factores como: la historia de tensiones a la que ha estado sometido el material, procesos de génesis del material, procesos de congelación y descongelación, procesos de desecación y cementación. En el caso de las mezclas de pellets de bentonita

la carga de preconsolidación está determinada por dos procesos: el proceso de fabricación de las unidades granulares o pellets y el proceso de fabricación de las muestras. El primero de los procesos actúa sobre las características de las unidades granulares, mientras que el segundo determina las características de los contactos entre pellets. El segundo de los procesos, está ligado a los mecanismos de reducción de volumen que actúan en el material durante el proceso de compactación de las muestras. De acuerdo con las observaciones realizadas para estudiar el efecto de la compactación en la estructura interna del material (apartado 1.4) se dedujo que un aumento en el nivel de carga produce una compresión asociada a la reducción del volumen de vacíos intergranulares (vacíos entre pellets), ver Figura 1.26. La compresibilidad del material está determinada por el espacio disponible para el reacomodo de los gránulos (pellets) y por la resistencia y rigidez de los contactos intergranulares. Durante la primera parte del ensayo de compresión, y mientras la carga se mantiene por debajo de cierto valor límite, los contactos intergranulares son capaces de resistir la carga aplicada y se comportan de forma elástica. Al aumentar el nivel de carga aplicada y acercarnos al límite de la resistencia de los contactos, comienzan a aparecer deformaciones no recuperables. Finalmente, si continuamos aumentando el nivel de carga y se supera la capacidad resistente de los contactos intergranulares, se produce un gran aumento de las deformaciones y se produce el colapso de la estructura del suelo. Este proceso da como resultado una nueva estructura que resulta estable frente a este nuevo nivel de carga. La carga de preconsolidación, es una medida del valor límite al cual pueden ser sometidos los contactos intergranulares sin que se produzca el colapso de la estructura y aparezcan deformaciones no recuperables. Dicho valor está determinado por el mayor valor de carga al cual ha estado sometida la muestra durante el proceso de compactación.

A partir de las curvas de compresibilidad obtenidas a distintos valores de succión es posible determinar la carga de preconsolidación y su evolución con la succión. A continuación se analizan los resultados obtenidos en los ensayos de compresibilidad. Se identifican las zonas de comportamiento elástico, la zona de comportamiento plástico y se determinan sus coeficientes de rigidez expresados en las ecuaciones (4.8) y (4.9). El valor del coeficiente de compresibilidad elástico ($\kappa_{oed}(s)$) se determinó a partir de la pendiente de la curva de compresibilidad en las ramas de recarga ($\sigma'_v < \sigma_v^*(s)$) y de descarga. Mientras que el coeficiente de compresibilidad plástico ($\lambda_{oed}(s)$), se

determinó a partir de la pendiente de la curva en la rama de carga ($\sigma'_v > \sigma_v^*(s)$). El valor de la carga de preconsolidación se determinó siguiendo dos análisis diferentes. Una determinación a partir de métodos clásicos basados en el análisis gráfico de la curva $v - \ln(\sigma'_v)$, (Casagrande, 1936; Schmermann, 1953), y una determinación basada en un análisis termodinámico utilizando el trabajo acumulado en la muestra (Senol, 1996).

4.2.3.1 Compresibilidad elástica $\kappa(s)$ y elastoplástica $\lambda(s)$

Las curvas de compresibilidad obtenidas en los distintos ensayos se presentan en las Figuras 4.32-a, 4.34-a, 4.36-a y 4.38-a. A lo largo de estos ensayos se observa un aumento en la compresibilidad del material con la carga vertical neta σ'_v , hasta un valor aproximadamente constante en la zona de post fluencia. En la Figura 4.41, se resume la evolución del coeficiente de compresibilidad $\delta v / \delta \ln(\sigma'_v - u_a)$ obtenido en los ensayos realizados sobre muestras saturadas. Los valores de los coeficientes de compresibilidad elástica κ_{oed} y elastoplástica λ_{oed} , se determinaron a partir de la pendiente de la curva de compresibilidad en la rama de recarga y descarga y en la rama de carga, respectivamente. Los valores de estos coeficientes obtenidos en condiciones saturadas ($\kappa_{oed}(0)$ y $\lambda_{oed}(0)$), para muestras con distinto valor de densidad seca se indican en la Tabla 4.7.

El efecto de la succión en la compresibilidad del material se estudió analizando los resultados obtenidos en ensayos de carga a distintos valores de succión. En las Figuras 4.32 y 4.34 se muestran los resultados correspondientes a muestras con densidades secas de 1.3 y 1.5 Mg/m³, respectivamente. A partir de estos ensayos se determinó la evolución de la compresibilidad con la succión en las zonas elástica y elastoplástica. Los valores de los coeficientes de rigidez ($\kappa_{oed}(s)$ y $\lambda_{oed}(s)$) para distintos valores de succión, se presentan resumidos en las Figuras 4.42, 4.43, 4.44 y 4.45 para muestras con densidad seca de 1.3 y 1.5 Mg/m³. En ellas se observa un aumento de la compresibilidad con el nivel de carga aplicado y con el decremento de la succión. Estos valores se presentan resumidos en la Tabla 4.8 para distintos valores de densidad seca. Los resultados obtenidos están de acuerdo con el comportamiento reportado por Romero para la arcilla de Boom (Boom clay. Romero, 1999) y con los resultados

reportados por Villar (2000) en ensayos de compresibilidad realizados sobre muestras de bentonita FEBEX.

4.2.3.2 Límite de fluencia (carga de preconsolidación)

A partir de las curvas de compresibilidad se determinó el valor de la carga de preconsolidación (límite de comportamiento elástico) y su evolución con la succión. Debido a que la transición entre los estados de pre y post fluencia es un proceso gradual, es recomendable la utilización de un procedimiento sistemático para la identificación y determinación del valor de la carga de preconsolidación. A efectos comparativos se han utilizado dos procedimientos diferentes. En un primer análisis se estudió la curva de compresibilidad edométrica $(v - \ln \sigma'_v)$ y se determinó el valor de carga de preconsolidación $\sigma_v^*(s)$, utilizando un método gráfico basado en los propuestos por Casagrande (1936) y Schmertmann (1953). El valor de la presión de preconsolidación se determinó a partir de la intersección de las extrapolaciones lineales de las zonas de carga y recarga. Los valores obtenidos para cada uno de los ensayos se indican en las respectivas curvas de compresibilidad y se resumen en la Tabla 4.9 indicados como $\ln(\sigma)-v$. De forma alternativa a los métodos de determinación gráfica, se realizó una determinación utilizando los conceptos termodinámicos que analizan el trabajo entregado a la muestra δW . Estos métodos fueron propuestos por Senol (1996) y utilizados por Romero (1999) para la evaluación de la carga de preconsolidación en diversos materiales. Se considera el incremento del trabajo entregado a la muestra expresado de forma simplificada, (Romero 1999):

$$\delta W = (\sigma_m - u_a) \delta \varepsilon_v - (u_a - u_w) \frac{\delta V_a}{V} \quad (4.10)$$

y que en el caso de succión constante se pueden expresar como

$$\delta W_{S=cte} = -\sigma'_m \frac{\delta V}{V} = \sigma'_m \delta \varepsilon_v \quad (4.11)$$

donde σ'_m es la tensión media efectiva y $-\frac{\delta V}{V}$ representa el incremento de deformación volumétrica ($\delta \varepsilon_v$). En este caso la variable de cambio volumétrico se normaliza respecto del volumen específico inicial de la muestra $(1 + e_0)$ siguiendo un

tratamiento de tipo Lagrangiano propuesto por Kaczmarek & Hueckel (1998). Debido a que los ensayos de compresibilidad se realizaron sin control de la tensión lateral el análisis se realiza en función de la tensión vertical efectiva (σ'_v). Se considera el trabajo acumulado $\sum \delta W = \sum (\bar{\sigma}_v - u_a) \delta \varepsilon_v$ en función de la tensión vertical media aplicada en el intervalo $\bar{\sigma}_v$. Aplicando este método, se determina el valor de la carga de preconsolidación a partir del punto de intersección de las extrapolaciones lineales del trabajo acumulado en los intervalos de pre y post fluencia (valor indicado como $\delta \Sigma(W)_1$ en la Tabla 4.9). Como alternativa a este procedimiento gráfico se propone también considerar como valor de carga de preconsolidación, el valor de la intersección entre la extrapolación de la zona de pos fluencia y el eje de las abscisas, (indicados como $\delta \Sigma(W)_2$). La evolución del trabajo acumulado y los valores de carga de preconsolidación obtenidos se muestran en las figuras indicadas como b de cada uno de los ensayos (Figuras 4.32, 4.34, 4.36 y 4.38). Los valores obtenidos se presentan resumidos en la Tabla 4.9 conjuntamente con otros valores que han sido deducidos a partir de otros ensayos.

En la Figura 4.46 se representan los valores de la carga de preconsolidación en el plano $(\sigma'_{v,s})$ para muestras con densidades secas de 1.3 y 1.5 Mg/m³. Estos valores representan la evolución del límite elástico del material con la succión. Se observa un aumento en el valor de la carga de preconsolidación con la succión en concordancia con el comportamiento propuesto por Alonso *et al.* (1990). También se observa una dependencia de dicho valor con la trayectoria de tensiones aplicada. Esto se hace evidente al comparar los resultados obtenidos en ensayos de compresibilidad realizados sobre muestras saturadas con una densidad seca C15-sat-1 y C15-sat-2 (Figura 4.36). En el primero de los ensayos se realizó una etapa de descarga posterior a la etapa de humedecimiento y previo a la etapa de carga (Figura 4.35). Como resultado de esta descarga, se observa un efecto de “borrado” o disminución de la carga de preconsolidación. En el ensayo C15-sat-1, se observa una disminución en el valor de la carga de preconsolidación (250 kPa) y una mayor compresibilidad del material. La trayectoria de descarga resulta en una mayor incorporación de agua y en el hinchamiento de las unidades expansivas (pellets), (Ladd, 1960). Este proceso provoca un cambio en las características estructurales del material y una modificación del valor de la carga de preconsolidación. Se tiene un material con una estructura más abierta,

más compresible y con un valor de $\sigma_v^*(0)$ menor. Un efecto similar se observó en la determinación de la presión de hinchamiento a partir de ensayos con trayectorias de humedecimiento a volumen constante y trayectorias de humedecimiento a carga constante (Figura 4.30). Este fenómeno explica la gran dispersión observada en el valor de la carga de preconsolidación (Figura 4.46). Por este motivo, se analizaron los datos agrupándolos de acuerdo al tipo de ensayo y trayectoria aplicada.

Tabla 4.7. Valores de compresibilidad $\kappa_{oed}(0)$ y $\lambda_{oed}(0)$ obtenidos en condiciones saturadas para muestras preparadas con distintos valores de densidad seca inicial.

ρ_d [Mg/m ³]	$\kappa_{oed}(0)$	$\lambda_{oed}(0)$
1.30	0.074	0.195
1.50	0.070-0.064	0.150-0.165
1.70	0.024-0.027	0.140

Tabla 4.8. Valores de compresibilidad $\kappa_{oed}(0)$ y $\lambda_{oed}(0)$ obtenidos en muestras con densidad seca inicial de 1.3 y 1.5 Mg/m³.

ρ_d [Mg/m ³]	Compresibilidad elástica $\kappa_{oed}(s) = \delta v / \delta(\ln \sigma_v')$			
	$\kappa_{oed}(300)$	$\kappa_{oed}(60)$	$\kappa_{oed}(2)$	$\kappa_{oed}(0)$
1.30	0.01	0.05-0.06	-----	0.074
1.50	0.006	0.025-0.035	0.04-0.06	0.070-0.064
	Compresibilidad plástica $\lambda_{oed}(s) = \delta v / \delta(\ln \sigma_v')$			
	$\lambda_{oed}(300)$	$\lambda_{oed}(60)$	$\lambda_{oed}(2)$	$\lambda_{oed}(0)$
1.30	-----	0.165	-----	0.195
1.50	-----	0.130	0.150 (?)	0.150-0.165
(?) - Valor obtenido luego de una trayectoria de humedecimiento a volumen constante				

Tablas 4.9 y 4.10. Valores de carga de preconsolidación en función de la succión para muestras con densidades secas de 1.3 y 1.5 Mg/m³.

Ensayo	σ'_v [kPa]	Método utilizado		
		Casagrande Ln(σ)-v	Senol $\delta\Sigma(W)_1$	(Corte Ox) $\delta\Sigma(W)_2$
C13-60	$\sigma'_v(60)$	1261	1539	1341
C13-sat	$\sigma'_v(0)$	85	524	573
Otros puntos de la superficie de fluencia				
Fábrica	$\sigma'_v(300)$	2000-3000		
Humedecimiento Vcte	$\sigma'_v(0)$	500-700		
Humedecimiento Ccte	$\sigma'_v(0)$	335		

Tabla 4.10

Ensayo	σ'_v [kPa]	Método utilizado		
		Casagrande Ln(σ)-e	Senol $\delta\Sigma(W)_1$	(Corte Ox) $\delta\Sigma(W)_2$
C15-60	$\sigma'_v(60)$	1609	1408	1341
C15-2	$\sigma'_v(2)$	2640	2541	2374
C15-sat-1	$\sigma'_v(0)$	230	1357	1175
C15-sat-2	$\sigma'_v(0)$	1348	1663	1377
Otros puntos de la superficie de fluencia				
Fábrica	$\sigma'_v(300)$	4000-5000		
Humedecimiento Vcte	$\sigma'_v(0)$	2300-3000		
Humedecimiento Ccte	$\sigma'_v(0)$	1950		

4.2.3.3 Interpretación de resultados

El comportamiento observado se puede interpretar tomando las bases conceptuales propuesta por Alonso *et al.* (1990) en el modelo constitutivo para suelos no saturados, Modelo Básico de Barcelona (BBM). Las ideas y conceptos planteados en este modelo se basan en la teoría de elastoplasticidad y resultan apropiadas para explicar el comportamiento de cambio volumétrico observado en materiales granulares y materiales finos con baja y moderada capacidad expansiva (Gens & Alonso, 1992).

De acuerdo con lo observado durante el proceso de compactación (apartado 1.4.2), un aumento en el nivel de carga resulta en una reducción de los vacíos entre pellets, (Figura 1.26). Estos mecanismos de cambio de volumen están de acuerdo con los observados en

materiales granulares y finos con baja actividad y que son la base conceptual utilizada en el planteo del modelo BBM. A efectos de interpretar la respuesta del material frente a procesos de carga a succión constante y plantear un marco conceptual adecuado para explicar el comportamiento observado, se contrastaron los resultados obtenidos en los ensayos de compresibilidad, con las ideas conceptuales y formulación matemáticas descritas en el modelo BBM. En dicho modelo, se plantea la existencia de una superficie de fluencia que define dos zonas de comportamiento distinto. Una zona de comportamiento elástico y una zona de comportamiento elastoplástico. El límite entre ambos comportamientos está definido por una superficie de fluencia o límite elástico llamada superficie de carga y colapso (indicada como LC). Dicha superficie determina la aparición de deformaciones no recuperables en trayectorias de carga y humedecimiento. Para cada una de estas zonas se definen los parámetros de rigidez correspondientes (rigidez elástica y elastoplástica) y se formulan las leyes de endurecimiento correspondientes. Los parámetros que definen la compresibilidad del material a lo largo del dominio elástico $\kappa_i(s)$ y en la zona de comportamiento plástico o fluencia $\lambda(s)$ se definen a partir de las expresiones:

$$\kappa_i(s) = \kappa_{i0} * (1 + \alpha_i * s) \quad (4.12)$$

para el dominio elástico y

$$\lambda(s) = \lambda(0)[(1 - r)\exp(-\beta s) + r] \quad (4.13)$$

para la zona de comportamiento plástico. κ_{i0} y $\lambda(0)$ son los valores de los coeficientes de compresibilidad en condiciones saturadas mientras que α_i , r y β permiten describir la evolución de dichos coeficientes con la succión. Las expresiones (4.12) y (4.13) ajustadas de acuerdo con los resultados experimentales obtenidos en los ensayos de compresibilidad se indican en las Figuras 4.42 a 4.45. Los valores de los coeficientes se resumen en la Tabla 4.11.

Como superficie de fluencia Alonso et al. (1990) proponen:

$$\sigma_v^*(s) = \sigma_c \left(\frac{\sigma_{v0}^*}{\sigma_c} \right)^{\frac{\lambda(0) - \kappa_{i0}}{\lambda(s) - \kappa_i(s)}} \quad (4.14)$$

donde σ_{v0}^* representa el valor de la presión de preconsolidación en condiciones saturadas y σ_c es un valor de referencia. Considerando (4.14) se ajustaron los parámetros para definir dos superficies de fluencia según el tipo de ensayo y su trayectoria. Una superficie LC_0 , correspondiente a los ensayos en los que la trayectoria de equilibrado de la succión se realiza en condiciones de volumen constante, y una segunda superficie LC_1 , definida a partir de los valores obtenidos en ensayos donde la etapa de equilibrado de la succión, se realizó en condiciones de carga constante. Los valores de los parámetros utilizados se indican en la Tabla 4.12. Ambas curvas se representan en la Figure 4.46.

Tablas 4.11. Valores de los parámetros correspondientes a las leyes constitutivas que representan la variación de la compresibilidad con la succión.

Compresibilidad elástica $\kappa_i(s) = \kappa_{i0} * (1 + \alpha_i * s)$			
ρ_d [Mg/m ³]	κ_{i0}	α_i [MPa ⁻¹]	
1.30	0.074	-0.00294	
1.50	0.064	-0.0031	
Compresibilidad plástica $\lambda(s) = \lambda(0)[(1-r)\exp(-\beta s) + r]$			
ρ_d [Mg/m ³]	$\lambda(0)$	r	β [MPa ⁻¹]
1.30	0.200	0.7	0.008
1.50	0.165	0.855	0.150

Tablas 4.12. Valores de los parámetros correspondientes a la superficie de fluencia. Superficie de carga y colapso LC.

Superficie de fluencia $\sigma_{v0}^*(s) = \sigma_c \left(\frac{\sigma_{v0}^*}{\sigma_c} \right)^{\frac{\lambda(0)-\kappa_{i0}}{\lambda(s)-\kappa_i(s)}}$				
ρ_d [Mg/m ³]	σ_{v0}^* [MPa]		σ_c [MPa]	
	LC_0	LC_1	LC_0	LC_1
1.30	0.65	0.4	0.075	0.075
1.50	1.9	0.8	0.09	0.09

4.2.4 Ensayos de humedecimiento con control de la succión

Para obtener información constitutiva sobre el comportamiento del material durante el proceso de humedecimiento a carga constante, se realizaron ensayos con control de la succión. Ensayos de humedecimiento a carga constante y ensayos de humedecimiento a volumen constante. Para poder controlar la succión a lo largo de todo el rango de succiones (300 MPa a saturación), se deben utilizar distintas técnicas experimentales (Romero, 2000). En estos ensayos se utilizaron dos técnicas de control de la succión: la técnica de transferencia de vapor, en un rango de succión entre 300 MPa (H_2SO_4) y 3 MPa (CuSO_4) y la técnica de traslación de ejes, para valores de succión entre 3 MPa y saturación. Los ensayos se realizaron en una célula edométrica especialmente diseñada para utilizar en forma combinada la transferencia de vapor y la traslación de ejes (apartado 2.3.1.2). A continuación se describen los ensayos realizados, se indican las distintas trayectorias de tensiones aplicadas, los resultados obtenidos y finalmente se interpretan los resultados en contraste con los resultados obtenidos en ensayos anteriores.

4.2.4.1 Ensayos de humedecimiento carga constante

En estos ensayos, se aplicaron trayectorias de humedecimiento a carga constante (300 kPa) sobre muestras fabricadas con valores de densidad seca de 1.3 y 1.5 Mg/m^3 . En estos ensayos se controló la succión y se aplicaron distintas etapas de humedecimiento desde 300 MPa y hasta saturación. En las primeras etapas de humedecimiento se controló la succión utilizando la técnica de transferencia de vapor hasta alcanzar un valor de succión de 3 MPa. A partir de este punto se aplicó una etapa de humedecimiento por inundación con agua hasta completar la saturación. La trayectoria de tensiones aplicada se muestra en la Figura 4.47 y las características de cada uno de los ensayos se resumen en la Tabla 4.13. En dicha tabla se indica el nivel de sobreconsolidación (en adelante OCR) de cada una de las muestras definido como el cociente entre la carga vertical de ensayo (300 kPa) y el valor de la presión vertical de hinchamiento $\sigma_v^*(0)$. El OCR se puede interpretar como una medida de la distancia entre el estado de tensiones existente en la muestra y la superficie de fluencia, representada por la superficie de fluencia (LC, Alonso *et al.* 1990).

Tabla 4.13. Características de los ensayos de presión de hinchamiento.

ENSAYO	ρ_d [Mg/m ³]	W.C(%)	(*)Succión [MPa]	(**)OCR
CC13	1.30	6.6	≈ 300	1.1-2.1
CC15	1.50	7.1	≈ 300	6.5-8.7
(*) Valores calculados a partir de la curva de retención.				
(**) Nivel de sobre consolidación calculado a partir de las expresiones (4.6) y (4.7).				

En la Figura 4.48 se muestra la evolución de la deformación vertical relativa $\Delta H/H_0$ a lo largo de ambos ensayos. En la etapa de carga en condiciones de fábrica (tramo 1-2 de la trayectoria de tensiones), ambas muestras desarrollan deformaciones de compresión de acuerdo con las características elásticas del material en condiciones de fábrica ($\kappa(300)$). Sin embargo, durante la etapa de humedecimiento se observaron comportamientos diferentes en ambos ensayos. En el ensayo CC15, se observan deformaciones volumétricas de expansión a lo largo de todas las etapas de humedecimiento, (trayectoria de 2-3 en la Figura 4.48). Mientras que en el ensayo CC13, se observan deformaciones iniciales de expansión en correspondencia con las etapas de humedecimiento desde 300 a 11 MPa (2-a-b-c en la Figura 4.48), seguidas por deformaciones de compresión o colapso (desde c a 3 en la Figura 4.48).

El comportamiento observado se puede interpretar utilizando las ideas planteadas en el modelo BBM (Alonso *et al.*1992), considerando las superficies de fluencia (LC) deducidas para muestras con densidades de 1.3 y 1.5 Mg/m³ (Figura 4.46). En el ensayo CC15, la trayectoria de humedecimiento a carga constante se desarrolla dentro del dominio elástico (OCR >1) y se computan únicamente deformaciones de expansión (Figura 4.49-a). En el ensayo CC13, la trayectoria de tensiones se desarrolla inicialmente en la zona elástica provocando deformaciones de expansión. Al continuar decreciendo la succión y llegar a un valor de 11 MPa, se activa la superficie de fluencia LC y se computan deformaciones de colapso (Figura 4.49-b).

4.2.4.2 Ensayos de humedecimiento a volumen constante

Se realizaron dos ensayos de humedecimiento a volumen constante con control de la succión sobre muestras con densidades de 1.3 y 1.5 Mg/m³. Partiendo de un valor de succión inicial de 300 MPa (correspondiente a un contenido de agua de entre 4 y 6%), se aplicaron sucesivas etapas de humedecimiento hasta alcanzar la saturación. El control de la succión se realizó combinando distintas técnicas experimentales. Para valores de succión entre 300 y 3 MPa se utilizó la transferencia de vapor y para valores entre 3 MPa y saturación se utilizó la traslación de ejes. A lo largo de cada uno de los ensayos se mantuvo la condición de volumen constante y se midió la presión vertical de hinchamiento de la muestra. Los resultados obtenidos a lo largo de cada uno de los ensayos se muestran en términos de succión y tensión vertical de hinchamiento en la Figura 4.50. En ambos ensayos se observa un fuerte incremento en la presión de hinchamiento durante la primera etapa de humedecimiento (indicado como 1-2 de la Figura 4.50). Durante las siguientes etapas de humedecimiento y hasta completar la saturación el valor de la presión de hinchamiento permanece casi constante. Este comportamiento se puede interpretar considerando la ocurrencia de dos fenómenos. La expansión de las unidades granulares por efecto del humedecimiento y la respuesta de la estructura granular frente al incremento del nivel de carga y humedecimiento. Durante la primera etapa de humedecimiento (la succión pasa de 300 a 100 MPa), los pellets se expanden por efecto del humedecimiento y los contactos entre gránulos de bentonita mantienen suficiente capacidad resistente. Como resultado de este proceso se observa un incremento en el valor de la carga vertical. En las siguientes etapas de humedecimiento, los pellets continúan desarrollando deformaciones de expansión y los contactos intergranulares pierden capacidad resistente por efecto del humedecimiento. La estructura granular no es capaz de soportar el incremento en el nivel de carga impuesto desde los pellets. A lo largo de estas etapas de humedecimiento y hasta completar la saturación, ambos mecanismos (expansión de los pellets y colapso de la estructura granular) se compensan mutuamente y no se observa un incremento significativo de la presión de hinchamiento vertical.

4.3 Efecto del tipo de transferencia y del gradiente hidráulico en el comportamiento de hinchamiento del material

La utilización de mezclas de pellets de bentonita como material de relleno en la construcción de barreras de ingeniería se basa fundamentalmente en la posibilidad de mecanizar y automatizar las operaciones de transporte y emplazamiento y de no necesitar el uso de una compactación adicional. Una vez emplazado el material, comienza el proceso de saturación de la barrera. Este proceso está fuertemente influenciado tanto por las condiciones de hidratación impuestas por el medio natural que aloja el ensayo (Mont Terri, Suiza), como por la utilización de un sistema de hidratación artificial. Este sistema, resulta necesario para poder alcanzar la saturación del material en un tiempo de ensayo razonable (dos años) y está compuesto por una serie de tubos que permiten inyectar agua en el propio relleno.

De acuerdo con las características estructurales del material y los resultados experimentales obtenidos hasta el momento, se ha observado que la respuesta del material durante el proceso de humedecimiento está muy influenciada por las condiciones de contorno y accesibilidad al agua. Se trata de un material con una estructura interna que presenta dos grupos o redes de poros con características diferentes. Un grupo de poros formado los conjuntos de poros interiores a los pellets de bentonita (microporosidad) y que podríamos considerar como conjuntos independientes entre sí. Por otra parte, existe un segundo grupo de poros que conecta y contienen al primero formado por los vacíos entre pellets (macroporosidad). Ambas redes de poros presentan características hidráulicas muy diferentes. La porosidad macroestructural está caracterizada por su gran interconexión y conductividad hidráulica. Por otra parte, las redes de poros microestructurales presentan una escasa interconexión, un tamaño de poro más reducido y una conductividad hidráulica mucho más baja. Estas características determinan que distintas condiciones de humedecimiento y accesibilidad de agua produzcan respuestas constitutivas muy diferentes.

Para poder estudiar la evolución y respuesta del material a lo largo de distintos procesos de humedecimiento (velocidad y tipo de transferencia de agua), se realizaron de humedecimiento por transferencia de vapor, ensayos de humedecimiento por transferencia líquida y ensayos de humedecimiento por inundación utilizando diferentes velocidades de inyección de agua. A continuación se presentan los resultados obtenidos

a lo largo de estos ensayos y se analizan las distintas respuestas constitutivas del material en el macro conceptual propuesto por Gens & Alonso (1992) para interpretar el comportamiento de suelos expansivos.

4.3.1 Transferencia líquida Vs transferencia de vapor. Ensayos de humedecimiento a carga constante.

Se realizaron dos ensayos de humedecimiento a carga constante utilizando técnicas experimentales distintas, ensayos CC13-300-W y CC13-300-V. En el ensayo CC13-300-W, se saturó la muestra por inyección de agua líquida, mientras en el ensayo CC13-300-V, se utilizó un humedecimiento por transferencia de vapor. En ambos ensayos se utilizaron muestras con una misma densidad seca de 1.3 Mg/m^3 y se mantuvo la carga vertical constante e igual a 300 kPa. Las características de cada uno de los ensayos realizados y las trayectorias de tensiones aplicadas se muestran en la Figura 4.51. En el caso del ensayo CC13-300-W, se controló el contenido de agua de la muestra y se derivaron los correspondientes valores de succión a partir de la curva de retención del material. En el ensayo CC13-300-V, se siguió una trayectoria de humedecimiento por etapas utilizando diferentes soluciones salinas y controlando la humedad relativa del aire de los poros de la muestra. Cada escalón de succión se mantuvo hasta que no se observaron cambios en la deformación volumétrica de la muestra (0.001/día). Utilizando la transferencia de vapor, se disminuyó la succión hasta un valor de 3 MPa, correspondiente a una solución saturada de sulfato de cobre (CuSO_4), y una vez alcanzado este valor, se inyectó agua líquida hasta alcanzar la saturación.

Se observaron comportamientos completamente diferentes en cada uno de los ensayos (Figura 4.52). En el ensayo CC13-300-W, se observa un colapso inicial inmediatamente después de la entrada de agua en la muestra. A continuación los pellets de bentonita comienzan a hinchar y se observa una deformación neta de expansión. Al final del ensayo y muy próximo a la saturación se observan deformaciones de colapso adicionales, (C-D en Figura 4.52-a). En el ensayo CC13-300-V, se observan deformaciones netas de expansión a lo largo de las etapas de humedecimiento por vapor (300 a 3 MPa). Al inundarse la muestra (B-C en Figura 4.52-b) se observan deformaciones de colapso seguidas de deformaciones de expansión.

Para poder comparar la cinemática de ambos ensayos se representó la evolución de la deformación vertical respecto de un tiempo normalizado. En cada ensayo se calculó el

tiempo normalizado dividiendo el tiempo real de ensayo entre el tiempo total del ensayo. En el caso del ensayo CC13-300-V, el tiempo real de ensayo es mucho mayor debido a la menor velocidad de transferencia de agua que tiene asociada a la técnica experimental utilizada. En la Figura 4.53 se muestra la evolución de la deformación vertical para cada uno de los ensayos respecto del tiempo normalizado. Estos resultados muestran que, dependiendo del mecanismo de transferencia de agua utilizado, se obtienen distintas respuestas constitutivas a lo largo de una misma trayectoria de humedecimiento.

Los resultados observados se pueden interpretar de la siguiente manera. Durante el ensayo de saturación por inundación, el agua entra en la muestra llenando los poros entre pellets (macroporosidad). Durante esta etapa la macroporosidad queda casi saturada y la succión correspondiente a dicho nivel estructural se reduce drásticamente. Las fuerzas intergranulares se debilitan y se produce el colapso de la estructura granular. Un instante posterior los pellets de bentonita comienzan a hidratarse intercambiando agua con los macroporos, se expanden y se observan deformaciones netas de expansión. Finalmente los pellets continúan hidratándose intercambiando agua con los macroporos hasta alcanzar el equilibrio. Esta explicación implica la existencia de dos potenciales de agua que coexisten en la muestra para un mismo tiempo. Un potencial correspondiente al agua existente en los poros entre pellets (succión macroestructural : s_M) y un potencial correspondiente al agua existente en los poros dentro del pellet (succión microestructural : s_m). El equilibrio en la muestra se alcanza cuando ambos potenciales se igualan.

En el caso del ensayo de humedecimiento por transferencia de vapor, los poros entre pellets permanecen en estado no saturado y la transferencia de agua se produce de forma lenta y en equilibrio con la microestructura. Siguiendo esta cinemática ambos potenciales evolucionan esencialmente en equilibrio durante estas etapas ($s_M = s_m$). Las fuerzas intergranulares se debilitan muy lentamente y no se produce el colapso de la macroestructura. Por otra parte, los pellets de bentonita se hidratan experimentando deformaciones de expansión e invadiendo la macroporosidad y reduciendo el potencial de colapso. Como resultado de ambos procesos se observan deformaciones netas de expansión desde un comienzo del ensayo.

A partir de los resultados observados se pueden hacer diferentes consideraciones sobre la respuesta constitutiva de las mezclas granulares de bentonita. Es necesario considerar la existencia, dentro de una misma muestra, de dos potenciales de agua diferentes (succiones macro y micro, S_M y S_m respectivamente). La evolución de estos potenciales depende de las características hidráulicas y mecánicas de cada uno de los medios y de la velocidad de humedecimiento utilizada. Distintas técnicas experimentales resultan en diferentes comportamientos constitutivos. Estas ideas fueron presentadas por Gens & Alonso (1992) y Alonso *et al.* (1999), en un modelo constitutivo para materiales expansivos en el que se integran las características de niveles estructurales con escalas diferentes (micro-macro) dentro de una misma respuesta fenomenológica (Modelo Expansivo de Barcelona, BExM).

4.3.2 Transferencia líquida Vs transferencia de vapor. Ensayos de humedecimiento a volumen constante (Presión de hinchamiento)

Se realizaron ensayos de humedecimiento a volumen constante utilizando un humedecimiento por inyección de agua y humedecimiento por transferencia de vapor. En el ensayo de 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 y considerando la curva de retención del material. En el ensayo de humedecimiento por vapor, se controló la humedad relativa del aire en los poros de la muestra mediante distintas soluciones salinas. Se aplicaron diferentes etapas de humedecimiento hasta alcanzar un valor de succión de 3 MPa, correspondiente a una solución saturada de sulfato de cobre (CuSO_4). En este punto se inyectó agua líquida hasta completar la saturación en una única etapa. Se realizaron dos ensayos con cada técnica experimental sobre muestras con valores de densidad seca iguales a 1.3 y 1.5 Mg/m^3 . Las características de cada uno de los ensayos realizados así como las trayectorias de tensiones aplicadas se muestran en la Figura 4.54.

A continuación se detallan los resultados obtenidos en los ensayos realizados sobre muestras con un valor de densidad seca de 1.3 Mg/m^3 , ensayos VC13-W y VC13-V. Se observaron comportamientos diferentes para cada una de las técnicas experimentales utilizadas. En el caso de los ensayos realizados utilizando transferencia líquida (ensayo VC13-W) la presión de hinchamiento crece desde un comienzo del ensayo hasta

alcanzar un máximo igual a 0.69 MPa en correspondencia con valor de succión de 13.6 MPa. A continuación la presión de hinchamiento disminuye hasta un valor mínimo de 0.53 MPa, en correspondencia con un valor de succión de 0.9 MPa, llegando a un valor final de 0.56 MPa en estado saturado. En la Figura 4.55-a se presenta la evolución del contenido de agua y de la presión de hinchamiento a lo largo del ensayo. En el caso del ensayo de humedecimiento por vapor, ensayo VC13-V, durante la primera etapa del humedecimiento (250-90 MPa) se observa un incremento en la presión de hinchamiento de 0 a 0.55 MPa. En las siguientes etapas de humedecimiento (90-3 MPa), el valor de la presión de hinchamiento se mantuvo casi constante llegando a un valor de 0.48 MPa en correspondencia con un valor de succión de 3 MPa. En este punto se inyectó agua líquida para completar la saturación. El valor de presión vertical de hinchamiento medido al final de ensayo fue de 0.49 MPa. En la Figura 4.55-b se presenta la evolución del contenido de agua y de la presión de hinchamiento para cada uno de los intervalos de humedecimiento. El tiempo total de ensayo, considerando las distintas etapas de humedecimiento por vapor fue de aproximadamente 2500 horas (105 días, 10 días por etapa aproximadamente).

Para poder comparar los comportamientos observados en ambos ensayos se representó la evolución de la presión de hinchamiento respecto del grado de saturación de la muestra para ambos ensayos (Figura 4.56-a). También se estudiaron las trayectorias de tensiones seguidas en cada ensayo representadas en términos de tensión vertical y succión (Figura 4.56-b). Se observan diferentes respuestas constitutivas dependiendo de la técnica experimental utilizada. Los comportamientos observados se pueden explicar considerando las características estructurales del material. En el caso del ensayo con agua líquida y durante la primera parte del ensayo, el agua entra en la muestra a través de la macroestructura debido a su mayor permeabilidad. Durante esta etapa se llenan los vacíos entre pellets provocando un aumento en el grado de saturación que pasa de 0.11 a 0.28 (Figura 4.45-a). En este período el agua se aloja en los vacíos entre pellets (macroporos) y la presión de hinchamiento permanece constante. Luego de esta primera etapa los pellets de bentonita comienzan a hidratarse, expanden y se observa un incremento en la presión de hinchamiento. Por el contrario al utilizar la técnica de humedecimiento por vapor la succión en ambos niveles estructurales evoluciona en equilibrio. Esto se debe a la menor velocidad de transferencia de agua asociada a esta técnica experimental. Se observa un aumento de la presión de hinchamiento al

comienzo del humedecimiento que luego se mantiene casi constante hasta el final del ensayo.

Al igual que en los ensayos de humedecimiento a carga constante el comportamiento observado, está de acuerdo con las ideas propuestas por Alonso *et al.* (1999). Para la descripción del comportamiento de estos materiales es necesario asumir la existencia de dos potenciales de agua dentro de la muestra, cada uno de ellos asociado a un nivel estructural diferente. Ambos potenciales están vinculados entre sí de forma que la macroestructura contiene y conecta a la microestructura. Ambos niveles estructurales presentan características hidráulicas y mecánicas muy distintas. La incorporación de agua en los vacíos entre pellets (nivel macroestructural) provoca el debilitamiento de los contactos intergranulares de la estructura. Por otra parte, la incorporación de agua entre los pellets (nivel microestructural), resulta en un comportamiento de expansión. La respuesta observada durante el proceso de humedecimiento dependerá entonces, tanto de las características estructurales del material como por el tipo de transferencia de agua y velocidad del humedecimiento.

4.3.3 Efecto del gradiente de inyección de agua en ensayos de presión de hinchamiento

Para estudiar el efecto de la velocidad de inyección de agua en el desarrollo de la presión de expansión durante el proceso de humedecimiento, se realizaron ensayos de humedecimiento a volumen constante aplicando diferentes gradientes de inyección, apartado 3.3.2. Se prepararon dos muestras con idénticas características (50 mm de diámetro y 20 mm de altura) y con un valor de densidad seca de 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 de 20 m, ensayos VC13-W-2 y VC13-W-20 respectivamente. En estos ensayos se utilizaron los dispositivos descritos en el apartado 3.3.2, Figuras 4.57 y 4.58 respectivamente. En ambos ensayos se midió la evolución de la presión vertical y la variación del contenido de agua en la muestra. La succión de la muestra se dedujo a partir del contenido de agua y utilizando la curva de retención.

A los efectos de comparar los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos se representaron la evolución de la presión de hinchamiento con el grado de saturación de la muestra, la trayectoria de tensiones en términos de succión y presión de hinchamiento

vertical y la evolución en el tiempo de la presión de hinchamiento vertical durante la primera parte del ensayo (Figura 4.59). Comparando la evolución de la presión de hinchamiento respecto del grado de saturación para ambos ensayos (Figura 4.59-a) se observan comportamientos diferentes. En el ensayo VC13-W-2 la presión de hinchamiento crece hasta un valor máximo de 0.69 MPa en correspondencia con un incremento del grado de saturación de 0.1 a 0.57, mientras que en el ensayo VC13-W-20 y durante ese mismo intervalo no se desarrollan presiones de hinchamiento. Posteriormente la presión de hinchamiento vertical disminuye en el ensayo VC13-W-2, mientras que en el ensayo VC13-W-20 crece de forma continua hasta el final del ensayo.

Las respuestas observadas se pueden explicar a partir de las características estructurales del material y asumiendo que el agua entra en la muestra a través de la macroporosidad (debido a su mayor permeabilidad). Durante la etapa inicial se reduce la succión en este nivel (succión macro: s_M) mientras que los pellets no sufren cambios importantes y no se desarrollan presiones de hinchamiento. La succión dentro de los pellets permanece en su valor inicial (succión micro: $s_m \approx s_{m0}$). La cantidad de agua que ingresa en la muestra durante esta etapa inicial de cada ensayo, depende directamente de la velocidad de inyección. En este caso, en el ensayo VC13-W-2 se produce un aumento en el grado de saturación de 0.1 a 0.28, mientras que en el ensayo VC13-W-20 debido a su mayor velocidad de inyección, el grado de saturación alcanza un valor cercano a 0.7. Inmediatamente después de esta etapa inicial, los pellets se hidratan tomando agua de los macroporos y expanden. En el ensayo se observa un incremento en la presión de hinchamiento. En la Figura 4.59-c se presenta la evolución en el tiempo de la presión de hinchamiento durante la fase inicial de ambos ensayos. Esto indica que en ambos ensayos el volumen de agua incorporado a nivel de la microestructura (dentro de los pellets) es el mismo.

De acuerdo con el comportamiento observado se pueden hacer las siguientes consideraciones:

- La incorporación de agua en el suelo resulta en distintas respuestas constitutivas dependiendo de donde es almacenada. El agua almacenada en los poros entre pellets (nivel macroestructural) debilita los contactos entre pellets y provoca muy

poco o ninguna expansión. Por el contrario si el agua se almacena en los pellets (nivel microestructural) se observa una expansión.

- Durante la primera parte del ensayo, el agua entra en la muestra fluyendo a través de la macroporosidad debido a su mayor conductividad hidráulica. El volumen entrado en la muestra durante este período se almacena en los vacíos entre pellets y será mayor en tanto se aplique una mayor velocidad de inyección.
- Luego de esta primera etapa, los pellets se hidratan tomando agua desde la macroestructura y expanden. Se invaden los macroporos y se bloquea el flujo de agua. Durante esta etapa se computa un aumento en la presión de expansión que evoluciona igual en ambos ensayos. Esto indica que la cantidad de agua ingresada en los pellets (causantes de la respuesta expansiva) es la misma.
- La evolución en el tiempo del grado de saturación resulta muy diferente en ambos ensayos (Figura 4.60). En el ensayo VC13-W-2, el grado de saturación al final de la primera etapa del ensayo es de $S_r=0.28$, mientras que en el ensayo VC13-W-20 es de $S_r=0.90$. Durante este período la evolución de la presión de hinchamiento es la misma en ambos ensayos indicando que la cantidad de agua que es incorporada a nivel microestructural es la misma.

4.4 Resumen y comentarios generales

Se han presentado los resultados experimentales correspondientes a la caracterización hidromecánica de mezclas de pellets de bentonita. Se han estudiado mezclas con distintos valores de densidad seca y sobre ellas se han realizado numerosos ensayos. Un primer grupo de ensayos para caracterizar el comportamiento hidráulico (ensayos de permeabilidad saturada, ensayos de infiltración y curvas de retención a volumen constante). En segundo lugar se realizaron ensayos de expansión e hinchamiento y ensayos de compresibilidad considerando su variación con la succión. Finalmente se han realizado ensayos para caracterizar la respuesta del material en diferentes procesos de humedecimiento. Ensayos de humedecimiento por transferencia de vapor, ensayos de humedecimiento transferencia líquida y ensayos utilizando distintos gradientes de inyección de agua. Finalmente, el conjunto de resultados obtenidos se ha interpretado de forma consistente a partir de las ideas presentadas por Alonso, Gens & Josa (1990),

Gens & Alonso (1992) y Alonso *et al.* (1999) para explicar el comportamiento de suelos no saturados.

De acuerdo con el conjunto de ensayos realizados y los resultados obtenidos se pueden hacer las siguientes consideraciones generales:

- La estructura interna de las mezclas de pellets de bentonita se caracteriza por la existencia de dos niveles estructurales. Un nivel microestructural formado por las unidades de bentonita altamente compactada y de características expansivas, y un nivel macroestructural, representado por los arreglos intergranulares entre pellets.
- La permeabilidad del material en condiciones saturadas está determinada por el valor de densidad seca y no por la granulometría inicial. Los valores obtenidos están de acuerdo con los resultados reportados por Villar (2000) y ENRESA (2000) para bloques de bentonita compactada.
- La evolución de las propiedades hidráulicas del material a lo largo del proceso de saturación por inyección dependen de las condiciones de inyección. El comportamiento observado se puede describir considerando dos casos extremos. El caso de una inyección lenta, caracterizada por una hidratación uniforme del material y el caso de una inyección rápida, caracterizada por la hidratación disociada de la macro y la microestructura. Para reproducir de forma adecuada las características hidráulicas del material es necesario tener en cuenta no solo el volumen total de vacíos existente en el material sino su distribución por tamaño y evolución durante el mojado.
- La presión de hinchamiento del material depende de la densidad seca de la muestra. Los valores observados están de acuerdo con los reportados para muestras de bentonita FEBEX sin precalentar (ENRESA, 2000).
- La evolución de la compresibilidad del material con la succión se estudió a partir de ensayos de carga a succión constante. El material presenta una zona de comportamiento elástico y una zona de comportamiento elastoplástico. El límite entre ambas representa la superficie de fluencia del material (superficie de carga y colapso LC; Alonso, 1990) y está definida por los valores de la carga de

preconsolidación a distintos valores de succión. La determinación de dicha curva para materiales expansivos resulta dependiente de la trayectoria de tensiones utilizada. El comportamiento de compresibilidad del material se puede interpretar utilizando las ideas planteadas por Gens & Alonso (1990) en el modelo constitutivo Modelo Básico de Barcelona (BBM-Barcelona Basic Model). Este modelo resulta adecuado para describir los mecanismos de cambio volumétrico producidos por un cambio en el nivel de carga.

- Se realizaron ensayos para simular las distintas condiciones de inyección en las que se puede encontrar el material en el ensayo a escala real (Mont Terri, Suiza). En estos ensayos se estudió la influencia del tipo de transferencia de agua (líquido y vapor) y la influencia de la velocidad de inyección de agua en la respuesta del material. Se observa que distintas condiciones de humedecimiento provocan respuestas constitutivas diferentes. La interpretación del comportamiento observado requiere realizar diversas consideraciones. En primer lugar, la existencia de dos potenciales de agua diferentes. Un potencial asociado al agua existente en los poros entre pellets (succión macro: s_M) y un potencial de agua asociado al agua existente dentro del pellet (succión micro: s_m). En segundo lugar, la influencia de la velocidad y disponibilidad de agua determinadas por las condiciones particulares de hidratación. Finalmente considerar las respuestas constitutivas de cada uno de los niveles estructurales existentes en el material frente a un aumento de la carga y un humedecimiento.
- La interpretación del comportamiento observado requiere de un modelo capaz de tener en cuenta la existencia de múltiples niveles estructurales, con características constitutivas diferentes y que permita integrar estas respuestas de forma consistente.