

Capítulo 2: Técnicas de medida y control de la succión y equipo experimental

Para desarrollar el trabajo experimental planteado en esta investigación y poder caracterizar el comportamiento hidromecánico de las mezclas de pellets de bentonita, es de fundamental importancia contar con una sistemática de trabajo adecuada. Esto incluye por un lado, la selección de un conjunto de técnicas y procedimientos experimentales y por otro, contar con un equipamiento de laboratorio adecuado a estos materiales (materiales poco permeables y muy expansivos) y capaz de reproducir en forma realista las condiciones de utilización del material. Existen numerosos estudios que reportan el comportamiento hidromecánico de materiales arcillosos y expansivos en condiciones no saturadas que merecen una especial atención. Los trabajos experimentales realizados por Romero (1999) resultan un acabado documento de referencia sobre equipos, técnicas experimentales, sistemas de control y procedimientos de ensayos utilizados en la caracterización termo-hidro-mecánica de un material arcilloso, arcilla de Boom. Los trabajos de Barrera (2002) y Mata (2003), son una referencia útil como trabajos de caracterización hidromecánica realizados sobre un limo arcilloso y mezclas de granito con bentonita.

En el caso particular de materiales de bentonita se trata de materiales con una muy baja permeabilidad y con un gran potencial expansivo. Esto determina que los ensayos de laboratorio tengan en su gran mayoría una larga duración y se deban utilizar equipamientos robustos, capaces de medir y aplicar grandes esfuerzos y presiones de agua. Como guía general y debido a la gran similitud existente entre los materiales utilizados en ambos estudios, se consideraron los resultados y equipos reportados en el proyecto FEBEX (ENRESA, 2000) y en la tesis doctoral de Villar (2000). Los trabajos de laboratorio realizados en dicho proyecto incluyen la caracterización del comportamiento termo-químico-hidro-mecánico de bloques de bentonita compactada. Dichos bloques se fabricaron utilizando el mismo tipo de bentonita que la utilizada en la fabricación de los pellets. Existen otros trabajos de referencia en la caracterización del comportamiento de materiales de bentonita como el realizado a lo largo del proyecto RESEAL (2000), el proyecto PRACLAY (2001) y el estudio realizado por el Japan Nuclear Cycle Development Institute (2001).

Como referencia específica sobre el proceso de fabricación de pellets y sobre el comportamiento hidromecánico de materiales de arcilla en forma de pellets, hay que destacar los trabajos realizados por NAGRA (2001) sobre la fabricación de pellets de bentonita con diferente contenido de agua inicial y diferentes procedimientos de compactación. También los resultados obtenidos por Alonso *et al.* (1995) en el estudio de la evolución de la deformación volumétrica a lo largo de ciclos de mojado y secado sobre muestras formadas por pellets de arcilla de Boom.

La aplicación de las diferentes técnicas de succión está íntimamente ligada al concepto de succión del suelo, sus componentes y a los diferentes factores que la determinan. A continuación se presenta una breve descripción del concepto de succión en el suelo y se describen sus diferentes componentes. Seguidamente, se presentan las técnicas experimentales de control y medida de la succión utilizadas en el presente programa experimental. Finalmente, se describen los diferentes equipos de laboratorio utilizados en el programa de laboratorio desarrollado a lo largo de esta investigación.

2.1 El concepto de succión en el suelo

El objetivo del presente apartado es introducir en forma breve el concepto de succión en el suelo, sus diferentes componentes y de realizar una descripción que facilite el entendimiento posterior de cada una de las técnicas experimentales utilizadas a lo largo de este trabajo. Una detallada descripción del concepto de succión desde un enfoque termodinámico se encuentra en los trabajos de Pousada (1984) y Escario & Sáez (1986).

El suelo en estado no saturado, está compuesto por tres fases: las partículas de suelo (fase sólida), la fase gaseosa y la fase líquida. El concepto de succión surge vinculado a la descripción del comportamiento del suelo en su estado no saturado a principios de 1900 (Buckingham, 1907; Gardner & Widstoe, 1921; Richards, 1928). La idea inicial se desarrolla en relación a la descripción del sistema agua-suelo-vegetación y a la capacidad de extraer y/o movilizar el agua existente en el suelo por sobre el nivel freático. Si el movimiento del agua en el suelo estuviera gobernado únicamente por las fuerzas gravitatorias, entonces el nivel freático determinaría un límite físico para la presencia de agua en el suelo. El suelo se encontraría en estado saturado (fase sólida y fase líquida) en cualquier punto por debajo del nivel freático y en estado seco (sin presencia de agua) en cualquier punto por sobre dicha superficie. La situación real del

agua en el suelo nos advierte que esta situación no es para nada cierta y que es posible encontrar agua almacenada o retenida por el suelo frente a los esfuerzos gravitacionales por sobre el nivel freático. El concepto de succión nos permite fundamentar la ocurrencia de éste tipo de fenómeno desde un punto de vista más formal y explicar la capacidad de un suelo de retener agua, así como la mayor o menor facilidad para movilizar una cierta cantidad de agua dentro del suelo. En términos más formales Aitchison (1965) define la succión del agua como la cantidad de energía libre de un volumen unitario de agua existente en el suelo, con referencia al mismo volumen de agua pura, en estado libre y con la misma energía potencial gravitatoria. Esta definición realizada en términos de energía es generalmente aceptada dentro de la mecánica de suelos y nos permite describir el movimiento del agua del suelo de manera integrada e independiente. Esto hace posible agrupar a las distintas componentes de la energía en una única variable.

La energía libre del agua en el suelo se puede medir en términos de la presión parcial de vapor de agua presente en la fase gaseosa existente en el suelo. La ley que vincula la succión o energía libre del suelo con la presión parcial de vapor de agua u_v , de acuerdo con Fredlund & Rahadjo, (1993) es:

$$\Psi = - \frac{\rho_w RT}{M_w} \ln \left(\frac{u_v}{u_{v0}} \right) \quad (2.1)$$

donde:

- Ψ es la succión total en MPa.
- $\rho_w(T) = 998 \text{ Kg/m}^3$ a $20 \text{ }^\circ\text{C}$ es la densidad del agua.
- $R = 8.3143 \text{ J/mol.K}$ es la constante universal de los gases ideales.
- T es la temperatura absoluta en Kelvin.
- $M_w = 18 \text{ Kg/Kmol}$ es la masa molecular del agua.
- u_v es la presión parcial de vapor de agua.

- u_{v0} es la presión de saturación del vapor de agua en equilibrio con una superficie plana de agua pura a la misma temperatura.

El término $\frac{u_v}{u_{v0}}$ se denomina humedad relativa HR(%) y de acuerdo con la expresión (2.1) un valor de humedad relativa menor al 100% indica la existencia de succión en el suelo.

2.1.1 Componentes de la succión

Al valor de la succión expresado en función de la humedad relativa (HR) de acuerdo con la ecuación (2.1) se lo denomina succión total (Ψ), y se asume que está formada por dos componentes fundamentales: la succión matricial y la succión osmótica (Aitchison, 1965). Seguidamente se describe de forma breve el origen de cada uno de los diferentes potenciales del agua. El efecto matricial o capilar y el efecto osmótico o de soluto del agua del suelo.

2.1.1.1 Succión matricial

La succión matricial o energía potencia matricial, está asociada a las fuerzas capilares existentes en el suelo. El fenómeno capilar se puede describir a partir de sumergir la parte inferior de un cilindro de pequeño diámetro en un recipiente que contiene agua pura. Al entrar en contacto con el agua, el interior del tubo se llena de agua hasta una altura h_c por sobre el nivel de agua y que depende inversamente del radio del tubo (Figura 2.1-a). Este fenómeno se denomina ascensión capilar, y se produce por varios efectos: por efecto de la atracción existente entre las moléculas de vidrio y agua y debido a la tensión superficial del agua. El agua capilar (dentro del tubo) tiene un valor de presión negativa respecto de la presión de aire, normalmente presión atmosférica en el campo (u_a).

El mismo fenómeno tiene lugar en el suelo situado inmediatamente por sobre el nivel freático. Planteando una analogía para el suelo, asimilando los poros interconectados del suelo a una red de tubos capilares, se puede explicar la existencia de agua en el suelo por sobre el nivel freático. Por otra parte, la ascensión capilar del agua en el suelo dependerá del tamaño característico de los poros (radio de los tubos), Figura 2.1-b. Un suelo con poros más pequeños tendrá un diámetro de tubo equivalente menor y por

tanto una mayor ascensión capilar. En la zona del suelo que comprende la ascensión capilar nos encontramos entonces con valores de presión de agua negativos respecto de la presión de aire. En la Figura 2.2 se muestran las diferentes fases del suelo en la zona de ascensión capilar inmediatamente por sobre el nivel freático.

El concepto de succión capilar o matricial resulta más claro al comparar la energía libre del agua del suelo en un recipiente amplio con la energía existente en el agua contenida en el tubo capilar, Figura 2.3-a. Considerando la presión parcial de vapor de agua en equilibrio sobre la superficie curvada del menisco (u_v) y la presión de vapor de agua en equilibrio con la superficie de agua del sistema de referencia (u_{v1}) no encontramos que $u_v < u_{v1}$, (Figura 2.3-a). En otras palabras, la humedad relativa en el suelo (u_v/u_{v0}) es menor que la humedad relativa correspondiente al agua del suelo en el sistema de referencia debido al efecto de las fuerzas capilares. Al mismo tiempo el radio de curvatura del menisco es inversamente proporcional a la diferencia de presión de agua y aire ($u_a - u_w$) a la que se denomina succión matricial. La componente matricial de la succión contribuye a disminuir la humedad relativa del suelo y depende de la “arquitectura” del suelo, de la distribución y geometría de las interfaces agua-aire existentes en el suelo.

2.1.1.2 Succión osmótica

En muchos casos el agua existente en el suelo no es agua pura sino que contiene sales disueltas. De igual forma que en el caso anterior, la presión de vapor de agua en equilibrio con el agua del suelo (u_v) es menor que la presión de vapor de agua en equilibrio en un sistema de referencia formado por agua pura (u_{v0}), $u_v < u_{v0}$ en Figura 2.3-b. Esto determina que la presencia de sales disueltas en el agua provoca un cambio en la humedad relativa del suelo. El efecto de cambio de humedad relativa provocado por la composición química del agua se denomina succión osmótica. Esta componente de la succión se representa como (π).

2.1.1.3 Succión total

La succión total en el suelo, indicada como ψ , es el resultado de la suma de las dos componentes anteriores: succión matricial ($u_a - u_w$) y succión osmótica (π) (Figura 2.3-c). Y representa el potencial del agua en el suelo.

$$\psi = (u_a - u_w) + \pi \quad (2.2)$$

2.2 Técnicas experimentales de control y medida de la succión

Para realizar los trabajos experimentales presentados en este trabajo, controlar y medir la succión existente en el suelo, se han utilizado diversas técnicas experimentales, (Fredlund & Rahadjo, 1993; Gens & Romero, 1998; Romero, 2001). Para controlar la succión en el suelo se utilizaron las técnicas de traslación de ejes y de transferencia de vapor, mientras que para medir la succión se utilizó un psicrómetro de transistores (Woodburn, J.A. 1995). A continuación se describen los principios fundamentales de cada una de las técnicas utilizadas así como las características de su implementación.

2.2.1 Control de succión por traslación de ejes

La aplicación y control de la succión por medio de la técnica de traslación de ejes está ligada fundamentalmente al control de la transferencia de agua en forma líquida. Esta técnica se basa en el concepto de succión matricial definida como la sobre presión de aire respecto de la presión de agua $s = (u_a - u_w)$. La traslación de ejes está inspirada en la técnica propuesta por Hilf (1956) utilizada para medir presiones de agua en suelos parcialmente saturados y con una fase de aire continua (grado de saturación $S_r < 0.95$). Hilf asume que al aplicar incrementos de presión sobre la fase gaseosa, se inducen idénticos incrementos sobre la fase líquida y de esta manera se pueden medir presiones de agua positivas. Fredlund & Mogensten (1977) utilizaron esta técnica con éxito para valores del grado de saturación S_r entre 0.76 y 0.95. Posteriormente Tarantino *et al.* (2000), han reportado buenos resultados al aplicar esta técnica en rangos de S_r entre 0.56 y 0.77.

Existen dos procedimientos para aplicar esta técnica de control de la succión: el procedimiento de sobre presión de aire y el de subpresión de agua. En el primer caso la presión de aire se mantiene constante mientras se varía la presión de agua y en el segundo procedimiento, la presión de agua se mantiene constante y se varía la presión de aire. Si bien ambos procedimientos ofrecen un buen control de la succión para grados de saturación baja, mientras existe continuidad en la fase gaseosa, el segundo de los procedimientos (variando la presión de aire) presenta ciertos problemas cuando el suelo

se encuentra en estado casi saturado ($S_r > 0.95$). En este caso, los incrementos de presión de aire actúan como un incremento en la tensión total provocando la compresión de la muestra. Por esta razón, para estados cercanos a la saturación, o bien se utiliza el procedimiento con presión de aire constante o si se deben efectuar incrementos en la presión de aire, se realizan en forma lenta y evitando que actúen como un incremento en la tensión neta. En esta investigación se utilizó el método de sobre presión de aire, se mantuvo la presión de aire constante y se aplicaron incrementos de presión de agua.

A los efectos de implementar esta técnica experimental es necesario utilizar un elemento separador entre la fase gaseosa y la fase líquida. Los elementos separadores se pueden asimilar a un conjunto de tubos capilares con un diámetro $\phi_{\text{CHARACT.}}$ (Figura 2.4). Debido a su pequeño diámetro, estos tubos son capaces de retener agua y permanecer saturados aún soportando una diferencia de presión entre la fase gaseosa (u_a) y la fase líquida (u_w) a ambos lados del elemento. Al máximo valor de sobre presión de aire ($u_a - u_w$) que el elemento puede soportar sin desaturarse se le denomina valor de entrada de aire. Dicho valor depende directamente del diámetro característico de los poros del elemento (a menor diámetro característico, mayor valor de entrada de aire). El buen funcionamiento de estos elementos resulta clave en la aplicación de ésta técnica experimental. Existen dos tipos de elementos separadores, las membranas de acetato (Figura 2.5) y las piedras cerámicas de alto valor de entrada de aire (AVEA) (Figura 2.6). Las membranas permiten alcanzar diferencias de presión de hasta 7 MPa mientras las piedras cerámicas permiten alcanzar diferencias de hasta 3.0 MPa. En esta investigación se utilizó un disco cerámico de alto valor de entrada de aire de 1.5 MPa.

Al aplicar un cambio incremental en el valor de la succión $\Delta s = \Delta(u_a - u_w)$ se mide el cambio en el contenido volumétrico de agua de la muestra (Figura 2.7). Para medir el volumen de agua se utilizó un medidor de volumen de bureta graduada. Dicha bureta tiene una resolución de 20mm^3 y se encuentra al interior de un tubo de metacrilato. El sistema está lleno con dos fluidos, el agua de ensayo y un líquido inmiscible con el agua y de diferente color (generalmente gasoil). Utilizando este sistema se controla el volumen de agua entrado o salido de la muestra midiendo la posición de la interfase de ambos líquidos (menisco) al interior de la bureta graduada. Se asume que la muestra ha

alcanzado el nuevo estado de equilibrio, cuando no se registran cambios en el contenido volumétrico de agua ni en la deformación volumétrica de la muestra.

La aplicación de la técnica de traslación de ejes para el control de la succión requiere cuidar dos aspectos fundamentales: la humedad relativa de la fase gaseosa y la acumulación de aire en la fase líquida. Respecto del primero de los aspectos mencionado, es importante controlar la humedad relativa del aire con el que se aplica la presión (u_a) para evitar el exceso de evaporación. En sistemas donde existe un flujo de aire y la evaporación puede ser importante, se utiliza un aire con una HR(%) elevada. En relación al segundo de los efectos, la acumulación de aire disuelto bajo el elemento separador, se utiliza un equipo auxiliar que permite transportar y atrapar las burbujas de aire evitando así su interferencia con el transporte líquido, Figura 2.7.

Previo a la realización de cada uno de los ensayos en los que se utiliza ésta técnica, se verifica el buen funcionamiento de la piedra cerámica de acuerdo con el procedimiento que se describe a continuación. Una vez saturada la piedra cerámica se coloca una cantidad de agua conocida sobre la piedra y se aplica un cierto valor de sobre presión de aire (u_a) (Figura 2.8-a). Debido a la diferencia de presión ($u_a - u_w$) se establece un flujo de agua que atraviesa la piedra cerámica. Una vez expulsado el volumen de agua sobre la piedra el flujo de agua se detiene. La piedra se mantiene saturada por efecto de las fuerzas capilares que retienen el agua. En la Figura 2.8 se muestran los resultados obtenidos en la verificación de la piedra de alto valor de entrada de aire de forma previa a la realización de un ensayo. Se colocaron 7 ml de agua sobre la piedra cerámica ya saturada y se aplicó una sobre presión de aire respecto de la de agua de 796 kPa. Para el caso de una piedra de 7.0 mm de espesor es equivalente a un gradiente hidráulico $\Delta h \approx 114$ m. En la Figura 2.8 se muestra la evolución temporal del volumen de agua que atraviesa la piedra cerámica. Luego de expulsar un volumen de 7 ml, el flujo se detiene debido a que el valor de sobre presión aplicado 0.796 MPa es menor que el valor de entrada de aire de la piedra porosa cerámica 1.5 MPa.

2.2.2 Control de la succión por transferencia de vapor

La técnica de control de la succión mediante la técnica de transferencia de vapor se basa en el control de la humedad relativa del aire existente en los poros del suelo. Esto se

realiza utilizando un sistema termodinámicamente cerrado. En esta técnica, la transferencia e intercambio de agua con el suelo se produce en forma de vapor cuya humedad relativa es controlada. La humedad relativa del aire se entiende como el cociente entre la presión de vapor en el ambiente y la presión de vapor en condiciones saturadas. Esto es:

$$HR (\%) = \frac{P_{\text{vapor en el ambiente}}}{P_{\text{vapor en cond. saturadas}}} \times 100 \quad (2.3)$$

La relación entre la humedad relativa del aire (HR) y la succión total está dada por la ley psicrométrica planteada por Fredlund & Rahadjo, (1993) y expresada en la ecuación (2.1).

La humedad relativa (HR) del aire en contacto con la muestra se controla mediante soluciones acuosas, utilizando solutos no volátiles (soluciones salinas) o volátiles (soluciones de ácidos). La humedad relativa que se aplica al utilizar cada una de las soluciones depende de la concentración de soluto, de la temperatura y en menor forma de la presión de la fase gaseosa, Tabla 2.1.

La transferencia de vapor se puede realizar por simple difusión, colocando las muestras de suelo en un recipiente cerrado y en contacto con el aire de la solución (Figura 2.9) o bien utilizando un sistema de convección forzada (Figura 2.10). La utilización de un sistema con convección forzada resulta en un intercambio más efectivo y en tiempos de equilibrado menores. En estos casos se fuerza la circulación de vapor utilizando una bomba y se circula el aire pasando por los contornos de la muestra y/o atravesándola. Esta última logra un intercambio de agua más efectivo entre el suelo y el vapor. En la Figura 2.10 se muestra un esquema del funcionamiento de la técnica de transferencia de vapor por medio de un sistema con convección forzada. El flujo de vapor se realiza atravesando la muestra mientras exista continuidad en la fase gaseosa ($S_r < 0.85-0.9$): para valores de S_r mayores se utiliza una circulación por los contornos.

El uso de las diferentes soluciones acuosas depende del rango de succiones que se aplique. En la Tabla 2.1 se presentan las características de algunas de las soluciones acuosas utilizadas, se indica la humedad relativa, la succión, la solubilidad así como el rango de temperatura en el cual la solución que se pueden utilizar. La humedad relativa

en función de la temperatura para cada una de las soluciones se calcula a partir de una ley exponencial de tipo:

$$HR=A \exp\left(\frac{B}{T}\right) \quad (2.4)$$

donde A y B son constantes que varían para cada una de las soluciones.

Mediante la técnica de transferencia de vapor y combinando la utilización de diferentes soluciones se puede controlar la humedad relativa en rangos de valores entre 0.97 a 0.05 lo que corresponde a valores de succión total entre $\Psi \approx 3$ MPa a 400 MPa.

Para valores de succión menores de 3 MPa la técnica de transferencia de vapor se vuelve inestable. Para variaciones de temperatura de ± 0.5 °C se producen variaciones en el valor de la succión de aproximadamente ± 2 MPa. En el caso particular del sulfato de cobre CuSO_4 la humedad relativa que se aplica con una solución sobresaturada a 22 °C es del 97% y equivalente a una succión total de 4.1 MPa. Mientras que la humedad relativa impuesta por la misma solución a una temperatura de 21.5 °C es del 100%, correspondiente a un valor de succión nula. Si por el contrario, la temperatura en el suelo es de 22.5°C, entonces la humedad relativa impuesta resulta del 94.1% y la succión es de 8.2 MPa. En definitiva, variaciones de 0.5°C en la temperatura producen errores en la succión aplicada del 100%. En la Figura 2.11 se muestra el caso del sulfato de cobre (CuSO_4) anteriormente descrito.

Para realizar la elección de la solución acuosa a utilizar se debe de tener en cuenta la influencia de los cambios de temperatura en la succión aplicada. Asumiendo una dependencia de tipo exponencial para la presión de vapor saturante con la temperatura de acuerdo con (2.4), Romero (2001) llega a la siguiente expresión para determinar el efecto de variación de temperatura en la succión aplicada:

$$\frac{\partial \Psi}{\partial T} \approx \frac{B \rho_w R T}{M_w} \quad (2.5)$$

Delage *et al.* (1998) recomienda el equilibrado mediante la técnica de transferencia de vapor para valores de succión total $\Psi \geq 10$ MPa . A lo largo del programa de laboratorio desarrollado en esta investigación, para controlar la succión en un rango entre 250 y 20

MPa, se utilizaron soluciones no saturadas de ácido sulfúrico (H_2SO_4). El control de la succión real aplicada con este tipo de soluciones se realizó a partir de la medida de la densidad de la solución acuosa una vez alcanzado el equilibrio. En la Figura 2.13 se muestra la relación entre la densidad de la solución de H_2SO_4 y la succión aplicada para varias temperaturas. Para la medida de la densidad se utilizaron densímetros de flotación con una apreciación de $\pm 0.001 \text{ Mg/m}^3$, Figura 2.12. Según Romero (2001), es recomendable el uso del H_2SO_4 en rangos de humedad relativa entre 0.05 y 0.86 (Ψ entre 20 MPa y 400 MPa). Las soluciones de ácido sulfúrico presentan dificultades para ajustar su densidad y controlar la humedad relativa para valores mayores que 0.86. Por otra parte, la volatilidad del H_2SO_4 para valores de humedad inferiores a 0.05 (que corresponden a presiones de soluto $u_{\text{ácido}}/u_v > 10^{-6}$) es considerable, y puede afectar a la estructura química del suelo. En el caso de soluciones acuosas parcialmente saturadas y a lo largo de las trayectorias de secado, la solución incorpora el agua transportada en forma de vapor proveniente del suelo. Esto provoca una disminución de la concentración de H_2SO_4 en la solución y disminuye la humedad relativa impuesta. Para evitar grandes variaciones entre la succión inicial y la succión final (variaciones en las concentraciones de H_2SO_4), se utilizó una cantidad de solución tal que la masa de agua incorporada desde el suelo no generara cambios significativos en la concentración de la solución. Para aplicar succiones en el rango entre 20 y 3 MPa se combinaron otras soluciones con distintos solutos y concentraciones.

Tabla 2.1. Propiedades de soluciones saturadas de diferentes compuestos (adaptado de Lide y Frederikse, 1997 y Romero, 2001).

Compuesto	T (°C)	A (%)	B (K)	$u_v/u_{v,0}$ (%) a 25°C	Ψ (MPa) a 25°C	Solubilidad (g/100 g H ₂ O) a 30°C
NaOH·H ₂ O	15-60	5.48	27	6	386	113
LiBr·2H ₂ O	10-30	0.23	996	6	386	193
ZnBr ₂ ·2H ₂ O	5-30	1.69	455	8	347	529
KOH·2H ₂ O	5-30	0.014	1924	9	330	128
LiCl·H ₂ O	20-65	14.53	-75	11	303	86
CaBr ₂ ·6H ₂ O	11-22	0.17	1360	16	251	170*
LiI·3H ₂ O	15-65	0.15	1424	18	235	170
CaCl ₂ ·6H ₂ O	15-25	0.11	1653	29	170	97*
MgCl ₂ ·6H ₂ O	5-45	29.26	34	33	152	57*
NaI·2H ₂ O	5-45	3.62	702	38	133	192
K ₂ CO ₃ ·2H ₂ O	20			44	112	113
Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	10-30	1.89	981	51	92	156
Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	5-35	25.28	220	53	87	74*
NaBr·2H ₂ O	0-35	20.49	308	58	75	98
NaNO ₂	20			66	57	88
KI	5-30	29.35	254	69	51	153
SrCl ₂ ·6H ₂ O	5-30	31.58	241	71	47	57*
NaNO ₃	10-40	26.94	302	74	41	95
NaCl	10-40	69.2	25	75	39	36
NH ₄ Cl	10-40	35.67	235	79	32	41
KBr	5-25	40.98	203	81	29	71
(NH ₄) ₂ SO ₄	10-40	62.06	79	81	29	78
KCl	5-25	49.38	159	84	24	37
Sr(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	5-25	28.34	328	85	22	89
BaCl ₂ ·2H ₂ O	5-25	69.99	75	90	14	38
ZnSO ₄ ·7H ₂ O	20			91	13	62*
CsI	5-25	70.77	75	91	13	95
KNO ₃	0-50	43.22	225	92	11	46
CuSO ₄ ·5H ₂ O	20			97	4	24*
K ₂ SO ₄	10-50	86.75	34	97	4	13

2.2.3 Medida de la succión utilizando un psicrómetro de transistores

El psicrómetro de transistores (SMI), (Woodburn, J.A. 1995) mide la succión total en el suelo Ψ a partir de la medida de la humedad relativa de la fase gaseosa del suelo y utilizando la relación propuesta en (2.1). El psicrómetro mide la humedad relativa del aire a partir de la diferencia de temperatura entre dos termómetros que se encuentran en el ambiente cuya humedad quiere medirse. Uno de ellos se encuentra seco y el otro húmedo, rodeado de agua que se evapora de forma continua. El calor de evaporación hace que la temperatura del termómetro húmedo T_h disminuya en forma proporcional a la humedad relativa del ambiente. La temperatura del termómetro seco T_s permite tener una temperatura de referencia (Figura 2.14). Para realizar la medida de la humedad relativa mediante el psicrómetro se alimenta el circuito de transistores con una corriente (V) y se mide la variación en la señal (mV) provocada por la diferencia de temperatura existente entre ambos transistores (T_h y T_s), la cual es directamente proporcional a la humedad relativa del ambiente.

En los trabajos de laboratorio realizados en la presente investigación se utilizó un psicrómetro de transistores de tipo SMI (Woodburn *et al.*, 1993), Figura 2.15. De acuerdo con los trabajos de Woodburn & Lucas (1995), Romero (1999) y Mata *et al.* (2002), se realizaron medidas de la succión en rangos de valores entre 1 y 100 MPa. Previo a la utilización del psicrómetro, se realizó la calibración de cada uno de los sensores mediante la utilización de soluciones salinas de NaCl de diferente concentración, Romero (1999). Utilizando estas soluciones se impusieron diferentes valores de humedad relativa y se midió la respuesta del sensor. Tanto en la calibración como en cada uno de los ensayos realizados se siguieron los procedimientos propuestos por Mata *et al.* (2002). Este procedimiento propone tiempos de equilibrado de 60 minutos. Las curvas de calibración obtenidas para algunos de los sensores utilizados se presentan en el ANEXO I.

2.3 Equipo experimental utilizado

El programa experimental desarrollado se centro la determinación de las características del cambio volumétrico en condiciones de volumen constante y condiciones edométricas (expansión, colapso, límites de deformación elástica) y las características del comportamiento hidráulico y su evolución durante el proceso de hidratación

(permeabilidad saturada, permeabilidad relativa, curvas de retención y capacidad de almacenamiento). Para ello se utilizaron una serie de equipos de laboratorio los cuales se pueden agrupar en dos conjuntos diferentes. Por un lado, el equipamiento para la determinación de las características del cambio volumétrico formado por células edométricas y por otro, el equipamiento utilizado para la determinación de las características del comportamiento hidráulico, formado por células de infiltración.

La selección y diseño del equipamiento de laboratorio se realizó tomando como base la información existente sobre este tipo de materiales, información experimental y constitutiva. En primer lugar, la información proveniente del programa experimental realizado en el proyecto FEBEX: equipos, resultados, técnicas y procedimientos experimentales. Programa en el que se realizó la caracterización termo-químico-hidro-mecánica de bloques de bentonita compactada. En un segundo lugar, la utilización de un marco teórico y un modelo constitutivo adecuado a los suelos no saturados y con características expansivas, (Alonso *et al.* 1990; Gens & Alonso, 1992; Alonso *et al.*, 1994 y Alonso *et al.* 1999).

A continuación se describen cada uno de los equipos de laboratorio utilizados así como el tipo de ensayo realizado con cada uno de ellos. Se indican sus prestaciones, los elementos y dispositivos auxiliares, las calibraciones y sistemas de adquisición de datos en los casos correspondientes. Los equipos se presentan separados en dos grupos, los equipos utilizados para la caracterización del comportamiento de cambio volumétrico y los equipos utilizados para la caracterización del comportamiento hidráulico.

2.3.1 Equipamiento para la caracterización del comportamiento de cambio volumétrico

La caracterización del comportamiento de cambio volumétrico de las mezclas de pellets de bentonita se realizó fundamentalmente a partir de ensayos de tipo edométrico (ensayos en condiciones de confinamiento lateral). La elección de este tipo de ensayo como el más representativo para realizar esta caracterización se basa en varios factores: la precisión en la medida del cambio volumétrico (0.02-0.04%), el tipo de trayectoria de tensiones que se aplica en este tipo de equipos (siguiendo las condiciones de compactación K_0) y la relativa sencillez del ensayo. Estos equipos nos permiten plantear un programa de ensayos sistemático y de metodología sencilla. Un aspecto desfavorable

de este tipo de tipo de ensayos es el desconocimiento del estado completo de tensiones, el cual se puede determinar únicamente en los ensayos realizados en equipos donde exista el control de tensión lateral. A continuación se describen las distintas células edométricas utilizadas y se indican sus características más fundamentales.

2.3.1.1 Célula edométrica convencional

Como primer acercamiento al comportamiento de hinchamiento y colapso de las mezclas de pellets de bentonita se realizaron ensayos de mojado a carga constante. Para ello se utilizaron células edométricas convencionales (Figuras 2.16 y 2.17). Este tipo de dispositivo denominado edómetro de Terzaghi o Casagrande, consta de tres partes fundamentales: la parte inferior o base, el anillo portamuestras y la parte superior o cabezal. La base o parte inferior tiene en el centro una piedra porosa en la que apoya la muestra y a través de la cual se permite el acceso de agua a la muestra. Sobre la piedra porosa, se apoya el anillo portamuestras conteniendo la muestra de suelo y sobre esta, se apoya el cabezal cuya función es la de distribuir forma uniforme la carga vertical aplicada.

Para la aplicación de la carga vertical se coloca la célula en un edómetro de palanca. La carga se aplica a través de un brazo rígido, Figura 2.18, que apoya sobre el cabezal de la muestra mediante un marco metálico rígido. En el otro extremo del brazo se pueden colocar diferentes pesos para aplicar la carga. El brazo ofrece un efecto multiplicador de la carga pudiendo aplicar sobre la muestra valores de fuerza vertical máxima de entre 8000 y 10000 kN. Para una muestra de 50 mm de diámetro representa un valor de tensión vertical de aproximadamente 5 MPa. En éste tipo de células edométricas se pueden realizar únicamente ensayos de saturación por inundación y con control del volumen de agua ingresado en la muestra (variación del contenido de agua). La facilidad de montaje e interpretación de éste tipo de ensayos, hacen de él una herramienta de gran utilidad en la obtención de patrones generales de comportamiento del material.

2.3.1.2 Célula edométrica con control de succión

Dadas las características del material a estudiar: materiales con un gran potencial expansivo y con una succión inicial de entre 250 y 300 MPa, se diseñó y construyó una célula edométrica con control de la succión. Esta célula permite aplicar trayectorias de tensiones con control de la succión en rangos entre 300 MPa y saturación y aplicar una

carga vertical máxima de 5 MPa. La idea que motivo el diseño y construcción de éste equipo fue la de contar con un equipo versátil, preciso, robusto y de fácil manejo que permita aplicar trayectorias más complejas y de gran interés constitutivo.

Como base para el diseño de ésta célula edométrica se utilizaron los diseños previos de las células edométricas utilizadas por Balmacedas (1991), Yuk Gehling (1994), Romero (1999) y Di Mariano *et al.* (2000). La mayor innovación del equipo es la posibilidad de utilizar diferentes técnicas de control de succión de forma independiente o combinada en función del valor de la succión aplicada. Esto permite aplicar trayectorias de mojado partiendo de un valor de succión de 300 MPa hasta saturación en forma continua y sin necesidad de interrumpir el ensayo. El equipo dispone de dos cabezales de diferentes relaciones de área 1:1 y 2:1, que permite tener un efecto multiplicador de la presión de cámara. Con una presión de cámara ($p_{\text{cámara}}$) de 2.5 MPa se pueden aplicar valores de tensión vertical (σ_v) de hasta 5.0 MPa. El diseño y construcción de los equipos fue realizada y coordinada por la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) (Figuras 2.19 y 2.20).

Descripción de la célula edométrica

La célula edométrica construida se compone de cinco partes fundamentales: base, anillo porta muestras, cuerpo central, parte superior y marco rígido (Figura 2.21). La base del equipo esta formada de dos piezas: el plato y una base apoya muestras. En el plato se alojan las conexiones para válvulas de aire-agua y sirve de apoyo al marco rígido. Al centro de este se coloca la base apoya muestras, que es intercambiable dependiendo del tipo de ensayo y de la técnica de control de succión a utilizar. Existen tres tipos de base apoya muestra: base tipo I formada por un disco poroso metálico permeable y que se utiliza para los ensayos de mojado por inundación o cuando se utiliza la técnica transferencia de vapor. La base de tipo II, utilizada en la técnica de control de la succión por traslación de ejes y en la que se sustituye el disco metálico por un disco cerámico de alto valor de entrada de aire (AVEA). Por último, la base de tipo III o disco “mixto”, que posee en el centro un disco cerámico tipo AVEA y en forma concéntrica con este un disco metálico poros anular de las mismas características a las utilizadas en la base de tipo I. Este tipo de base permite utilizar de forma combinada las técnicas de traslación de ejes y la transferencia de vapor. La Figura 2.22 muestra el plato inferior un una base

de tipo I y las bases II y III. El anillo porta muestras permite realizar ensayos sobre muestras de 50 mm de diámetro y alturas variables entre 10 y 20 mm (Figura 2.23). El cuerpo central del equipo contiene al anillo porta muestras y aloja las conexiones para las válvulas de presión y circulación de aire. Estas conexiones permiten utilizar diferentes configuraciones en función de la técnica experimental utilizada, traslación de ejes o transferencia de vapor (Figura 2.24). La parte superior de la célula se compone de dos elementos: el cabezal de carga y el plato superior. El cabezal de carga apoya sobre la muestra de suelo y permite la aplicación de carga vertical de forma neumática. El plato superior o tapa, cierra y conecta la cámara de presión vertical con el sistema de presión de aire (Figura 2.25). Finalmente, el marco rígido cumple la función de dar apoyo al micrómetro o LVDT con el que se controlan las deformaciones verticales de la muestra (Figura 2.26).

Dispositivos auxiliares

La célula edométrica se puede conectar siguiendo diferentes configuraciones en función del tipo de ensayo y de la técnica experimental utilizada. Para cada una de las configuraciones posibles se utilizan una serie de dispositivos auxiliares.

En el caso de realizar ensayos de mojado por inundación o de utilizar un control de la succión mediante la técnica de traslación de ejes, se controla el volumen de agua entrante o saliente de la muestra. Para ello se utilizó una bureta graduada a la entrada del agua en la base de la célula. Dicha bureta tiene una resolución de 20mm^3 y se encuentra al interior de un tubo de metacrilato el cual está lleno con el agua de ensayo y un líquido de diferente color e inmiscible con esta (generalmente gasoil). Esto permite controlar el volumen de agua entrado o salido de la muestra midiendo la posición de la interfase de ambos líquidos al interior de la bureta graduada, configuración utilizada se muestra en la Figura 2.27. En el caso de utilizar control de succión mediante la técnica de transferencia de vapor, para establecer si el sistema a alcanzado el estado de equilibrio se tomaron en cuenta dos elementos: la velocidad de deformación vertical de la muestra y la variación de masa del recipiente que contiene la solución acuosa. Para realizar la medida de la deformación vertical se utilizó un micrómetro o bien un LVDT, Figura 2.26. En el caso de la medida del peso del recipiente con la solución acuosa se utilizó una balanza que permite medir con una precisión de ± 0.01 g. En los ensayos

donde se aplican trayectorias de mojado que requieren el control de la succión utilizando ambas técnicas. Primero la transferencia por vapor (250 a 3 MPa) y luego la traslación de ejes (3 MPa a saturación), el equipo utiliza las bases donde se apoya la muestra de tipo III (Figura 2.22). Las distintas configuraciones en las que se utilizó este equipo se muestran adelante en el Capítulo 3.

2.3.1.3 Célula de volumen constante con control de tensión vertical

El estudio de la condición de volumen constante en ensayos sobre las mezclas de pellets de bentonita resulta de gran utilidad debido a su similitud con las condiciones de emplazamiento del material. Para estudiar las características del comportamiento hidromecánico de las mezclas de pellets en condiciones de volumen constante y poder controlar tanto la succión como la evolución de la presión vertical, se diseñaron y construyeron células edométricas de volumen constante (Figura 2.28). Estos equipos permiten realizar de forma rápida y sistemática numerosos ensayos de presión de hinchamiento con control de succión, construir curvas de retención, realizar ensayos de permeabilidad a gradiente constante y otros ensayos aplicando diferentes condiciones de flujo. Las características y prestaciones de la célula se pueden resumir en:

- Se pueden realizar ensayos sobre muestras de 50 mm de diámetro y de alturas variables entre 10 a 20 mm.
- Dado su reducido tamaño, es posible realizar un control de la variación en el contenido de agua de la muestra por pesado (± 0.01 g).
- El control de la tensión vertical se realiza a partir de una pieza metálica a modo de roseta que bloquea el movimiento vertical del cabezal y que está instrumentada con galgas extensométricas (strain gages). Un esquema detallado de las rosetas así como la instrumentación y calibración de las mismas aparecen en la Figura 2.30. La calibración correspondiente se presenta en el ANEXO I.
- Se pueden realizar ensayos de mojado por inundación, ensayos con control de succión por transferencia de vapor y por traslación de ejes.

Descripción de la célula edométrica

Las células de volumen constante se componen de cinco partes fundamentales: base, anillo portamuestras, cuerpo central, cabezal y célula de carga. La base está constituida por una pieza metálica de forma circular que da apoyo al anillo portamuestras y donde se alojan las conexiones para la inyección de agua y circulación de aire. Existen dos tipos de base diferente (ver apartado 2.3.1.2): una base tipo I, en cuyo centro hay un disco metálico poroso y una base de tipo II, en cuyo centro se coloca una piedra cerámica de alto valor de entrada de aire (AVEA). Este tipo de bases permite controlar la succión aplicando la translación de ejes. Una vista detallada de cada una de las partes aparece en la Figura 2.29.

Dispositivos auxiliares

Existen diferentes configuraciones en las que se puede utilizar la célula edométrica anteriormente descrita. Dependiendo del tipo de ensayo a realizar y las variables a medir se utilizan diferentes equipos auxiliares que permiten medir y controlar la presión de hinchamiento vertical, la variación del contenido de agua de la muestra y la succión. La medida de la presión de hinchamiento vertical se realiza bloqueando el desplazamiento del cabezal que apoya sobre la muestra, utilizando una pieza metálica con forma de roseta e instrumentada mediante galgas extensométricas (Figuras 2.30 y 2.31).

En el caso de realizar ensayos de mojado por inundación o de controlar la succión utilizando la técnica de translación de ejes se mide la variación del contenido de agua en la muestra. Esta medida se realiza utilizando un medidor de volumen de bureta graduada como el descrito en la sección 2.2.1 (Figura 2.7). En los ensayos donde se utiliza un control de succión por transferencia de vapor, el cambio en el contenido de agua de la muestra se mide a partir del pesado de la célula utilizando una balanza electrónica con una sensibilidad de $\pm 0.01\text{g}$.

Calibración de la célula de carga para la medida de la tensión vertical

La célula de carga se construyó a partir de una pieza metálica que bloquea el desplazamiento vertical del cabezal. Esta pieza con forma de roseta está instrumentada con 1 galga extensométrica solidaria a uno de los brazos de la roseta en una configuración de 1/4 puente de Wheatstone. Esto permite medir la presión de

hinchamiento trabajando por flexión (Figura 2.31). Una vez instrumentadas se calibra la respuesta del sistema frente a ciclos de carga y descarga aplicados utilizando un edómetro de palanca como el presentado en la Figura 2.18. Durante el proceso de carga y descarga se mide la respuesta eléctrica de la galga extensométrica adherida a uno de los brazos de la roseta. La alimentación eléctrica del sistema, el filtro de señal y lectura se realiza utilizando un dispositivo Strain Indicator Box P-3500 de la marca Instrument Division (Figura 2.30). El dispositivo utilizado permite completar el circuito eléctrico, alimentarlo con una corriente continua de 2 V y medir su respuesta. En la calibración efectuada se obtuvieron constantes de proporcionalidad diferentes para trayectorias de carga y descarga. Las características de una de la célula de carga se presentan en la Tabla 2.2. La sensibilidad media de estas células fue de ± 0.5 kg, lo que para una muestra de 5 cm de diámetro representa una sensibilidad en el cambio de tensión vertical de ± 2.55 kPa. Las curvas de calibración obtenidas en cada caso se muestran en el ANEXO I. Las células de carga fueron utilizadas a lo largo de trayectorias monotónicas de mojado y secado y cada una de las curvas de calibración se utilizó en función de la trayectoria de tensiones aplicada (carga o descarga).

Tabla 2.2. Características fundamentales de la célula de carga utilizada para la medida de la presión de hinchamiento vertical en las células edométricas.

CARACTERÍSTICAS DE LA CÉLULA DE CARGA PARA EDÓMETRO (Presión de hinchamiento vertical)	
Fabricante	UPC
Rango	1500 kg
Alimentación	2 V
Sensibilidad	0.376 mV/kN
Factor de proporcionalidad en carga	$\pm 0.7\%$ F.S
No linealidad + histéresis en carga	$\pm 0.5\%$ F.S
Factor de proporcionalidad en descarga	$\pm 0.7\%$ F.S
No linealidad + histéresis en descarga	$\pm 0.5\%$ F.S
Rigidez	42.5 $\mu\text{m}/\text{MPa}$

2.3.1.4 Célula edométrica con control de tensión lateral

Diferentes células edométricas con control de tensión lateral han sido reportadas en la literatura por Habib *et al.* (1992), Habib & Karube (1993), Machado & Vilar (1997) y Romaero (1999) entre otros. En éste caso el diseño utilizado siguió las ideas utilizadas por Romero (1999). Romero utilizó un anillo edométrico con capacidad de restituir la condición de K_0 mediante imponer presión a un fluido hidráulico, alojado en el interior del anillo. En este caso, se utilizó un anillo de diseño similar de tipo semi-rígido y sin compensación ni restitución de la condición de K_0 . En las Figuras 2.32, 2.33 y 2.34 se muestra el equipo utilizado. La utilización de células edométricas con control de tensión lateral permite establecer el estado de tensiones en forma completa y determinar la trayectoria de tensiones seguida por la muestra. Se realizaron ensayos de mojado a volumen constante, donde se registro la evolución de la presión de hinchamiento así como la variación del contenido de agua en la muestra.

Descripción del equipo

La célula edométrica con control de tensión lateral tiene cuatro partes fundamentales: base, anillo instrumentado, cuerpo central y pistón de carga. La Figura 2.33 muestra las diferentes partes de la célula edométrica así como un detalle del anillo que permite el control de la tensión lateral. La base tiene por función dar apoyo al anillo y alojar las conexiones para la inyección de agua o flujo de aire. En el centro de la base hay una piedra porosa metálica sobre la cual apoya la muestra. Utilizando esta base es posible realizar ensayos de humedecimiento por inyección de agua y ensayos utilizando transferencia de vapor. Para compactar la muestra sin afectar ni dañar la base, se utilizó una base de iguales dimensiones que la primera pero totalmente maciza. Una vez finalizada la compactación se intercambian ambas bases.

El anillo edométrico tiene dimensiones de 70 mm de diámetro y 30 mm de altura (Figura 2.34). Mediante un sistema semi-rígido permite el control de la tensión lateral. Para que la posición de las galgas extensométricas que registran la deformación se corresponda con el tercio central de la muestra, estas deben tener alturas de entre 18 y 23mm. El anillo está instrumentado con 4 galgas, dos activas y dos de compensación, conectadas siguiendo un esquema de $\frac{1}{2}$ puente de Wheaston. Las galgas activas registran la deformación del anillo en posiciones opuestas y las dos galgas de

compensación se encuentran adheridas a la base del anillo y permiten hacer la compensación por temperatura. La Figura 2.34 presenta el esquema de conexión utilizado así como las dimensiones y características del anillo. El cuerpo central del edómetro permite alojar las conexiones que conectan el anillo con el exterior así como dar apoyo a la parte superior que contiene el pistón de carga.

Dispositivos auxiliares de ensayo

En la célula edométrica con control de tensión lateral se realizaron ensayos de mojado a volumen constante utilizando inyección de agua. Durante estos ensayos se controló el cambio en el contenido de agua de la muestra mediante un tubo de bureta graduada colocada a la entrada del agua en la base de la célula de acuerdo a lo descrito en la sección 2.2.1 (Figura 2.7).

La condición de volumen constante durante el ensayo se mantiene montando la célula edométrica en un edómetro de palanca especialmente acondicionado (Figura 2.35). Una vez apoyado el marco rígido del edómetro sobre el pistón de carga de la célula, se bloquea su desplazamiento vertical fijando la posición del brazo de palanca del edómetro. Para fijar el brazo se utilizó un célula de carga con una sensibilidad de $\pm 0.001\text{kPa}$ y con un sistema de ajuste por rosca que permite compensar la deformación del sistema asegurando la condición de volumen constante. La Figura 2.35 muestra el edómetro de palanca especialmente modificado y las relaciones de palanca de cada una de las piezas utilizadas. El montaje descrito permite controlar la condición de volumen constante y medir la presión vertical con sensibilidades de 0.01% y 0.03 kPa respectivamente.

Calibración del equipo

La calibración del anillo edométrico se realizó aplicando presión de aire sobre la cara interior del anillo para simular el efecto producido por el propio suelo. Se realizaron secuencias de carga-descarga y se midieron las constantes de proporcionalidad e histéresis. Las curvas de calibración obtenidas se presentan en el ANEXO I. El sistema de alimentación y lectura permite alimentar el puente de Wheaston formado por las galgas extensométricas del anillo con una corriente continua de 5V y la amplificación

de la señal da como resultado una sensibilidad sobre la lectura de la carga horizontal de +/- 3.33 kPa. Las características del anillo semirígido se presentan en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Características fundamentales de la célula de carga utilizada para la medida de la presión de hinchamiento vertical en las células edométricas.

CARACTERISTICAS DEL ANILLO SEMIRÍGIDO PARA EDÓMETRO (Control de la tensión lateral)	
Fabricante	UPC
Rango	2.5 MPa
Alimentación	5 V
Sensibilidad	0.35 mV/kPa
Factor de proporcionalidad	+/- 0.7% F.S
No linealidad + histéresis	+/- 0.5% F.S

2.3.2 Equipamiento para la determinación de las características hidráulicas

Para la determinación de las características del comportamiento hidráulico de las mezclas de pellets de bentonita en su condición saturada así como a lo largo del proceso de hidratación, se realizaron ensayos de permeabilidad con gradiente constante y ensayos de infiltración. En los ensayos de permeabilidad con gradiente constante se midió la permeabilidad saturada de las mezclas de pellets de bentonita al imponer un flujo a través de la muestra en condiciones de gradiente hidráulico constante. Para la realización de estos ensayos se utilizaron las células edométricas de volumen constante con control de la tensión vertical (apartado 2.3.1.3), utilizadas a modo de permeámetro. Los ensayos de infiltración se pueden asimilar a la inyección de agua en una muestra de pellets en condiciones de volumen constante. A diferencia de lo que sucede en los ensayos edométricos convencionales, donde las dimensiones de la muestra permiten asumir un mismo valor de la succión para todos los puntos de la muestra, en los ensayos de infiltración se utilizan muestras de dimensiones mayores. Muestras con tamaños de entre 50 y 75 mm en diámetro y de entre 50 y 100 mm de altura por lo que el contenido de agua y la succión varían a lo largo de la muestra durante el ensayo. El mayor tamaño de las muestras permite obtener resultados a una escala más cercana a la real y estudiar la evolución de los distintos parámetros hidráulicos a lo largo del proceso de hidratación. Como contraparte de su mayor representatividad, estos ensayos requieren de la utilización de algún código numérico y de la resolución del problema inverso para

su interpretación. A continuación se describen los dos tipos de células de infiltración utilizadas a lo largo del programa de ensayos.

2.3.2.1 Célula de infiltración con control de tensión vertical

Las células de infiltración con control de tensión vertical se utilizaron a lo largo de la primera parte del programa de ensayos de laboratorio y fueron de gran utilidad para lograr una caracterización general del material así como en la determinación de la mezcla óptima (ver apartado 1.3.1.2). En ellas se realizaron ensayos utilizaron muestras de diferente densidad seca, diferente granulometría y también se variaron el tipo de agua inyectada y la humedad inicial del material. Las condiciones de inyección agua se mantienen constantes.

Descripción del equipo

Las células de infiltración con control de tensión vertical se componen de tres partes fundamentales: base, cuerpo central y pistón de carga (Figura 2.36). La base está formada por una pieza circular que contiene las conexiones para la inyección de agua y donde apoya la muestra. En el centro tiene una piedra porosa metálica que permite distribuir la inyección de agua en forma uniforme. El cuerpo central está formado por un cilindro metálico con un diámetro interno de 50 mm y una altura de 100 mm pudiendo alojar muestras con alturas de entre 50 y 70 mm. El cuerpo central se une a la base a partir de tornillos que permiten desmontar la célula para extraer y analizar la muestra al finalizar el ensayo. En su parte superior se encuentra el pistón de carga cuyo diámetro de 50 mm cierra completamente la cámara que aloja la muestra. La estanqueidad se logra mediante tóricas colocadas en el fuste del pistón y en el contacto de la base y la camisa. Para permitir la salida del aire expulsado durante la inyección de agua, se conecta la cámara que contiene la muestra con el exterior mediante una perforación situada en el centro del pistón de carga. Para evitar el exceso de evapotranspiración a través de esta conexión se controló la humedad relativa.

Dispositivos auxiliares

En los ensayos de infiltración se midieron: el flujo de agua inyectado en la muestra y la evolución de la presión vertical. Para medir el volumen de agua inyectado en la muestra se utilizó una bureta graduada de características similares a las descritas en el apartado

2.2.2 (Figura 2.7). Para controlar la condición de volumen constante y medir la tensión vertical, se colocó la célula de infiltración en un edómetro de palanca siguiendo el esquema descrito en la sección 2.3.1.4 (Figura 2.35).

2.3.2.2 Célula de infiltración de volumen constante

Se diseñaron y construyeron células de infiltración de volumen constante que permiten ensayar muestras cilíndricas de 75 mm de diámetro y de 100 mm de altura. Esto minimiza los posibles efectos de escala en la granulometría del material. Al ser muestras de mayor tamaño, es posible utilizar todas las fracciones de material (≥ 15 mm), estudiar un material muy similar al utilizado en el emplazamiento a escala real.

Descripción del equipo

Las células de infiltración de volumen constante constan de tres partes: base, cuerpo central y parte superior las cuales aparecen en la Figura 2.37. La base y la parte superior son exactamente iguales y están compuestas por una pieza circular que aloja las conexiones para la inyección de agua. Al centro de cada una de las bases hay una piedra porosa metálica que permite distribuir uniformemente la inyección de agua. La parte central está formada por una pieza cilíndrica con un diámetro interno de 75 mm, unida por ambos extremos a la base y a la parte superior mediante un sistema de rosca. Las conexiones existentes en la parte superior permiten que el aire desplazado por el agua durante la inyección escape de la muestra durante el ensayo. Para evitar el exceso de evapotranspiración de la muestra en este punto del equipo, se mantiene en este punto, una condición de humedad relativa controlada (Figura 2.38).

Dispositivos auxiliares

Las células de infiltración de volumen constante se montaron en un dispositivo de ensayo que permite controlar y medir la inyección de agua así como aplicar diferentes condiciones en la presión de inyección. El dispositivo de control de la inyección está formado por dos partes fundamentales: un reservorio de agua y una balanza electrónica (Figura 2.39). El reservorio de agua tiene como funciones la de almacenar el agua de inyección y controlar la presión de agua durante el ensayo. Está constituido por un tubo de metacrilato de alta resistencia con un diámetro interno de 70 mm y un espesor de pared de 5 mm. A sus extremos tiene dos tapas metálicas con anillos de goma que

aseguran su estanquidad. La base metálica tiene una válvula de salida que permite controlar el acceso de agua en la muestra. Por su tapa está conectado a la línea de presión de aire.

El reservorio se llena con el agua de inyección hasta sus $\frac{3}{4}$ partes aproximadamente y el resto del volumen se completa con aire a presión. La presión de agua se controla utilizando los reguladores de la línea alta presión con la que se pueden aplicar presiones de hasta 1.5 MPa. La medida de la presión aplicada se realiza mediante una célula de presión con una sensibilidad de +/- 1 kPa. Mientras que para medir el volumen de agua inyectado, se pesa el reservorio utilizando una balanza electrónica con una sensibilidad de +/- 0.01 g. La balanza se conectó a un ordenador el cual almacena los datos para su posterior análisis.

2.3.3 Columna de infiltración

Con el objetivo de simular el comportamiento del material bajo acciones externas controladas y similares a las que se encontrarán en la realidad, se diseñó y construyó una columna de infiltración. La utilización de este tipo de ensayos para estudiar la respuesta del material en condiciones similares a las reales ha sido reportada en varios trabajos de investigación con similares características, (ENRESA, 2000; Rodríguez, 2002). En estos ensayos se minimizan los efectos de escala y es posible representar de forma más realista las condiciones *in situ*.

En el caso particular de las mezclas de pellets de bentonita, se diseñó y construyó un dispositivo de ensayo de mediana escala que permite ensayar muestras de 70 mm de diámetro y hasta 200 mm de altura. Este equipo permite conocer el estado de tensiones totales en la muestra de pellets a lo largo de todo el ensayo: preparación y compactación de la muestra y su posterior hidratación. Las prestaciones del equipo y las características de los ensayos se pueden describir como:

- Ensayo de infiltración a volumen constante.
- Se mide el estado de tensiones durante el ensayo. Medida de presión vertical y horizontal.

- Sistema de control para la inyección de agua. Capacidad de controlar tanto la presión de inyección como el volumen de agua inyectado por unidad de tiempo.
- Automatización de la instrumentación mediante un sistema de adquisición y almacenamiento de datos recogidos por los distintos sensores.
- Control de temperatura exterior asegurando las condiciones isotermas a lo largo de todo el ensayo.

A continuación se presenta la descripción de la columna de infiltración dividida en tres partes fundamentales: la columna propiamente dicha, el conjunto de sensores utilizados para medir y controlar la evolución de las diferentes variables y finalmente el sistema de adquisición y almacenamiento de datos. Adicionalmente se describe el proceso de calibración utilizado.

2.3.3.1 Descripción de la columna de infiltración

El equipo diseñado se compone de tres partes fundamentales: base, cuerpo central y tapa. En la Figura 1.42 se presenta una vista general de la columna de infiltración montada.

Base

La base del equipo esta formada por una placa circular y tres vástagos cilíndricos que hacen las veces de apoyo elevado de todo el sistema, Figura 2.40. La placa circular funciona como base para el cuerpo central y contiene el sistema de cierre y ajuste del equipo. La placa de base tiene en su centro un hueco circular que permite colocar el material durante la compactación, realizar las conexiones necesarias para la inyección de agua y medida de la presión de hinchamiento vertical. El cierre del hueco se realiza utilizando un sistema de tapa rosca. Esta tapa está formada por dos piezas: un anillo externo que rosca en la placa de base y al centro un tapón que cierra por presión sobre la muestra (Figura 2.41).

Cuerpo central

Sobre la base y coincidiendo axialmente con el eje de la placa circular se ubica el cuerpo central de la columna. Está formado por el un cilindro o camisa metálica que permite alojar la muestra y dos cabezales de cierre que confinan superior e

inferiormente la muestra (Figura 2.42). El cilindro tiene diámetros interior y exterior de 70 mm y 110 mm respectivamente y una altura de 300 mm. El sistema permite ensayar muestras de 70 mm de diámetro y de hasta 200 mm de altura. La camisa está preparada para alojar tres sensores de presión total, utilizados para registrar la evolución de la presión de hinchamiento horizontal. Los sensores se sitúan alineados sobre una de las directrices del cilindro. El primer sensor se ubica a una distancia de 140 mm de la parte superior de la camisa y la distancia entre sensores es de 32 mm. Un detalle de las distintas partes descritas se muestra en la Figura 2.43. Los cabezales permiten confinar la muestra por sus extremos y están formados por piezas cilíndricas metálicas. El diámetro de estas piezas coincide con el diámetro interno de la camisa y la estanqueidad de la muestra se asegura mediante 2 anillos de goma (tóricas). Las tóricas se encuentran colocadas en el contacto de cada uno de los cabezales con la pared interna de la camisa (Figura 2.43). El cabezal inferior está diseñado para la inyección de agua en la muestra y la medida de la presión vertical de hinchamiento. En su cara de contacto con la muestra posee una piedra porosa metálica de alta permeabilidad que distribuye uniformemente la inyección de agua. Mientras que en su cara de apoyo con la base aloja las conexiones para la inyección de agua y el apoyo de la célula de carga. El cabezal superior confina la muestra y permite la salida de aire expulsado por la inyección de agua durante el ensayo.

Parte superior

La parte superior está formada por la tapa y vástagos de confinamiento que cierran el dispositivo de ensayo. La tapa está formada por un plato circular que apoya sobre la camisa de la muestra y para asegurar la condición de volumen constante se utilizan tres vástagos cilíndricos que ajustan los platos superior e inferior (Figura 2.44). Uno de estos vástagos se utiliza como elemento de reacción para fijar los sensores de presión lateral alojados en la camisa. El detalle del ajuste y fijación de estos sensores se presenta en la Figura 2.45.

2.3.3.2 Sensores y sistema de inyección

El dispositivo de ensayo diseñado incluye una serie de sensores que permiten registrar la evolución de la presión de hinchamiento vertical, lateral y medir la variación del contenido de agua total de la muestra así como la presión de inyección.

Medida del estado de tensiones total, presión de hinchamiento

Para medir el estado de tensiones totales en la muestra se registró la evolución de la presión de hinchamiento vertical y horizontal. La medida de la presión de hinchamiento vertical se realizó a mediante una célula de carga con una capacidad de 10 kLb (5 kN) (Figura 2.46). Dicha célula de carga está ubicada en el apoyo del cabezal de inyección con el plato base de acuerdo con lo que se indica en la Figura 2.43. Las características fundamentales del sensor utilizado se presentan en la Tabla 2.4.

La medida de la presión de hinchamiento lateral se realizó utilizando sensores de presión total. Se emplearon tres sensores GSSensors del tipo XPM10, colocados a distintas distancias del cabezal de inyección sobre una misma directriz (Figura 2.47). Las especificaciones del sensor se muestran en la Tabla 2.5. Para ajustar el sensor a la camisa y lograr la estanqueidad de la unión, se fabricaron piezas metálicas que roscan sobre el cuerpo del sensor y ajustan sobre la camisa utilizando un anillo de goma (Figura 2.47-b y 2.47-c). Para fijar los sensores y evitar esfuerzos excéntricos que pudieran perjudicar el buen funcionamiento de los mismos, se utilizó un sistema de apoyos articulado con una esfera metálica que se muestra en la Figura 2.45.

Control de la presión de agua y volumen inyectado

El control de la presión y volumen de agua inyectado durante el ensayo se realizó utilizando un dispositivo de pistón y motor paso a paso de la marca GDS. En la Figura 2.48 se muestra un esquema del dispositivo utilizado. Este dispositivo permite controlar las condiciones de inyección de agua: control del volumen de agua inyectado por unidad de tiempo (mm^3/s) o bien control de la evolución de la presión de inyección. La sensibilidad del sistema es de $\pm 1 \text{ mm}^3$ para el control del volumen inyectado y de $\pm 1 \text{ kPa}$ para la presión. Las características fundamentales del sistema utilizado para el control de la succión se presentan en la Tabla 2.6.

Tabla 2.4. Características fundamentales del sensor utilizado para la medida de la presión de hinchamiento vertical.

CARACTERISTICAS DE LA CÉLULA DE CARGA (Presión de hinchamiento vertical)	
Fabricante	Sensotec
Modelo	LFH-71
Rango	10000 lbs (5 kN)
Alimentación	5 V
Precisión del fabricante	+/- 0.7% F.S
No linealidad + histéresis	+/- 0.5% F.S

Tabla 2.5. Características fundamentales del sensor utilizado para la medida de la presión lateral.

CARACTERISTICAS DE LA CÉLULA DE PRESIÓN TOTAL (Presión de hinchamiento lateral)	
Fabricante	GS Sensors
Modelo	XMR10
Rango	100 bar
Alimentación	10 V
Sensibilidad Fabricante	100 mV F. S. (60 mV for 1 bar)
No linealidad e histéresis	+/- 0.5% F.S

Tabla 2.6. Características fundamentales del dispositivo utilizado para el control de la inyección de agua.

CARACTERISTICAS DEL SISTEMA DE INYECCIÓN (Control de la inyección de agua)	
Fabricante	GDS
Modelo	ADVDPC (8 MPa)
Volumen del pistón	200 cm ³
Sensibilidad volumen	+/- 1 mm ³
Sensibilidad presión	+/- 1 kPa
Velocidad máxima en llenado	1000 pasos/s
Velocidad máxima en trayectorias	500 pasos/s (0.1 mm ³ /paso)

2.3.3.3 Sistema de adquisición, almacenamiento de datos

Para realizar la adquisición y el almacenamiento de datos se utilizaron dos sistemas independientes. Un sistema para registrar el volumen y presión de agua y otro sistema para registrar las presiones de hinchamiento. En ambos casos la adquisición de datos se realizó mediante tarjetas del tipo Nacional Instrument modelo AT-MIO-16XE50.

2.3.3.4 Calibración

Para verificar el buen funcionamiento del dispositivo de ensayo, calibrar los sensores utilizados y verificar la estanqueidad de la columna de infiltración, se realizaron varios montajes de prueba. En dichos montajes, se sustituyó la muestra de suelo por un cilindro metálico poroso de las mismas dimensiones que la muestra a ensayar y se llenaron sus poros con agua como fluido de presión. Se aplicaron ciclos de carga y descarga y se registró la respuesta de los distintos sensores. Para cada una de las calibraciones efectuadas en los sucesivos montajes se incrementa la presión de agua en ciclos de carga y descarga llegando a un valor máximo de 1.0 MPa. También se realizó una prueba de estanqueidad en la que se mantuvo la camisa llena de agua a una presión de 2.0 MPa durante 24 horas. Una vez finalizada cada calibración se retira el cilindro metálico y se prepara el dispositivo para la compactación y preparación de la muestra. A lo largo de las distintas calibraciones realizadas luego de cada montaje los sensores presentaron una proporcionalidad lineal frente a los incrementos de carga y una histéresis moderada. Las características de una de las calibraciones obtenidas se presentan junto con los resultados experimentales en el Capítulo 9.