

CAPÍTULO 3

EQUIPO EXPERIMENTAL

3.1 Introducción

En las últimas décadas varios investigadores han estudiado la importancia del grado de saturación y del succión en los suelos no saturados sobre los comportamientos ingenieriles (Fredlund & Morgenstern, 1977; Fredlund *et al.*, 1978; Alonso *et al.*, 1987; Wheeler & Karube, 1995; Wheeler, 1996). Los primeros resultados relacionados con los cambios de volumen, se analizaron bajo condiciones edométricas (Jennings & Burland, 1962; Fredlund & Morgenstern, 1976) o bajo condiciones isotrópicas (Bishop & Donald, 1961 y Matyas & Radhakrishna, 1968). En términos de las propiedades de resistencia se analizaron ensayos de corte directo (Escario, 1980). Más recientemente, la influencia de la succión sobre el comportamiento tensión–deformación en suelos no saturados ha sido examinada por Alonso *et al.* (1987); Delage *et al.* (1987); Wheeler & Sivakumar (1993); Cui & Delage (1996); estos estudios se centran en el uso de dos variables independientes de estado de tensión, es decir, tensión neta ($\sigma - u_a$) y succión matricial $s = (u_a - u_w)$, donde u_a y u_w son las presiones de aire y de agua de poros respectivamente; y σ es la tensión total.

En términos de relaciones constitutivas, el marco teórico propuesto por Alonso *et al.* (1987), representa una referencia para los modelos elastoplásticos en suelos no saturados. La formulación matemática del modelo fue realizada tres años después (Alonso *et al.* 1990) y ha sido posteriormente refinada por otros autores (Cui & Delage, 1996; Wheeler & Sivakumar, 1995; Wheeler, 1996). Todos estos estudios conciernen a suelos reconstituidos en laboratorio. Por ello cabe mencionar que la evaluación en laboratorio del comportamiento de los suelos no saturados ha tenido un importante desarrollo en las últimas décadas. Una gran cantidad de equipos utilizados para el estudio de los fenómenos de colapso e hinchamiento, así como para el estudio general del comportamiento de los suelos compactados se ha descrito en diversas referencias. La variedad de estos equipos es muy amplia, se han utilizado células edométricas y triaxiales convencionales modificados o nuevos diseños de estos equipos con control de succión. De forma análoga, los procedimientos de ensayos han variado de forma significativa, desde los aspectos relacionados con

las trayectorias de tensiones utilizadas hasta los relacionados con la instrumentación y el control. Por otro lado, los estudios sobre suelos como materiales de construcción han recibido menos atención (Geiser *et al.*, 1998; Stoicescu *et al.*, 1998; Tang *et al.*, 1998) aun cuando ellos se emplean como estructuras de tierra tales como terraplenes en presas, en rellenos, etc.

Esta investigación se enfoca principalmente en los comportamientos volumétricos (colapso, hinchamiento y retracción) y de rotura, bajo cambios de succión ($u_a - u_w$) y tensión neta ($\sigma - u_a$) en suelos fabricados por un proceso de compactación estática en condiciones isotropas. Para ello, uno de los equipos utilizados ha sido la célula edométrica con control de succión debido a la precisión en la determinación en los cambios de volumen (resolución en la deformación volumétrica 0.010 %). Para investigar el comportamiento volumétrico bajo condiciones isotropas se utilizaron dos equipos diferentes (mini-célula isotropa rígida y célula triaxial con control de succión). Estos equipos ofrecen una indudable ventaja en conocer el estado de tensiones sobre la muestra. Sin embargo, las medidas de los cambios de volumen generalmente sometidas a calibraciones y procedimientos indirectos que no ofrecen tan buena resolución y precisión comparándolos con los equipos edométricos, especialmente en la mini-célula isotropa donde la resolución de las deformaciones volumétricas no es tan buena. Para investigar el comportamiento de rotura de un suelo con una succión determinada, se utilizó una célula triaxial con control de succión con medidas locales de deformación axial y radial en el centro del espécimen y medidas globales en los cambios de volumen del suelo y contenidos de agua.

3.2 Sistemas de presión de aire y presión de agua

La presión de aire para el diafragma, pistón y presión de cámara fue aplicada por un sistema de aire a presión con reguladores de aire. Se dispuso de dos líneas de aire a presión, suministradas por dos compresores que trabajan independientemente: un compresor de baja presión (0.94 ± 0.06 MPa) y un segundo compresor de alta presión (4.0 MPa con un rango de trabajo usual de 2.8 ± 0.2 MPa). En el caso de caídas de tensión eléctrica o para el suministro de presiones altas, han sido conectados a la línea de presión de alta, tanques de nitrógeno seco de 20 MPa, dando un máximo de presión de trabajo de 5.0 MPa. En el caso de una falla eléctrica que afecte a los compresores y detectándose una presión menor o igual a 2.5 MPa, la válvula que conecta a la línea de nitrógeno es activada automáticamente.

La línea de presión pasa a través de un sistema de refrigeración para atrapar y quitar la condensación y suministrar aire seco a los reguladores. Se han usado dos tipos de reguladores de presión: Bellofram tipo 70 con alimentación hasta 1.8 MPa (rango de trabajo: 10 kPa hasta 0.9 MPa) y Fairchild modelo 10 con alimentación hasta 3.5 MPa (rango de trabajo: 25 kPa hasta 2.5 MPa). Este sistema permite mantener una presión constante en la muestra durante el ensayo. La combinación de los reguladores con transductores de presión permite el control de la presión con una resolución de 1 kPa.

El agua utilizada en los ensayos es inicialmente desaireada y desmineralizada con una conductividad eléctrica menor de 20 $\mu\text{S}/\text{cm}$, que proviene de un tanque conectado a una bomba de vacío. Cuando se desea controlar la presión de agua, se utiliza un elemento interfase, que consiste en una membrana de látex que divide una cámara en dos dominios de aire y de agua. De esta manera, la salida inferior del elemento interfase comunica una presión de líquido igual a la presión de aire, que es transmitida por la membrana en el interior de la cámara.

Los transductores de presión, con un rango operacional de 2.5 MPa, fueron usados para medir presiones de agua y de aire de poros, así como presiones de pistón y de confinamiento. Los transductores adquiridos con su certificado de calibración de fábrica, fueron verificados y comprobados con otro manómetro de referencia, que se verifica periódicamente con una presión de peso muerto. Los errores de no-linealidad y de histéresis dados por el fabricante están dentro de 0.1% FS (2 kPa); para verificar estos errores se realizaron ciclos de aumento y disminución de presión hasta 2.5 MPa, dando un error de no-linealidad de 0.09 % FS y de histéresis de 0.12 % FS. La típica sensibilidad está alrededor de $2 \text{ mV/V} \pm 3\%$ ($10 \pm 0.3 \text{ mV/MPa}$ a una excitación eléctrica de 10 Vdc).

3.3 Psicrómetro de transistor

El valor de la succión del agua en el suelo en equilibrio con un ambiente de aire húmedo, está ligado termodinámicamente al valor de la humedad relativa de dicho ambiente. La expresión que relaciona ambas magnitudes es la ley psicrométrica (Fredlund & Rahardjo, 1993):

$$h_r = e^{\frac{-M_w s p_w}{RT}} \quad (3.1)$$

donde:

h_r = Humedad relativa

M_w = Masa molecular del agua (18.016 kg/kmol)

ρ_w = Densidad del agua (998 kg/m³)

s = Succión total del agua

R = Constante universal de los gases (8.3143 J/ (mol K))

T = Temperatura

Por lo tanto, una medida de la humedad relativa del aire en contacto con el agua de los poros del suelo proporciona inmediatamente el valor de la succión total. La medida de la humedad relativa se realiza mediante la técnica psicrométrica, que consiste básicamente en obtener la diferencia de temperaturas entre un termómetro seco situado en el ambiente cuya humedad quiere medirse y un termómetro húmedo que está rodeado de agua evaporándose de forma continua, por ejemplo, mediante un filtro que se mantiene húmedo. El calor de vaporización hace que descienda la temperatura del termómetro húmedo en forma proporcional a la diferencia entre la presión de vapor en el ambiente y la presión de vapor en condiciones de saturación de éste (humedad del 100%).

El psicrómetro de transistor (tipo SMI: Dimos, 1991; Woodburn *et al.*, 1993) (Fig. 3.1) es un instrumento para medir la humedad relativa del aire dentro de un espacio confinado. Debido a la sensibilidad de los transistores a pequeños cambios de temperatura es posible medir humedades relativas sobre 90 %. Esto permite al psicrómetro de transistor ser usado para medir succiones de suelo dentro del intervalo de 0.5 MPa a 15 MPa (Mata *et al.*, 2002).

El Psicrómetro Transistor Soil Mechanics Instrumentation(SMI) consiste de tres partes:

- contenedor aislado térmicamente
- 12 sondas psicrométricas
- un milivoltímetro

La exactitud del instrumento depende del grado de control de temperatura durante todo el ensayo. Por esta razón, las sondas deben ser insertadas dentro de un contenedor aislado térmicamente. Esto asegura que las sondas y las muestras lleguen a estar y permanezcan a una temperatura constante durante el período de ensayo. Dado que las sondas son afectadas por cambios de temperatura, se obtiene una mayor exactitud y reproducibilidad si se controla la temperatura ambiente cerca de ± 0.5

°C. En las Figuras 3.2a, b se muestra la sonda y sus componentes. El transistor de bulbo húmedo que contiene en su extremo inferior un pequeño anillo de plástico que se llena con una gota de agua destilada de tamaño estándar. La columna de la sonda contiene un pequeño circuito adherido sobre el cual se encuentra montado el amplificador y otros componentes eléctricos ajustados para medir y amplificar la diferencia de temperatura entre el transistor húmedo y el seco. La cabeza de la sonda contiene un botón de ajuste del potenciómetro que se usa para fijar el cero después de alcanzar el equilibrio de la temperatura. Una conexión eléctrica que garantiza la energía necesaria para el funcionamiento de la sonda y a su vez del voltímetro. Este último tiene un visualizador con el que se puede leer directamente de -23 a $+1000$ mV. La parte inferior de la sonda normalmente está protegida con un contenedor pequeño de PVC que se usa para la calibración o un contenedor más largo de PVC que se usa para medir la succión de la muestra.

La calibración cuidadosa del psicrómetro de transistor consiste en determinar la relación entre los milivoltios de salida del transistor y un valor de succión total conocida que se lleva a cabo de acuerdo al procedimiento estándar adoptado por Dimos (1991). Esta relación se ve afectada por cambios en varios factores, los cuales fueron discutidos por Dimos en 1991 y Truong y Holden (1995), tales como temperatura, histéresis, cambio de calibración con el tiempo, período de equilibrio, forma y tamaño de la gota de agua. Las sondas fueron calibradas con diferentes soluciones estándar de cloruro de sodio preparadas para dar las diferentes humedades relativas señaladas en la Tabla 3.1. Inicialmente el psicrómetro es llevado a su equilibrio a succión cero con agua destilada ($\leq 3 \mu\text{S}/\text{cm}$), ajustando a un valor inicial la salida de voltaje. Después se toman lecturas con periodos de estabilización de una hora para incrementos de succión comenzando con soluciones salinas de 100 kPa a 10 MPa con una trayectoria monótonica para evitar histéresis en el resultado, en la Fig. 3.3 se muestran las curvas de calibración a temperatura controlada ($22 \pm 1^\circ\text{C}$) donde los valores de succión total se grafican contra voltajes. Los especímenes fueron ensayados bajo las mismas condiciones que las de calibración.

Tabla 3.1 Soluciones salinas estándar usadas para la calibración del psicrómetro transistor.

Succión total, Ψ (MPa)	Molalidad de NaCl, m (mol/kg)
0.10	0.0213
0.32	0.0679
1.00	0.2182
3.20	0.6890
10.00	2.0481

3.4 Célula triaxial automática (GDS instrument Ltd.)

En las Fig. 3.4 y 3.5 se presenta el esquema general del equipo que consiste de un gabinete donde es montada la célula triaxial, un controlador digital de presión–volumen y un arreglo de conexiones para el sistema de adquisición de datos. El sistema es capaz de controlar de forma automática variaciones de tensión o deformación, según sea la trayectoria del ensayo.

En la Fig. 3.6 se muestra un controlador digital de presión y volumen, el cual puede controlar e imponer una presión de agua, así como obtener los cambio de volumen de agua (agua desaireada y desmineralizada). Se requieren dos controladores, uno para controlar la presión y cambios de volumen de la cámara triaxial y el segundo controla la presión de cola en la muestra.

En la célula triaxial pueden realizarse ensayos en muestras con diámetro de 38, 50, 70 y 100 mm. La fuerza y el desplazamiento axial es aplicado a la base de la célula triaxial a través de un servomotor con un límite de recorrido de ± 100 mm. La fuerza axial es medida con una célula de carga interna sumergible de 2 kN o 10 kN, colocada en la parte superior de la célula. La exactitud y control de las medidas de la fuerza axial es del 0.1 % FS.

La resolución de las medidas y control del desplazamiento axial es de 1 μm . El equipo fue utilizado para realizar un programa de ensayos en muestras saturadas, en el Capítulo 4 se presentan las trayectorias tensionales realizadas y los resultados obtenidos.

3.5 Desarrollo de una célula edométrica con control de succión

3.5.1 Edómetro convencional

Los edómetros convencionales fueron utilizados para realizar un programa de ensayos con el objetivo de determinar, bajo diferentes cargas verticales, la deformación de colapso por inundación del suelo compactado en condiciones isótropas, bajo diferentes condiciones de humedad y densidad (Barrera *et al.* 1998).

Los edómetros empleados pertenecen al tipo desarrollado por Terzaghi y Casagrande, utilizados normalmente para ensayos de consolidación unidimensional. La muestra de suelo queda confinada dentro de un anillo rígido limitado por encima y por debajo por piedras porosas que permiten el

desarrollo de un flujo libre de agua hacia una cámara exterior. La presión se aplica sobre la piedra superior por medio de un pistón y un marco de carga, accionado mediante un sistema de palanca. Las presiones se aplican por medio de pesas que se colocan en el plato que cuelga del brazo de palanca. Este tipo de edómetro se conoce también como edómetro de tensión controlada ya que se aplican presiones y se registran las deformaciones resultantes. Tiene el inconveniente de que no se puede controlar la evolución de la succión.

3.5.2 Desarrollo de la nueva célula edométrica con control de succión

3.5.2.1 Descripción del nuevo edómetro con control de succión

El edómetro neumático con control de succión fue diseñado y construido en los laboratorios de Geotecnia de la U.P.C. (Universidad Politécnica de Cataluña).

El edómetro neumático está basado en el diseño de los edómetros con control de succión utilizados por Balmaceda (1991), Yuk Gehling (1994) y Romero (1999). El nuevo edómetro permite ejecutar ensayos edométricos sobre muestras de suelo no saturadas controlando la succión matricial o total durante todo el ensayo. La succión matricial esta controlada mediante la aplicación de la técnica de traslación de ejes y la succión total con la técnica de equilibrio de vapor.

3.5.2.1.1 Descripción de la célula edométrica

El edómetro, consta principalmente de cuatro cuerpos: base, anillo edométrico, cuerpo intermedio y cuerpo superior (Fig. 3.7). En las uniones entre las distintas partes del aparato se utilizan juntas tóricas para asegurar un cierre estanco.

El cuerpo inferior (base) esta diseñado para acoplar dos sistemas de pedestales que alojan piedras porosas para realizar ensayos con succión controlada (identificada con el no. 1 en la Fig. 3.10):

1. Con el primer diseño de pedestal se controla la succión matricial con el método de traslación de ejes, el pedestal tiene un diámetro de 56 mm, donde se aloja un disco cerámico (AVEA) de 1.5 MPa con un diámetro de 50 mm y 7.15 mm de altura (Fig. 3.8a).
2. El segundo sistema, se emplea para controlar una succión total (Ψ) con la técnica de equilibrado de vapor o controlar la succión matricial con la técnica de traslación de ejes, ya que la muestra descansa sobre una combinación de dos piedras porosas alojadas en el

pedestal: un disco cerámico de alto valor de entrada de aire (1.5 MPa), con diámetro de 36 mm y altura de 7.15 mm, y una segunda piedra porosa anular muy permeable concéntrica con el disco cerámico, cuyo diámetro interior y exterior son de 41 mm y 51 mm, respectivamente (Fig. 3.8b).

En el presente trabajo, se investigó el efecto de la variación de la succión matricial sobre la deformabilidad del suelo. El segundo sistema de pedestal diseñado (Fig. 3.8b) se empleó para determinar la deformación de colapso disminuyendo la succión matricial hasta lograr grados de saturación del 100 %. En este caso se utilizó la piedra porosa anular para inundar la muestra.

En ambos sistemas, el pedestal presenta dos orificios (Fig. 3.8c) en su parte superior conectados por un canal en forma de espiral de 3 mm de profundidad. La razón por la que se ha adoptado una doble entrada de presión de agua, es para crear un flujo de agua a presión en cada uno de los conductos, que permita eliminar las burbujas de aire disueltas, como consecuencia de la aplicación de la técnica de traslación de ejes durante el ensayo (números 2 y 3 en la Figura 3.10).

Se ha tomado especial cuidado en la instalación del disco cerámico (AVEA) en el pedestal. El disco ($\phi = 50$ mm, $h = 7.15$ mm ó 36 mm, $h = 7.15$ mm) fue sellado en el pedestal usando una resina especial en su perímetro, previamente limpiado con tricloroetileno para quitar la grasa del metal y del disco cerámico. Esta resina es resistente al agua así como a temperaturas de hasta 120 °C. Una vez que el disco cerámico es sellado se introduce en un horno a 50 °C, durante 2 horas, con la finalidad de eliminar las burbujas de aire atrapadas en el sello (Fig. 3.8).

Este disco cerámico (no. 11, Fig. 3.10) se comunica por la cara inferior con un sistema de presión de agua regulada mediante un sistema interfase (no. 3, Fig. 3.10) y por la cara superior al sistema de presión de aire (no. 6, Fig. 3.10). La diferencia entre la presión del aire y la presión de agua mencionadas es la succión matricial aplicada a la muestra ($u_a - u_w$).

Sobre el disco cerámico de alto valor de entrada de aire (AVEA) se encuentra la muestra, confinada en un anillo de acero inoxidable de 50 mm de diámetro interior, 65 mm de diámetro exterior y 20 mm de altura, que se aloja en el cuerpo central (no. 4, Fig. 3.10). Este anillo de acero se apoya sobre una junta tórica para asegurar la estanqueidad del conjunto. El cuerpo superior se une al cuerpo central con 4 tornillos M 10x30 y al cuerpo inferior con otros 4 tornillos M 10x30 (Fig. 3.7). Entre

el cuerpo superior y el cuerpo central ajustan una membrana de goma impermeable de 1 mm de espesor (Fig. 3.7 y no. 5, Fig. 3.10), formando una cámara que contiene aire a presión. Este sistema nos permite aplicar la presión en la muestra por medio de un pistón de bronce, donde en su parte inferior se coloca un filtro de bronce de alta permeabilidad (diámetro de poros 85 μm) del mismo diámetro de la muestra, cuya función es repartir uniformemente la presión aplicada sobre toda la muestra y aplicar la presión de aire de poros (u_a) (no. 12, Fig. 3.10).

Una de las ventajas de este edómetro, es la combinación de dos pistones diferentes. Uno permite aplicar a la muestra una presión vertical neta igual a la diferencia entre la presión del pistón y la presión de aire en la muestra (u_a). El segundo pistón tiene por objetivo aplicar la presión vertical neta hasta el doble de la presión máxima del sistema de aire comprimido empleado (números 7 y 8, Fig. 3.10).

En un marco de acero inoxidable, unido en la parte inferior (base) del edómetro, se coloca un micrómetro mecánico con una resolución de 2 μm para medir los cambios de altura que experimenta la muestra durante el proceso del ensayo (Fig. 3.10). Para calibrar el edómetro, se colocó en lugar de la probeta de suelo, un cilindro de acero con las mismas dimensiones de la probeta de suelo, y se midieron las deformaciones correspondientes a las mismas trayectorias de tensiones realizadas en el programa de ensayos. El cilindro de acero se considera indeformable, con estas cargas de trabajo, y las deformaciones registradas se deben exclusivamente al aparato.

3.5.2.1.2 Equipos complementarios

Las variaciones del volumen de agua intersticial son medidas con una bureta graduada (resolución de 20 mm^3) ubicado en el interior de un cilindro de metacrilato de 30 mm de diámetro interior y 680 mm de longitud. La parte inferior de ambos cilindros concéntricos están llenos de agua mientras que la parte superior con un gasoil de un color claramente diferenciado y una densidad más baja que el agua, asegurándose la inmiscibilidad (Fig. 3.9). El menisco formado por los dos líquidos se desplaza dentro de la bureta, el cual nos indica la cantidad de agua que entra o sale de la muestra, por consiguiente, nos permite determinar los cambios de humedad y el tiempo de equilibrio entre las presiones intersticiales de aire y agua. En el circuito del medidor de volumen de agua intersticial, está conectado un interceptor de burbujas de aire (IBA), funcionando como trampa de

aire, si el flujo de agua contiene una burbuja de aire, al llegar al IBA tiende a quedarse en la parte superior de la cámara (Fig. 3.9).

El agua desairada viene presurizada a través de un sistema interfase (Fig. 3.9). La interfase es un elemento que recibe por una de las entradas una presión de aire determinada convirtiéndose como salida la misma presión de un fluido. Esta interfase consiste de una cámara cilíndrica de 200 mm de longitud de acero inoxidable. Una membrana de látex ajustada a la cara superior divide la cámara en dos dominios aire y agua, de esta manera, la salida inferior del elemento interfase comunica una presión de líquido igual a la presión de aire, que es transmitida por la membrana en el interior de la cámara. En el Anexo A, se describe la metodología de los pasos previos al ensayo, preparación de la muestra, montaje, metodología del ensayo y desmontaje de la muestra al finalizar el ensayo.

3.5.3 Calibración mecánica: deformación de la célula edométrica

Se ha tenido especial cuidado en calibrar la carga vertical y medir las deformaciones intrínsecas del edómetro bajo incrementos de tensión vertical neta. Los resultados de la deformabilidad de la estructura de la célula edométrica bajo incrementos y decrementos de tensión vertical neta se presentan en la Fig. 3.11. La muestra ha sido sustituida por un cilindro de acero de 20 mm de altura y 1 mm menos que el diámetro del anillo. Los ciclos de calibración se realizaron bajo una presión de aire constante de $u_a = 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0$ MPa. Un primer ciclo carga–descarga fue aplicada para eliminar el asentamiento inicial en el contacto entre el pistón de carga (filtro poroso) y cilindro de acero, cilindro de acero y disco cerámico saturado. Las deformaciones se asocian principalmente con errores de asentamiento debido a los acoplamientos entre los diferentes elementos indicados previamente. Los errores de acoplamiento por irregularidades en la superficie de las interfases entre la muestra y la superficie de carga podrían no ser directamente determinadas por el procedimiento de calibración, sin embargo se espera que estos errores sean relativamente pequeños debido a la técnica de preparación de la muestra (donde las superficies son cortadas horizontalmente). Las deformaciones del equipo en trayectorias de humedecimiento–secado son despreciables, ya que se realizan a una tensión vertical neta y presión de aire constante. Los desplazamientos totales medidos para una trayectoria de carga o descarga bajo succión matricial constante son corregidos restando los valores correspondientes de calibrado para un mismo aumento o decremento de la tensión vertical neta de acuerdo a la expresión presentada en la Fig. 3.11.

La presión vertical neta calculada $(\sigma_v - u_a)_c$ ejercida por pistón con el diafragma puede teóricamente ser determinada considerando el equilibrio con la siguiente expresión (de acuerdo al esquema de la Fig. 3.12).

La ecuación empleando el pistón de presión vertical para presiones altas es:

$$(\sigma_v - u_a)_c = \frac{(A_p - A_r)\sigma_v - A_p u_a}{A_a} \quad (3.2)$$

La ecuación de equilibrio empleando el pistón de presión vertical para presiones bajas es:

$$(\sigma_v - u_a)_c = \frac{(A_p - A_r)\sigma_v - A_a u_a}{A_a} \quad (3.3)$$

Donde σ_v es la presión vertical sobre el diafragma y u_a la presión de aire en el suelo. A_p es el área del pistón de carga ($\phi = 71.0$ mm pistón de presión alta, $\phi = 49.8$ mm pistón de presión baja), A_r área del eje del pistón ($\phi = 4.0$ mm), A_a área del suministro de la presión de aire ($\phi = 49.8$ mm). El pistón aplica la carga sobre un filtro de bronce con una área A_a en contacto con la muestra de suelo ($\phi = 49.8$ mm). La calibración de la carga transmitida por el diafragma y el pistón, ha sido calculada de acuerdo al esquema de la Fig. 3.12.

De la curva de calibración de la Fig. 3.11 y tomando el criterio de la presión vertical neta transmitida sobre la muestra (Fig. 3.12), es conocida la deformación real de la muestra bajo trayectorias de tensión vertical neta.

3.5.4 Efecto de envejecimiento sobre la permeabilidad al agua en los discos cerámicos (AVEA)

Para obtener valores de permeabilidad del suelo bajo diferentes condiciones de succión, es fundamental conocer las características del disco cerámico de alto valor de entrada de aire (AVEA) para poder asignar la adecuada permeabilidad del disco correspondiente para los diferentes ensayos. Por ello, se midieron periódicamente los coeficientes de permeabilidad de los discos cerámicos saturados (valor de entrada de aire de 1.5 MPa) de los equipos edométricos, mini-célula isotropa rígida y célula triaxial.

El procedimiento para determinar la permeabilidad de los discos cerámicos, primeramente consistió en inundar con agua desmineralizada y desaireada la cámara de aire de la célula Edométrica, la cual fue forzada a cruzar el disco cerámico a diferentes presiones de 3.0, 2.0 y 1.5 MPa, resultando una carga piezométrica de $\delta h = 300, 200$ y 150 m calculado con un peso unitario del agua de 10 kN/m^3 . En el caso de la mini-célula isótropa rígida la cámara de confinamiento fue llenada de agua desmineralizada y desaireada, donde también fue forzada a cruzar el disco cerámico a diferentes presiones de 2.2 y 1.5 MPa ($\delta h = 220$ y 150 m). En la Fig. 3.14 se observan los accesorios especiales para lograr la saturación de los discos cerámicos del cabezal y pedestal del equipo triaxial y así obtener su permeabilidad (k_d). De igual manera que en el edómetro y en la mini-célula isótropa, el agua fue forzada a cruzar el disco cerámico a diferentes presiones 2.8, 1.5, 1.2 y 1.0 MPa resultando una carga piezométrica de $\delta h = 280, 150, 120$ y 100 m. El volumen de agua que fluye a través del disco cerámico (espesor: $\delta z = 7.15 \pm 0.05 \text{ mm}$) debido al gradiente, es medido usando unos indicadores de cambio de volumen de agua. Esta medida de volumen V_m es dibujada contra lapsos de tiempo, en la Fig. 3.13 (célula edométrica), Fig. 3.15 (mini-célula isótropa rígida) y en la Fig. 3.16 (célula triaxial). El coeficiente de permeabilidad k_d es determinado por la siguiente expresión:

$$k_d = \frac{\Delta V_m \delta z}{\Delta t \delta h A} \quad (3.4)$$

Donde ΔV_m es el volumen de agua medido que cruza el disco cerámico en una área de sección transversal A (diámetro del disco: 50 mm (edómetro), 10 mm (mini-célula), 24 mm (célula triaxial)) durante un incremento de tiempo Δt . En la Fig. 3.13 se muestra la evolución de la permeabilidad con el tiempo del disco cerámico de la célula edométrica con una permeabilidad inicial de $6.7 \times 10^{-11} \text{ m/s}$ hasta $5.4 \times 10^{-11} \text{ m/s}$. La Fig. 3.15 muestra la pérdida de la permeabilidad del disco cerámico con el tiempo de la mini-célula isótropa rígida con una permeabilidad inicial de $1.1 \times 10^{-10} \text{ m/s}$ hasta $4.1 \times 10^{-11} \text{ m/s}$ y en la Fig. 3.16 se muestran los resultados de la evolución de la permeabilidad tanto del cabezal como del pedestal de la célula triaxial con valores iniciales de $1.2 \times 10^{-10} \text{ m/s}$ (cabezal) y $8.5 \times 10^{-11} \text{ m/s}$ (pedestal).

Se observó para los diferentes discos cerámicos en contacto con el suelo que el progresivo efecto de envejecimiento decrece la porosidad del disco y por consecuencia su permeabilidad intrínseca. Los discos cerámicos contienen diferentes proporciones de caolín, alúmina, talco y materiales feldespáticos: $56\% \text{ SiO}_2$, $15\% \text{ Al}_2\text{O}_3$, $12\% \text{ MgO}$ y pequeñas cantidades de Fe_2O_3 , CaO , TiO_2 , K_2O

y Na₂O, según especificaciones del fabricante (Soilmoisture Equipment Corp Specifications). Los cambios de porosidad pueden deberse a la oclusión de la cerámica por migración de coloides o efectos de intercambio catiónico a través del agua. Los discos cerámicos tanto del cabezal como del pedestal de la cámara triaxial, se reemplazaron al final de los ensayos isótropos y antes de comenzar el programa de ensayos triaxiales (Fig. 3.16). Los discos cerámicos de la célula edométrica y la mini-célula isótropa se reemplazaron antes de comenzar los programas de ensayos.

3.5.5 Determinación de la permeabilidad no saturada

Durante cada ensayo edométrico, la permeabilidad al agua fue determinada. En las trayectorias de humedecimiento (C→D, Fig. 5.2–5.5), en cada una de las etapas se midió el flujo transitorio de agua con el tiempo. Los resultados fueron interpretados con una ecuación modificada de Richards (Kunze & Kirkham, 1962; Romero *et al.*, 2000) por lo que ha sido posible estimar la variación de la permeabilidad al agua del suelo en estudio en función del grado de saturación (Sr). La cantidad unidimensional del agua en régimen transitorio se expresa en el caso de un suelo no saturado por la ecuación de Richards (1931) (Vicol, 1990; Romero, 1999):

$$\frac{\partial(\rho_w \theta)}{\partial t} = -\frac{\partial(\rho_w q_w)}{\partial z} + r; \quad q_w = -k_w(h_w) \left(\frac{\partial h_w}{\partial z} + 1 \right) \quad (3.5)$$

en el caso donde $\rho_w = \text{constante}$, se obtiene:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = C(h_w) \frac{\partial h_w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[k_w(h_w) \left(\frac{\partial h_w}{\partial z} + 1 \right) \right] + \frac{r}{\rho_w} \quad (3.6)$$

en donde θ representa el contenido volumétrico de agua ($\theta = n Sr = G_s w / (1+e)$), t el tiempo, z la cota geométrica del punto genérico (tomada como positiva si se encuentra por encima del plano de referencia), q_w es el flujo de agua volumétrico [LT^{-1}], r es el término fuente / sumidero [$ML^{-3}T^{-1}$] ($r = 0$ para los siguientes análisis), h_w altura asociada a la presión del agua intersticial dada como $h_w = u_w/\gamma_w$ [L], siendo $k(h_w)$ la permeabilidad no saturada [LT^{-1}], y $C(h_w) = d\theta/dh_w$, la derivada de la curva de retención [L^{-1}]. El potencial gravitacional puede considerarse despreciado para este estudio dado el pequeño espesor de la muestra. Además de que se simplifica la ecuación anterior a una ecuación de difusión. Introduciendo D_w que representa la difusividad capilar [L^2T^{-1}] (Gardner, 1956):

$$D_w(h_w) = k_w(h_w) \frac{\partial h_w}{\partial \theta} \quad (3.7)$$

la ecuación de la continuidad del agua se convierte a

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = C(h_w) \frac{\partial h_w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[D_w(h_w) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right] \quad (3.8)$$

Si se asume una relación lineal entre el contenido de agua volumétrico y el potencial matricial, lo cual es válido para pequeños incrementos/decrementos de presión de agua y que D_w es constante resulta la siguiente expresión:

$$\frac{\partial h_w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[D_w(h_w) \frac{\partial h_w}{\partial z} \right] = D_w \frac{\partial^2 h_w}{\partial z^2} \quad (3.9)$$

Para facilitar la determinación de la permeabilidad no saturada se asume que k_w (o difusividad D_w) se mantiene constante para pequeños cambios en la presión de agua (Romero, 1999).

Las condiciones iniciales y de frontera en ensayos edométricos con cambio de succión, controlando el flujo de salida o el flujo de entrada puede expresarse matemáticamente como:

$$\begin{aligned} h_w(z, t) &= h_{w0} && \text{para} && t = 0 \text{ y } 0 \leq z \leq L \\ h_w(z, t) &= h_{w0} + \Delta h_w && \text{para} && t > 0 \text{ y } z = 0 \\ \left. \frac{\partial h_w}{\partial z} \right|_{z=L} &= 0 && \text{para} && t > 0 \text{ y } z = L \end{aligned}$$

donde L es la altura de la muestra. El plano de referencia $z = 0$ se considera coincidente con la base inferior de la muestra. La condición inicial corresponde una condición de equilibrio a través de la muestra. Durante el ensayo edométrico el frente de avance del agua viene de abajo hacia arriba, esto significa que no se permite ningún flujo de agua de la parte superior de la muestra (velocidad del agua nula para $z = L$).

Gardner (1956) y Vicol (1990) han integrado la ecuación de la cantidad de agua en función de la variación del volumen de agua intersticial al tiempo t , $Q(t)$:

$$\frac{Q(t)}{Q_0} = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{(2m+1)^2} \exp \left[- (2m+1)^2 \pi^2 \frac{D_w t}{4L^2} \right] \quad (3.10)$$

Q_0 representa la variación total del volumen de agua intersticial correspondiente al intervalo de variación de la succión. Miller y Elrick (1958) y Kunze y Kirkham (1962) modificaron la ecuación anterior para tener en cuenta la impedancia del disco cerámico.

$$\frac{Q(t)}{Q_0} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \exp(-\alpha_n^2 D_w t / L^2)}{\alpha_n^2 (a + \csc^2 \alpha_n)} \quad (3.11)$$

Esta es la expresión utilizada para analizar los datos experimentales. Donde Q_0 representa la variación total del volumen de agua intersticial correspondiente al intervalo de variación de la presión de agua, $Q(t)$ la variación del volumen de agua al tiempo t , a es la relación de impedancia del disco cerámico a la impedancia del suelo.

$$a = \frac{k_w L_p}{L k_p}$$

(L_p es el espesor del disco cerámico y k_p su permeabilidad) y α_n la n -ésima solución de la ecuación: $a \alpha_n = \cot \alpha_n$ ($n = 1, 2, \dots$). Para resolver la ecuación (3.11) se introduce una nueva condición de contorno

$$k_w \left. \frac{\partial h_w}{\partial z} \right|_{z=0} = \frac{[h_{w0} + \Delta h_w - h_w(0, t)] k_p}{L_p} \quad \text{para} \quad t > 0 \text{ y } z = 0$$

La ecuación utilizada para determinar la permeabilidad no saturada se basa en las siguientes hipótesis simplificadas:

- El esqueleto del suelo se considera rígido.
- El Flujo de agua se considera unidimensional e isotérmico.
- El líquido es incompresible.
- El Potencial gravitatorio igual a cero.
- D_w constante.

En la Fig. 3.17, se muestra la variación de la permeabilidad no saturada (k_w) en función de grado de saturación (S_r), y se observa que la permeabilidad no saturada (k_w) aumenta con el grado de saturación y disminuye progresivamente al aumentar la carga vertical neta ($\sigma_v - u_a$) aplicada sobre la muestra.

3.6 Mini – célula isótropa rígida con control de succión

3.6.1 Diagrama general. Modificaciones para ensayos isótropos

La mini-célula isótropa rígida con control de succión se diseñó y construyó en el laboratorio de Geotecnia de la ETSECCPB. En la Fig. 3.20, se presenta dicho equipo, la célula fue descrita por Cruz (1996) y Romero (1999). El diseño de la célula isótropa cumple con dos características principales:

- Con las reducidas dimensiones de las probetas, que son de geometría cilíndrica, con un diámetro de 20 mm y una altura de 20 mm se logra disminuir el tiempo de estabilización de las presiones de aire y agua en el interior de la muestra (Fig. 3.19).
- La segunda característica, tal como su nombre lo indica, la muestra es sometida a un estado tensional isótropo. La muestra se apoya sobre una base quedando las caras laterales y superior libres en contacto con el agua de confinamiento, a través de una membrana de látex que comunica la misma presión en todas direcciones.

Utilizando la técnica de traslación de ejes, las presiones de aire y agua son impuestas en el pedestal del espécimen. La presión de agua es controlada en el centro de la probeta por un disco cerámico de alto valor de entrada de aire (1.5 MPa) y 10 mm de diámetro. La presión de aire es aplicada a través de una segunda piedra porosa anular de acero inoxidable concéntrica con el disco cerámico (20 mm diámetro exterior y 15 mm diámetro interior) de 3 mm de espesor. Las medidas de la deformación volumétrica del espécimen, se realizan controlando los cambios de volumen de agua en la cámara de la célula. Las paredes de esta cámara presentan un grosor de 29 mm en acero inoxidable, con el objetivo de minimizar posibles deformaciones del equipo, de manera que las deformaciones registradas correspondan realmente a la muestra (Fig. 3.19). Dos aparatos medidores de cambios de volumen (bureta calibrada con un rango de $5.0 \times 10^3 \text{ mm}^3$ y una resolución de 10 mm^3) son usados para medir cambios de volumen de agua intersticial y cambios de volumen total del espécimen. En la Fig. 3.20 se presenta un esquema de la mini-célula isótropa rígida. Este equipo presenta una baja resolución volumétrica alrededor de 0.3 %, debido a lo reducido de las dimensiones de la muestra. También pequeñas variaciones de temperatura pueden afectar las medidas de deformación (alrededor de $20 \text{ mm}^3/\text{°C}$) debido a la dilatación térmica del agua contenida en la cámara de confinamiento de $54.5 \times 10^3 \text{ mm}^3$. En el Anexo B, se describe con más detalle la mini-célula isótropa rígida, equipos auxiliares, preparación de la muestra, montaje y desmontaje de la muestra.

3.6.2 Variación de tensiones y control de las trayectorias tensionales

La variación y control de las trayectorias de tensiones sobre la muestra se controlaron por medio de un motor de corriente continua y un reductor mecánico (Fig. 3.20). Las tres presiones generadas que afectan al estado tensional de la muestra son: presión de confinamiento (p), presión de aire (u_a) y presión de agua (u_w), de acuerdo con las tensiones efectivas definidas en el Capítulo 2, estos parámetros tensionales se puede reducir a cualquiera de las dos parejas de tensiones allí indicadas ($\sigma_m - u_a$, $u_a - u_w$). En los ensayos la presión de aire (u_a) se mantuvo siempre fija sin limitar las trayectorias tensionales posibles en el espacio (p , s). Con u_a constante, sólo es necesario utilizar para controlar p y u_w un equipo de variación continua a velocidad constante, lo cual representó una simplificación de interés. Con este sistema se pueden imponer un rango muy amplio de velocidades, para estos ensayos se emplearon las siguientes velocidades según las trayectoria realizada Tabla 3.2. De esta manera se aumentó o disminuyó de forma continua y constante la presión de cámara de confinamiento a succión constante. En trayectorias de cambio de succión matricial con presión de confinamiento constante, la presión de agua (u_w) también se hizo variar de forma continua y constante con el motor reductor. En el Anexo B se describe las características del motor reductor y su aplicación.

Tabla 3.2 Velocidades utilizadas para el incremento de presión (mini-célula isótropa).

Trayectoria	Incremento de presión (MPa/día)
carga	0.04
descarga	0.10
humedecimiento	0.02
secado	0.02

3.7 Célula triaxial con control de succión

3.7.1 Descripción del equipo

Este equipo novedoso que permite realizar complejas trayectorias controlando independientemente las tensiones netas y la succión matricial ha sido construido de acuerdo al esquema mostrado en la Fig. 3.21a y 3.21b (Romero *et al.*, 1997; Romero, 1999; Barrera *et al.*, 2000). La célula triaxial hidráulica con control de succión fue diseñada y construida en el laboratorio de Geotecnia de la U.P.C. (Universidad Politécnica de Cataluña).

El diseño básico de la célula triaxial fue basado en el equipo triaxial hidráulico de Bishop y Wesley (1975), donde las trayectorias de tensión son controladas con movimientos de pedestal que empujan la muestra contra una célula de carga interna fija. El equipo fue diseñado, principalmente para realizar ensayos en muestras no saturadas (no obstante el diseño del equipo nos permite realizar ensayos en muestras saturadas) de 38 mm de diámetro y 76 mm de altura. En su concepción mecánica la célula es de tensión controlada o deformación controlada tanto en compresión axial y como en extensión axial. En esta memoria de tesis, el programa de ensayos se realizó a deformación controlada por medio de una cámara de presión que se llena con un líquido incompresible (identificada con el número 7 de la Fig. 3.21a). Una célula de carga miniatura de 8.9 kN compensada a presión, es roscada entre el cabezal y el pistón superior (Fig. 3.22a), y se mantiene fija en posición por el tornillo superior de carga (no. 17, Fig. 3.21a). Este arreglo, permite realizar ensayos de extensión triaxial, impide las rotaciones del cabezal–muestra y mantiene la alineación entre el pistón de carga y el cabezal de la muestra. Como puede observarse en la misma Fig. 3.21a, el pistón de carga inferior, con el mismo diámetro de la muestra, prevé la independencia de la tensión vertical de la presión de cámara.

Para la realización de los ensayos de compresión isótropa, el pistón inferior de la cámara de presión de carga vertical, es bloqueado a una altura especificada por un cilindro de acero de 65 mm de altura instalado entre la base y el pistón inferior (Fig. 3.21a). El cabezal del espécimen es desenroscado de la célula de carga, por lo tanto del pistón superior. Esto dificulta que la muestra permanezca en posición vertical durante el montaje o trayectorias de carga y descarga. Para evitar este problema se usa un aparato de alineación no-contacto para el control de la inclinación del espécimen, el cual reemplaza la célula de carga. La máxima inclinación inicial del espécimen es así controlada a un máximo de $0^{\circ} 45'$ (Fig. 3.22b).

La succión matricial es aplicada usando la técnica de traslación de ejes, controlando la presión positiva de agua y aire que mantiene una diferencia igual a la succión prescrita. Una característica, a diferencia de los equipos triaxiales antes mencionados, es la posibilidad de independizar o aplicar simultáneamente la presión de agua y aire requerida para el control de la succión matricial ($u_a - u_w$), en los dos frentes extremos de la probeta. En este caso, tanto el cabezal como el pedestal incluyen una combinación de dos diferentes piedras porosas (Fig. 3.14a y 3.23): un disco cerámico de alto valor de entrada de aire (AVEA) de 1.5 MPa conectado al circuito de presión de agua (no. 9, 10 y 11, Fig. 3.21a) y rodeado por un anillo de acero inoxidable poroso (3 mm de espesor, $10 \mu\text{m}$ tamaño de poro) conectado al sistema de presión de aire. Este procedimiento de aplicación de la succión en

ambos extremos de la probeta reduce sustancialmente el tiempo de equilibrio, al disminuir la distancia de drenaje. Esta es una importante ventaja cuando se ensayan suelos no saturados con una baja permeabilidad, pero presenta el inconveniente de atrapar aire en el centro de la muestra cuando avanzan los dos frentes extremos en trayectorias de humedecimiento. Los cambios de contenido de agua en el suelo son calculados midiendo el volumen de agua por medio de dos buretas de 10 mm³ de resolución conectados a ambos discos cerámicos (AVEA). Estos valores son corregidos tomando en cuenta la cantidad de aire disuelto a través del disco cerámico.

Puede usarse como fluido de confinamiento aire o aceite de silicona de baja viscosidad, el aceite de silicona fue usado por Romero (1999) en ensayos isótropos térmicos, ya que su baja conductividad eléctrica no provoca interferencias en los transductores internos. Para este trabajo de investigación se optó por el uso de aire como fluido de confinamiento. La migración de aire del fluido de confinamiento hacia la muestra, fue reducida por el uso de dos membranas separadas por grasa de silicona. La presión de confinamiento fue aplicada por medio de aire a presión (4.0 MPa, máxima presión de cámara). Una cámara de metacrilato de 15 mm de espesor es externamente cubierta por un cilindro de acero inoxidable AISI 316 (15 mm de espesor), previsto de cuatro ventanas (30 mm de ancho): dos para observar los transductores LVDT internos y dos para pasar el haz de luz del sensor óptico láser hacia la muestra (Fig. 3.21b y 3.24).

3.7.2 Medida de parámetros

Los parámetros a controlar deben definir completamente el estado tensional y el estado de la muestra en cada momento, por tal motivo, el equipo utilizado cuenta con los siguientes condicionantes generales con el fin de conseguir la máxima información y versatilidad en los ensayos:

- a) Es importante durante todo el proceso de ensayo controlar el estado tensional a que se ve sometida la muestra (σ_1 , σ_3 , u_a y u_w) y conocer el estado deformacional (ϵ_v y ϵ_s), así como su humedad (w) y grado de saturación (S_r) correspondiente, de forma que se obtenga el comportamiento tenso-deformacional e hidráulico completo del suelo.
- b) Tanto el proceso de ensayo (seguimiento de las historias de tensiones) como la obtención y almacenamiento de resultados se debe realizar de forma automatizada. Esto permite la realización de ensayos largos en el tiempo y con historias tensionales complejas sin necesidad de un control personal continuo.

- c) Se debe poder manejar adecuadamente toda la información obtenida (transmisión, procesado y salida de resultados).

El estado tensional quedará determinado con $\sigma_1 - u_a$, $\sigma_3 - u_a$ y $u_a - u_w$. Será en consecuencia necesario medir σ_1 , σ_3 , u_a y u_w ó $u_a - u_w$, con los cuales se podrán obtener la tensión esférica $p - u_a = \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{3} - u_a$, la tensión de corte $q = \sigma_1 - \sigma_3$ y la succión $s = u_a - u_w$, que son los parámetros habituales utilizados en ensayos triaxiales de suelos no saturados.

3.7.2.1 Desplazamiento axial. Transductores LVDTs

El desplazamiento axial fue registrado medido realizando dos medidas, una interna local (ϵ_{lc}) y la segunda externa global (ϵ_l). El objetivo de las medidas locales internas de la deformación axial del espécimen fue el de evitar errores de apoyo en los extremos del espécimen en contacto con el cabezal y pedestal, y los errores generados por la deformación de la célula de carga. Por otro lado, en ensayos isótropos, no es medida la deformación axial externa (global) debido a que el pistón de carga es bloqueado durante el ensayo. No obstante, en los ensayos triaxiales, la medida de la deformación axial global fue realizada por un transductor (LVDT) de desplazamiento fijo en el pistón de carga (Fig. 3.32), con el objetivo de corroborar los desplazamientos axiales locales. En la Fig. 3.33 se presenta su curva de calibración.

El desplazamiento axial fue medido internamente usando dos transductores miniatura LVDT (modelo SM3 de Schlumberger) adheridos en la membrana, colocados en la parte central de la probeta en dos posiciones diametralmente opuestas (no. 2, Fig. 3.21a). Las principales características de fabricación son: rango de trabajo, ± 3 mm; sensibilidad típica a 5 kHz, 136 mV/V/mm, opera a temperaturas, - 40 °C a 85 °C y peso de 8.7 g. Los LVDTs son alimentados con 5.17 V r.m.s. a 5.031 kHz por medio de un controlador dando una sensibilidad de 1.422 $\mu\text{m}/\text{mV}$. La salida analógica de esta unidad (0 a ± 10 Vdc) da una señal preconditionada (modificada a una sensibilidad de 0.30 $\mu\text{m}/\text{mV}$) antes de la conexión al convertidor A/D. Esta unidad también contiene un display (tarado, alarmas y promedio de lecturas) lo cual permite tener una visualización on-line de la evolución del desplazamiento axial.

Para la fijación de los transductores en la muestra se desarrollaron soportes de PVC fijados lateralmente a la muestra sobre la membrana de látex con pegamento instantáneo de tipo cianoacrilato de acuerdo al esquema de la Fig. 3.25. Para el montaje de estos transductores se utilizó una guía especial, que los posiciona siempre a la misma altura de la muestra. Se realizaron medidas para determinar el efecto de las presiones de cámara elevadas sobre los sistemas LVDT y se encontró que los sensores LVDT no sufrieron perturbaciones sobre el rango experimentado en el ensayo (hasta 2.5 MPa). Sin embargo, algunos pequeños errores de acomodo de los soportes de los LVDT bajo incrementos de presión fueron detectados en una muestra falsa de acero inoxidable, usualmente entre $\pm 5 \mu\text{m}$ y $10 \mu\text{m}$ cuando la presión de confinamiento se incremento hasta 0.2 MPa comenzando de la condición atmosférica. Los transductores LVDTs fueron cuidadosamente calibrados, las curvas de calibración presentadas en la Fig. 3.26 muestran una adecuada linealidad.

3.7.2.2 *Desplazamiento radial. Sensores láser electro – óptico*

En el Capítulo 2 se menciona los diferentes sistemas para obtener medidas directas y locales de la deformación radial en ensayos con muestras no saturadas, cuyo objeto es el de obtener resultados más fiables y precisos. Los sistemas de medición radial deben satisfacer las siguientes necesidades (Romero, 1999):

- Ser estables en ensayos largos en tiempo y tener alta resolución en deformaciones como mínimo del $10^{-2} \%$;
- Tener poca influencia sobre la deformación del espécimen;
- Ser capaz de medir deformaciones grandes en varios sitios a lo largo del espécimen;
- No ser afectados por ruidos eléctricos y ser exactos en la adquisición de datos a velocidades rápidas;
- No ser afectados por cambios de presión de cámara y temperatura; y
- Ser simples de operar e instalar.

Existen sistemas para medir deformaciones laterales, bastantes exactos, pero es difícil de satisfacer todos los puntos anteriormente mencionados, especialmente con respecto a la medida en varios sitios de la probeta, de no ser afectados por los cambios de presión de cámara y temperatura, simplicidad en su instalación y operación. Debido a estas limitaciones se decidió buscar un sistema de alta resolución que pueda ser externamente instalado a la cámara con el objeto de detectar los desplazamientos laterales a lo largo del perfil de la muestra y no ser afectado por variaciones de

presión y temperatura dentro de la cámara. Como resultado a lo anterior, se enfocó en un sistema de sensor láser electro-óptico, que proporciona una alta exactitud dentro de un amplio rango de mediciones a diferentes distancias desde el cabezal del sensor hasta el objeto. El sistema ha sido utilizado por Romero *et al.*, (1997); Romero (1999) y Barrera *et al.*, (2000, 2001).

Los sensores láser electro-ópticos se basan en el principio de la técnica de triangulación, el cual se muestra en la Fig. 3.27. Un controlador modelo LB-72 y un cabezal sensor modelo LB-12, de Keyence Laser Displacement Sensors, fueron apropiados para satisfacer los requerimientos de sensibilidad, tamaño y rangos de medición en los ensayos, las principales características de estos sensores láser son: la distancia del rango de regulación del cabezal sensor a la superficie de contacto varía entre 30 y 50 mm (aire como medio transparente), con un rango de medición de ± 10 mm a una distancia de referencia de 40 mm (ver Fig. 3.27a), resolución de 2 μm a una respuesta de 60 ms (frecuencia de respuesta de 6 Hz), no-linealidad alrededor de 10 $\mu\text{m}/\text{mm}$, sensibilidad obtenida de un controlador de voltaje de salida analógica entre 1 $\mu\text{m}/\text{mV}$ y 2 $\mu\text{m}/\text{mV}$.

Estos sensores se colocaron en el exterior de la cámara triaxial y montados sobre soportes rígidos con el objeto de medir las deformaciones radiales, en dos posiciones diametralmente opuestas del espécimen (no. 3, Fig. 3.21a). El equipo es posicionado a una distancia desde el cabezal sensor hasta el objeto de 45 mm por medio de un tornillo micrométrico y un indicador de señal que ayuda a encontrar el centro del rango. El láser transmisor y el sensor receptor aseguran una resolución de deformación de 5×10^{-5} . La superficie de la membrana de látex es iluminada por el haz de luz emitido por el cabezal del sensor (diámetro del punto luminoso de 1.0 mm), el cual cruza la cámara de metacrilato de 15 mm de espesor y 25 mm de un fluido de confinamiento (aire o aceite de silicona). Para un mejor reflejo, es recomendable cubrir la parte de la membrana con una delgada capa de pintura acrílica blanca con el fin de mantener la superficie de color en ensayos de larga duración. En esta memoria de tesis, se usó aire como fluido de confinamiento. Romero (1999) presenta curvas de calibración de estos sensores a diferentes cambios de temperatura usando como fluido de confinamiento aceite de silicona.

Otra novedad del equipo triaxial, es que los sensores externos de medida lateral pueden desplazarse verticalmente a lo largo de toda la altura de la probeta por medio de un motor eléctrico (no. 15, Fig. 3.21a), el cual actúa sobre el sistema de desplazamiento vertical de los sensores a una velocidad aproximada de 2.6 mm/s. Con este método, todo el perfil de la muestra desde el pedestal hasta el

cabezal puede ser recorrido en aproximadamente 30 s y medido con la misma resolución de deformación. El desplazamiento vertical de los sensores ópticos laterales son medidos por dos LVDTs fijos en el exterior de la cámara (no. 5, Fig. 3.21a), con un rango de 100 mm, sensibilidad alrededor de 50 mV/mm con una resolución de 50 μm (en la Fig. 3.28 se presenta el gráfico de calibración de los LVDTs externos). Estas medidas permiten evaluar el cambio de volumen global de la probeta. Adicionalmente, algunas no uniformidades de la muestra e incertidumbres tales como pequeñas inclinaciones de la muestra, las constricciones del cabezal y pedestal, las irregularidades de la superficie de la membrana, pueden ser fácilmente detectados por estos sensores láser.

Se realizaron calibraciones con objeto de investigar el efecto de refracción, así como comprobar la señal de salida debido a los diferentes medios transparentes que interfieren entre el cabezal sensor y la superficie de objeto. Cualquier objeto que refracte, refleje o disminuya la intensidad del haz de luz, incluyendo polvo, puede causar errores de interferencia lo cual afecta la señal. En la Fig. 3.27b se representa el efecto de refracción sobre la respuesta al sensor, por tal motivo es importante realizar la calibración de los sensores usando el mismo esquema de montaje de ensayo. Antes de realizar la calibración de los sensores láser, se realizaron ajustes de la salida de la señal eléctrica (Fig. 3.29). Una vez conseguido que la salida de la señal fuera estable, se procedió a realizar la calibración de los sensores. El procedimiento consistió en el uso de un micrómetro certificado de alta resolución (0.001 – 5 mm) posicionándolo en contacto con el cabezal sensor, usando como probeta un cilindro de acero inoxidable cubierto con las membranas de látex, siguiendo el mismo esquema requerido para los ensayos. Los ciclos de calibración se realizaron desplazando el cabezal sensor con respecto a un punto fijo del objeto. en la Fig. 3.29 se muestra una adecuada linealidad para los dos medios transparentes aire–metacrilato–aire.

Al incrementar la presión de confinamiento (σ_3) se induce movimientos hacia fuera del metacrilato, a pesar del uso de una cámara de confinamiento de acero inoxidable (Fig. 3.24). Este desplazamiento lateral no-lineal de la cámara de metacrilato influye en un comportamiento de la señal del sensor, debido a la reducción en la distancia (y) en el esquema de la Fig. 3.27b. Los desplazamientos máximos de la cámara de metacrilato son alrededor de $\Delta y = - \Delta x = -80 \mu\text{m}$ (medido a la mitad de la altura de la ventana) a una presión de confinamiento de 2.3 MPa (Fig. 3.30). Debido a que el equipo se sometería a ciclos de carga y descarga, fue necesario realizar una calibración para verificar los cambios de offset y de sensibilidad. El procedimiento consistió en mantener constante la distancia entre el cabezal sensor y el objeto (probeta falsa de acero inoxidable

con membranas de látex) bajo ciclos de presión de confinamiento. Después de un año se realizó una segunda calibración, en la Fig. 3.31 se muestra que el principal factor por corregir en las lecturas es por el error de offset, ya que la sensibilidad de los sensores se mantuvieron constantes.

3.7.2.3 Tensión vertical. Célula de carga

La tensión axial es aplicada por medio de una cámara de presión (identificada con el número 7 de la Fig. 3.21a). El pistón inferior de carga conectado a un segundo pistón superior (no. 19, Fig. 3.21a) con el mismo diámetro de la muestra, prevé la independencia de la tensión vertical de la presión de cámara. La presión de cámara inferior, referida como presión de pistón (σ_p), es impuesta por medio de un pistón roscable controlado por un motor de corriente continua con reductor, desarrollado en el Laboratorio de Geotecnia. Este sistema acoplado a la cámara inferior del equipo triaxial permite el control del desplazamiento del pistón de carga (Fig. 3.32). La calibración para establecer la relación entre la velocidad del motor reductor y el desplazamiento del pistón de carga se presenta en la Fig. 3.33. Este diseño nos permite realizar ensayos de tensión controlada o deformación controlada. En el programa de ensayos realizados en esta memoria de tesis se optó por realizar los ensayos bajo deformación controlada.

Sivakumar (1993), haciendo uso de una expresión presentada por Bishop y Henkel (1962) para obtener una velocidad de corte para un 95 % de equilibrio en ensayos triaxiales drenados en muestras saturadas (ecuación 3.12), obtuvo un tiempo para llegar a la falla de 11 días en ensayos triaxiales en muestras de caolín en condiciones no saturadas, donde la deformación de falla fue de 20 a 35 % a una velocidad de desplazamiento de 1.2 $\mu\text{m}/\text{min}$. Se tomó como base dicha ecuación para estimar el tiempo requerido para llegar a la falla en el programa de ensayos triaxiales en muestras no saturadas del suelo en estudio (arcilla de baja plasticidad).

$$c_v = \frac{K}{\gamma_w m_v} \quad ; \quad m_v = \frac{\Delta \epsilon}{\Delta \sigma}$$

$$t = \frac{20 h^2}{0.75 c_v} \tag{3.12}$$

Donde $K = 2.6 \times 10^{-9}$ (m/s), permeabilidad del suelo al agua obtenido de los ensayos de colapso con control de succión; $m_v = 0.005$ (m^2/kN), compresibilidad del suelo obtenido de los ensayos de compresión isotrópica en muestras saturadas; $\gamma_w = 9.8$ (kN/m^3), densidad del agua; $2h = 0.076$ m,

altura de la muestra; $c_v = 5.2 \times 10^{-8}$ (m²/s), coeficiente de consolidación obtenido de los ensayos de compresión isotrópica en muestras saturadas y t el tiempo de falla. Por sustitución de los valores, el tiempo requerido de falla fue aproximadamente de 8.5 días bajo condiciones drenadas. Sin embargo dado que la permeabilidad no saturada es menor que la saturada se optó por un tiempo de falla de alrededor de 12 días logrando una deformación axial (ϵ_l) de falla entre 18 y 25 %, a una velocidad constante de desplazamiento de 1.0 $\mu\text{m}/\text{min}$, con objeto de garantizar que la succión constante ($s = u_a - u_w$) en toda la trayectoria de falla. Dicha velocidad se comprobó que no generaba presiones de poro al parar el motor reductor por un periodo de tiempo de 36 horas, ya que no se observó cambios en la deformación de la muestra ni alteraciones en los contenidos de agua.

Una junta tórica (67 mm diámetro interior x 2 mm de grueso) en el pistón inferior de carga y otra junta tórica (38 mm diámetro interior x 2 mm de grueso) en el pistón superior de carga, aíslan la presión de confinamiento (σ_3) sobre la muestra de la presión de la cámara de carga (σ_p) durante la imposición del desviador (σ_1) (Fig. 3.21a, 3.32). La relación entre σ_1 y σ_p dependerá de los siguientes factores:

- Superficie (a) de aplicación de σ_p en la cámara inferior de carga.
- Peso (w) del pistón de carga.
- Area de la muestra (A).

Se obtendrá en consecuencia, una relación entre σ_1 y σ_p del tipo:

$$\begin{aligned}
 F &= A\sigma_1 - A\sigma_3 ; \quad R_1 = \frac{a}{A} \\
 F + w &= a\sigma_p - A\sigma_3 ; \quad A\sigma_1 - A\sigma_3 + w = a\sigma_p - A\sigma_3 \\
 \sigma_1 &= \sigma_p R_1 - \frac{w}{A}
 \end{aligned} \tag{3.13}$$

El pedestal y los pistones de carga, han sido pesados al comenzar los ensayos, por lo tanto la ecuación (3.13) es mejor ser expresada en forma de incremento:

$$\Delta\sigma_1 = \Delta\sigma_p R_1 = \Delta\sigma_3 + \Delta\left(\frac{F}{A}\right) \tag{3.14}$$

que permite relacionar directamente el cambio de σ_1 al variar σ_p , donde $A = 11.34 \text{ cm}^2$, $a = 33.87 \text{ cm}^2$, por lo tanto, $R_1 = 2.99$. En el gráfico de la Fig. 3.34 se comparan los datos teóricos de la ecuación (3.14) con datos obtenidos de una calibración realizando ciclos de incrementos de presión de cámara (σ_3), obteniendo así, una relación experimental de $\Delta\sigma_3 = 2.96 \Delta\sigma_p$. De igual manera, en

la Fig. 3.35 se comprueba experimentalmente por medio de calibraciones la expresión en la ecuación (3.14).

Para la obtención de σ_1 se utilizó una célula de carga (SENSOTEC) compensada ante cambios de presión y con una capacidad de 8.9 kN, acoplada al equipo por encima de la muestra (Fig. 3.21a, 3.22). Esta célula de carga contiene 2 diafragmas de acero inoxidable soldados en los extremos del elemento activo para proteger la célula de carga de los efectos de descentralización de la carga axial (Fig. 3.36).

La célula de carga se adquirió con un certificado de calibración de SENSOTEC. Para comprobar los datos especificados en dicho certificado, se realizó una calibración eléctrica, situando un resistor de precisión en los terminales apropiados (generalmente excitación y salida). En la Fig. 3.34 se presenta la sensibilidad de la señal de salida de la célula en (mV) a un valor de fuerza en (kN).

Otra característica de la célula de carga que se comprobó, fue su estabilidad frente a incrementos de presión de confinamiento (σ_3). En la Fig. 3.37 se muestra la evolución temporal de la señal eléctrica (mV) de la célula de carga durante un ciclo de carga–descarga de la presión de confinamiento, observando que la respuesta de la célula de carga no se ve afectada por los cambios de presión.

Con la obtención de σ_1 medido con la célula de carga, se obtiene directamente la fuerza (F) ejercida en la muestra. Una vez conocido F se debe obtener la tensión desviadora (q) dividiendo dicho valor por el área de la sección de la probeta, dicha área deberá ser corregida debido a los cambios de la deformación volumétrica en la muestra.

$$A_c = A_0 \left(\frac{1 - \epsilon_v}{1 - \epsilon_1} \right) ; \quad q = \frac{F}{A_c} \quad (3.15)$$

Siendo A_0 el área inicial y A_c el área corregida de la sección de la probeta, $\epsilon_v = \epsilon_1 + 2\epsilon_3$ deformación volumétrica y deformación axial ϵ_1 y radial ϵ_3 .

3.7.3 Sistema de adquisición de datos

El registro de datos se realizó con un sistema de control y adquisición de datos “Keithley System 570” y un convertidor A/D de 12 bit (resolución del sistema 1/4096) conectado a un ordenador PC,

IBM. La entrada analógica varía entre ± 10 Vdc con resolución de 4.88 mV. Los rangos analógicos de entrada y el acondicionamiento de señal de ganancia proveen una resolución menor a 0.122 mV. El sistema ofrece 16 canales de entrada diferencial, un tiempo de conversión de 25 μ s y un tiempo de adquisición de muestra de 5 μ s a una velocidad de 35 kHz.

El preacondicionamiento y señales amplificadas, incrementan la resolución (control de ganancia y posicionamiento a cero) de las diferentes unidades externas, el cual alimenta a 14 transductores (dos LVDTs miniatura internos, dos sensores de desplazamiento láser, una célula de carga, dos termopares internos, dos LVDTs externos para monitorear el desplazamiento vertical de los sensores láser, un LVDT para monitorear el desplazamiento del pistón de carga y cuatro transductores de presión). Las unidades controladoras presentan sus lecturas en una pantalla, que permite una visualización on-line de las diferentes medidas o el desplazamiento a cero cuando es necesario durante el ensayo. El rango del convertidor global A/C es de 0 a 10 Vdc. El amplificador global de la instrumentación ha sido seleccionado en 1. Además, seleccionando desde el software, pueden programarse diferentes amplificadores de ganancia local de 1 y 2. La ventaja de aplicar una ganancia, es que se puede incrementar la entrada de voltaje antes de ser digitalizado por el convertidor A/D, mejorando la resolución de las medidas (Tabla 3.3). Por otro lado, se detectaron algunos ruidos en las señales por lo que se utilizaron un máximo de 14 canales, algunas veces con una señal de nivel bajo de menos de 1 Vcd, y dos cables conectados a canales diferenciales de entrada (positivo y negativo). En la Fig. 3.29 se observa cómo para el sensor láser 2, la señal es ajustada, minimizando el ruido de la señal. Se realizaron calibraciones de resolución de señal tanto de los sensores láser como de los LVDTs internos (combinando amplificador y convertidor A/D) presentando una buena resolución.

Dos programas en lenguaje KDAC5001/I fueron utilizados para el registro de datos. El principal programa es aquél que interpreta los registros de salida de voltaje de los diferentes transductores a cierto intervalo de tiempo convirtiéndolos en unidades ingenieriles. Este programa fue el utilizado para la adquisición de datos en ensayos isótropos y triaxiales en trayectorias de carga - descarga, mojado - secado y rotura. El segundo programa fue usado para registrar los datos de los sensores láser y LVDTs externos al realizar medidas lateras del perfil de la muestra. Cada uno de los datos registrados en un intervalo de tiempo, es salvado en el disco duro, para su posterior análisis. Los intervalos de tiempo son especificados en el software antes de comenzar el ensayo. Los intervalos de tiempo de toma de registro varían entre 0.01 min hasta 74 min en el caso del primer programa

(programa principal) y en el segundo programa entre 0.002 s hasta 30 s. En este último programa se requiere una velocidad alta de toma de registro, ya que es el utilizado para la medida de los perfiles laterales de la muestra. Un tiempo convencional en cada intervalo de toma de registro usado en ensayos largos en tiempo fue alrededor de 10 min y un intervalo de tiempo usual para la toma de datos del perfil de la muestra de 0.1 s, lo cual corresponde 300 lecturas en 30 s, tiempo requerido para desplazar verticalmente el sensor láser en toda la altura de la muestra. Los datos salvados en cada intervalo de tiempo en el disco duro también pueden ser copiados a un disquete sin necesidad de parar el ensayo. En la Tabla 3.3 se presentan los valores obtenidos para una buena resolución del convertidor A/D.

Tabla 3.3 Descripción de los canales de los diferentes transductores.

Canal	Parámetro medido	Ganancia (voltaje de entrada)	Sensibilidad de operación	Resolución
0: LVDT-pistón	$\epsilon_{1(g)}$	2 (0 a 5V)	4.0 $\mu\text{m}/\text{mV}$	1.0 μm
1: Pres. aire	u_a	1 (0 a 10V)	0.20 kPa/mV	1.0 kPa
2: Pres. conf.	σ_c	1 (0 a 10V)	0.20 kPa/mV	1.0 kPa
3: Pres. agua	u_w	1 (0 a 10V)	0.20 kPa/mV	1.0 kPa
4: LVDT-int.-1	$\epsilon_{1(c)}$	2 (0 a 5V)	0.299 $\mu\text{m}/\text{mV}$	0.6 μm
5: LVDT-int.-2	$\epsilon_{1(c)}$	2 (0 a 5V)	0.30 $\mu\text{m}/\text{mV}$	0.6 μm
6: Láser 1	$\epsilon_{r(c)}$	2 (0 a 5V)	1.587 $\mu\text{m}/\text{mV}$	2.0 μm
7: Láser 2	$\epsilon_{r(c)}$	2 (0 a 5V)	1.529 $\mu\text{m}/\text{mV}$	2.0 μm
8: Célula de carga	σ_1	2 (0 a 5V)	1.78 N/mV	3.5 N
9: LVDT-ext.-1	ϵ_{1-r}	2 (0 a 5V)	20.0 $\mu\text{m}/\text{mV}$	50 μm
10: LVDT-ext.-2	ϵ_{1-r}	2 (0 a 5V)	20.33 $\mu\text{m}/\text{mV}$	50 μm
11: Pres. cámara inf.	σ_p	1 (0 a 10V)	0.20 kPa/mV	1.0 kPa
12: Termopar-int.-sup.	T (°C)		0.0126 °C/mV	0.1 °C
13: Termopar-int.-inf.	T (°C)		0.0126 °C/mV	0.1 °C

(c) = medida local; (g) = medida global; ϵ_{1-r} = desplazamiento vertical del sensor láser (obtención perfil lateral de la muestra).