



Departamento de Ingeniería del Terreno,  
Cartográfica y Geofísica

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DEL  
COMPORTAMIENTO HIDROMECÁNICO DE  
UNA ARCILLA COMPACTADA.

**TESIS DOCTORAL**

Presentada por:  
Carlos Manuel Buenfil Berzunza

Directores de tesis:  
Antonio Lloret Morancho  
Antonio Gens Solé

---

Barcelona, Septiembre de 2007

## CAPITULO 3

### EQUIPO EXPERIMENTAL Y TÉCNICAS DE CALIBRACIÓN.

#### 3.1 Introducción.

La implementación de un nuevo equipo triaxial, y sus dispositivos auxiliares, para suelos no saturados, es una parte significativa del programa de investigación. En este capítulo se describen:

- a) Los elementos que componen el equipo triaxial
- b) El equipamiento adicional necesario para las realizar las pruebas.
- c) Principios de operación.
- d) Las técnicas experimentales que se usaron.

Datos experimentales de buena calidad son necesarios para entender y modelar el comportamiento hidromecánico de suelos no saturados. Estos datos deben de ser obtenidos bajo condiciones de tensiones cuidadosamente controladas, y con registro continuo y preciso de las deformaciones y contenido de humedad. Por lo tanto, es necesario realizar el estudio experimental con un equipo triaxial con succión controlada con el fin de conocer totalmente el estado de tensiones de la muestra.

En el inicio del capítulo se realiza una descripción general del equipo, sin dar detalles de las características y principios de operación de elementos que componen el equipo triaxial. Posteriormente, una descripción más profunda del equipo se realiza separándolo en diversos componentes: sistemas de aplicación continua y control de tensiones, de control de succión, de medidas de deformación y cambios de humedad en la muestra, y de adquisición de datos. En esta parte, se realiza una total descripción de los disco de alto valor de entrada, de los transductores de presión, de deformación axial, de sensores láser electro-ópticos, etc.; así como de detalles para aplicar la succión matricial, métodos de medidas de desplazamiento axial y radial, procedimientos para aplicar en forma continua (automatizada) las tensiones y registrar en forma continua las medidas. Adicionalmente, se describe en detalle el montaje adoptado para las componentes auxiliares del equipo. Se pone gran énfasis en describir la fiabilidad de los

elementos que controlan y miden las tensiones, así como la precisión y grado de exactitud de las medidas obtenidas en el equipo.

Al final del capítulo se presenta una descripción de equipos adicionales, usados en este programa de investigación, como: célula edométrica con control de succión, célula edométrica con medida de tensión lateral y un equipo triaxial estándar para suelos saturados usado en los ensayos sobre muestras saturadas.

### **3.2 Sistemas de presión de aire y presión de agua.**

La presión de aire que utilizan los equipos experimentales (para proporcionar las presiones de confinamiento, diafragma, en el pistón, etc.) se suministra mediante un sistema de aire comprimido con reguladores de presión. El sistema cuenta con dos líneas de aire a presión, proveído por dos compresores, que trabajan independientemente. La máxima presión de aire, suministrada por un compresor de alta presión, es limitada a 4.0 MPa, con un rango de trabajo usual de  $(2.8 \pm 0.2)$  MPa. Un compresor de baja presión suministrando una presión de aire de  $(0.94 \pm 0.06)$  MPa es conectado a otra línea. Un grupo electrógeno de emergencia con equipo de arranque y paro automático proporciona la energía eléctrica a los compresores en caso de fallar el suministro de la red pública, minimizando así la interrupción en el suministro de presión de aire a los equipos. Con el fin de asegurar el suministro de aire seco a los reguladores, las líneas de presión de aire pasan a través de un sistema de purgas y refrigeración que atrapan y eliminan el agua condensada y aceite de engrase que salen de los compresores. Se utilizaron dos tipos de reguladores, dependiendo de las presiones requeridas en los ensayos: Bellofram tipo 70 con alimentación hasta 1.8 MPa (con rango de trabajo: 14 kPa hasta 1.1 MPa) y Fairchild modelo 10 con alimentación hasta 3.5 MPa (rango de trabajo: 35 kPa hasta 2.8 MPa).

La presión de agua se aplica y mantiene constante mediante un sistema interfase aire-agua alimentada por el sistema de aire comprimido con reguladores. La interfase aire-agua de metal con membrana de látex minimiza la disolución de aire en el agua. La presión máxima de agua suministrada es solamente limitada por el rango máximo de presión de aire que es capaz de proporcionar el sistema de aire comprimido con reguladores. En los ensayos fue utilizada agua desmineralizada con una conductividad eléctrica menor de 20  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Transductores de presión, tipo diafragma y medida de deformación por sensores capacitivos, con rango de trabajo de 2.5 MPa, fueron utilizados para medir las presiones de aire y agua durante los ensayos realizados en el triaxial con control de succión, y en los ensayos hechos en la célula edométrica con control de succión se usaron tanto transductores de presión como manómetros. Los transductores de presión (Setra modelo 206), adquiridos con su certificado de calibración de fábrica, fueron verificados mediante técnicas de comparación con otro transductor de presión certificado. Este transductor de referencia fue inicialmente verificado con un equipo de presión de peso muerto, obteniéndose un error de no-linealidad de 0.04%, de histéresis de 0.02% y de no-repetibilidad de 0.02% sobre un rango de 0.025 y 5 MPa. Posteriormente, calibraciones de ciclos de incremento y reducción de presión entre 0 y 2.5 MPa fueron realizadas en todos los transductores usados durante los ensayos. Los errores de no-linealidad e histéresis dada por el fabricante están dentro de 0.13% FS, (correspondiente a menos de 2 kPa en el rango máximo de trabajo usado en los ensayos). El error de no-linealidad, bajo incrementos monótonos de presiones, obtenida de las calibraciones fue de 0.13% FS, y de histéresis en un ciclo fue de 0.09% FS (1 kPa en el rango de trabajo). La típica sensibilidad está alrededor de  $1.95 \pm 0.01$  V/MPa con una excitación eléctrica de 24 Vdc). Esta combinación, de suministro de presión con reguladores y transductores de presión, permite el control de las presiones de aire y agua con una precisión de  $\pm 1$  kPa para los reguladores Bellofram tipo 70 y de  $\pm 2$  kPa para Fairchild modelo 10.

### **3.3 Implementación de una nueva célula triaxial con control de succión, instrumentada electrónicamente.**

Para realizar el estudio del comportamiento hidromecánico de suelos no saturados es necesario contar con equipos que posean un método confiable para controlar la succión, y procedimientos para medir de manera precisa los cambios de volumen de la muestra de suelo y monitorear los cambios de humedad dentro de la misma. Con base a lo anterior, un equipo triaxial con succión controlada similar al descrito en Romero et al. (1997) y Barrera (2002), diseñado y construido en el laboratorio de Geotecnia de la Universidad Politécnica de Cataluña, se usó para realizar los ensayos. Al igual que el equipo descrito en Romero *et al.* (1997) y Barrera (2002), este equipo es capaz de realizar trayectorias de cambio de succión bajo tensión media neta constante,

compresión isótropa y compresión triaxial bajo succión constante. Una mejora de este equipo consiste en su capacidad para realizar trayectorias de tensiones continuas, tanto isótropas como anisótropas (relación constante de incremento de tensión de corte entre incremento de tensión media neta), bajo succión constante, gracias a que cuenta con un sistema de control neumático de tensiones a base de motores paso a paso, un sistema de aplicación de tensión desviadora a base de cilindro neumático y pistón de carga con fricción pequeña, y un sistema de obtención y registro de medidas totalmente instrumentado. De esta manera, varias dificultades, asociadas al uso del control manual de tensiones y registro manual de datos durante la prueba, son resueltas mediante la conexión del sistema neumático de control de tensiones con un sistema de automatización de control y adquisición de datos ligado a un ordenador IBM PC. Otra novedad del equipo, con respecto al triaxial con succión controlada de Romero *et al.* (1997) y Barrera (2002), radica en la obtención y registro instrumentado de medidas de cambio de volumen de agua mediante transductores de presión diferencial.

### **3.3.1 Descripción general de la célula triaxial con control de succión.**

En esta sección se describe la nueva célula triaxial específicamente diseñada para realizar ensayos sobre suelos no saturados bajo control simultáneo de tensiones netas y de corte, y succión matricial. En capítulos posteriores se detallan con mayor profundidad los elementos que constituyen este equipo triaxial.

El nuevo equipo triaxial, diseñado para aplicar trayectorias independientes de tensión y succión matricial, se construyó acorde a los esquemas presentados en la Figura 3.1 y Figura 3.2. Una fotografía del equipo triaxial usado se muestra en la Figura 3.3. La Figura 3.1 muestra la célula triaxial con los dispositivos de medidas ubicados dentro o sobre ella. Los sistemas de control de presiones y de obtención automatizada de medidas son representados en la Figura 3.1. La célula triaxial diseñada es similar a la descrita en Romero *et al.* (1997) y Barrera (2002), la cual está basada en el equipo triaxial hidráulico de Bishop y Wesley (1975), con la tensión de corte (o desviadora) siendo aplicada por el pedestal, empujando la muestra sobre la célula de carga. Pero, a diferencia de estas células triaxiales, donde el movimiento del pedestal es generado por una cámara de presión hidráulica, en la nueva célula triaxial es causado por un cilindro neumático de diafragma Bellofram (número 23 en Figura 3.1 y Figura 3.2), el cual está equipado con líneas de

cojinetes y un vástago de acero templado que minimizan en forma considerable la fricción, permitiendo una alta sensibilidad en la aplicación del desviador. El equipo está diseñado para ensayar muestras de suelos no saturados de 38 mm de diámetro por 76 mm de altura bajo compresión axial con control de tensiones.

La presión de confinamiento (tensión radial sobre la muestra) se impone mediante aire comprimido, controlado por un sistema de motor paso a paso, actuando sobre un regulador de presión (véase números 20 y 21 en la Figura 3.2). El motor paso a paso actúa gobernado por un sistema digital tarjeta-ordenador (número. 29 en la Figura 3.2) con base a las lecturas de presión de confinamiento obtenidas por un transductor de presión (número 22 en la Figura 3.2). La carga axial se aplica por medio de aire comprimido, también, controlado por un sistema de motor paso a paso operando sobre un regulador de presión, que empuja el vástago del cilindro neumático de diafragma Bellofram (número 23 en Figura 3.1 y Figura 3.2) sobre el pistón de carga (número 19 en la Figura 3.1), que a su vez actúa sobre la parte inferior del espécimen de suelo. Este motor paso a paso actúa, también, controlado por el sistema digital tarjeta-ordenador, con base a las medidas de carga axial proporcionadas por una célula de carga ubicada dentro de la célula triaxial (número 4 en la Figura 3.1), sujeta al pistón superior. Mediante este sistema las velocidades de aplicación de tensión radial y tensión de corte pueden ser controladas electrónicamente, siendo posible obtener trayectorias (de compresión isótropa, anisótropa y triaxial) con incrementos de tensión cuasicontínuos, a una velocidad predefinida. Una cámara de metacrilato de 15 mm de espesor es externamente cubierta por un cilindro de acero inoxidable AISI 316 de 15 mm de espesor ((números 13 y 14 en Figura 3.1) para resistir las altas presiones de confinamiento que pueden ser proporcionadas. La cámara posee 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 (Figura 3.4).

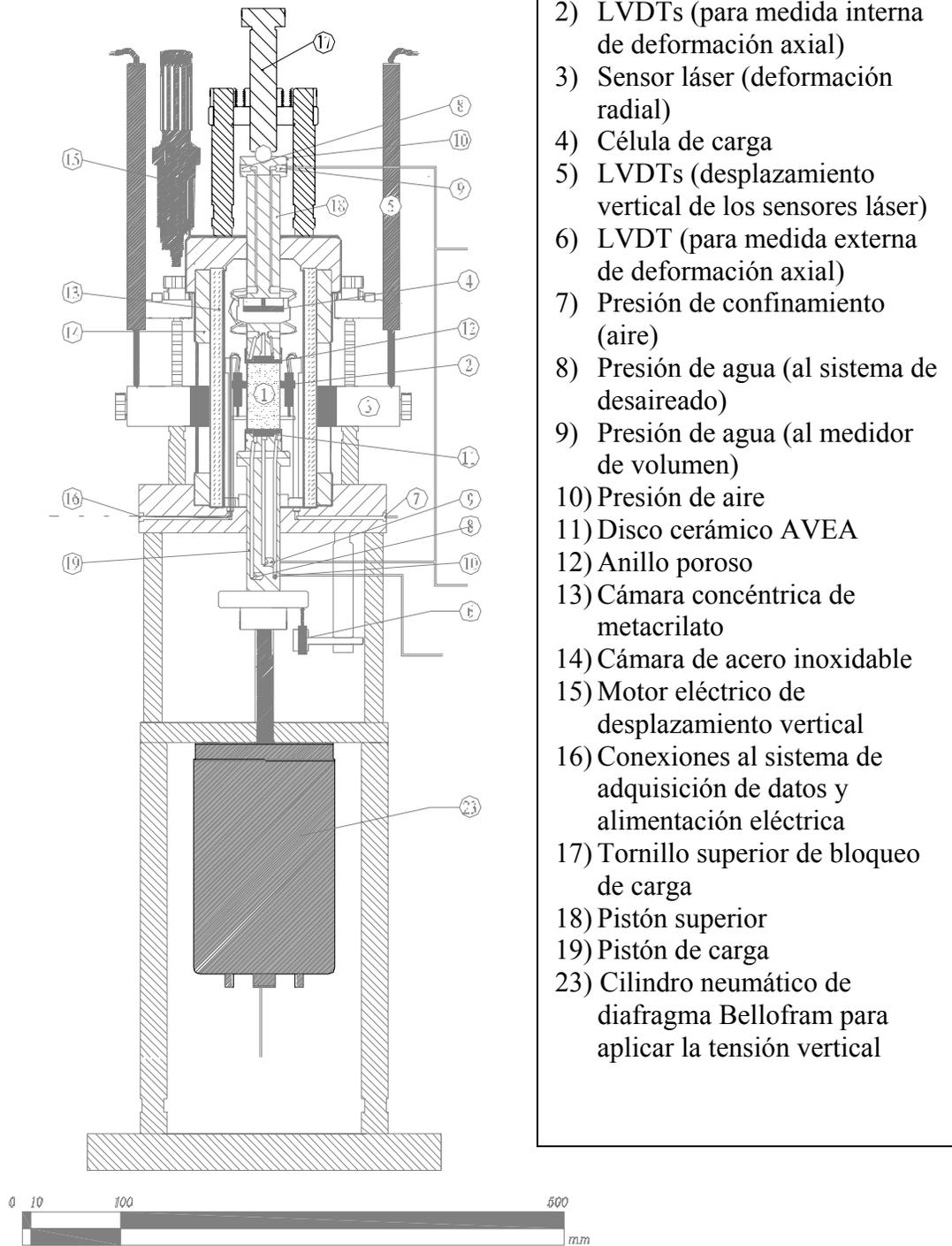
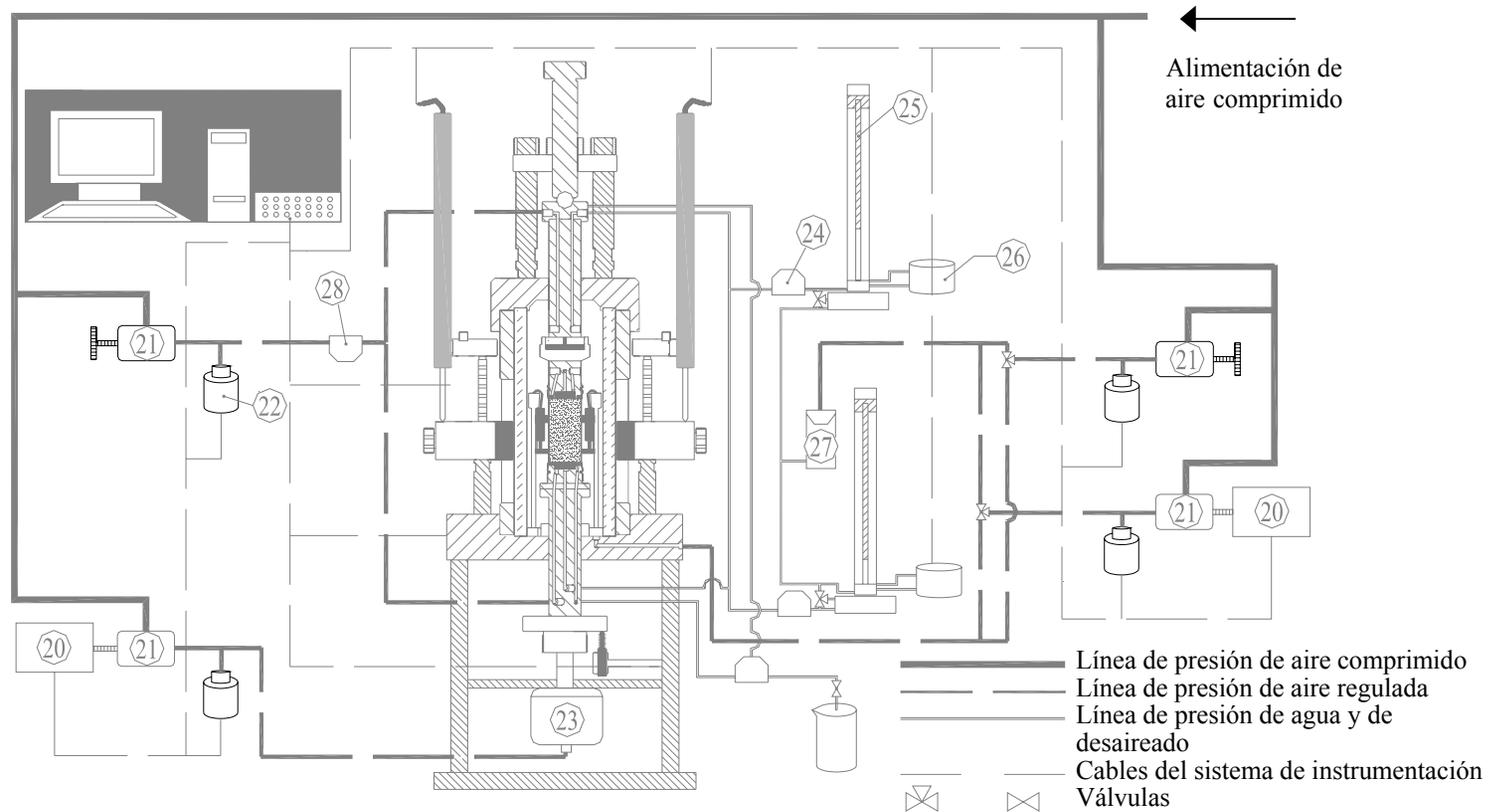


Figura 3.1 Esquema de la célula triaxial con control de succión.



- |                                  |   |
|----------------------------------|---|
| 20) Motor paso a paso            | 25) Indicador de cambio de volumen de agua    |
| 21) Regulador de presión         | 26) Transductor de presión diferencial (TPD)  |
| 22) Transductor de presión       | 27) Interfase aire-agua                       |
| 23) Cilindro neumático Bellofram | 28) Trampa de vapor                           |
| 24) Trampa de aire               | 29) Sistema de control y adquisición de datos |

Figura 3.2 Disposición del equipo experimental para ensayo triaxial con control de tensiones y de succión: sistema de control automatizado de presiones y sistema de medida totalmente instrumentado.

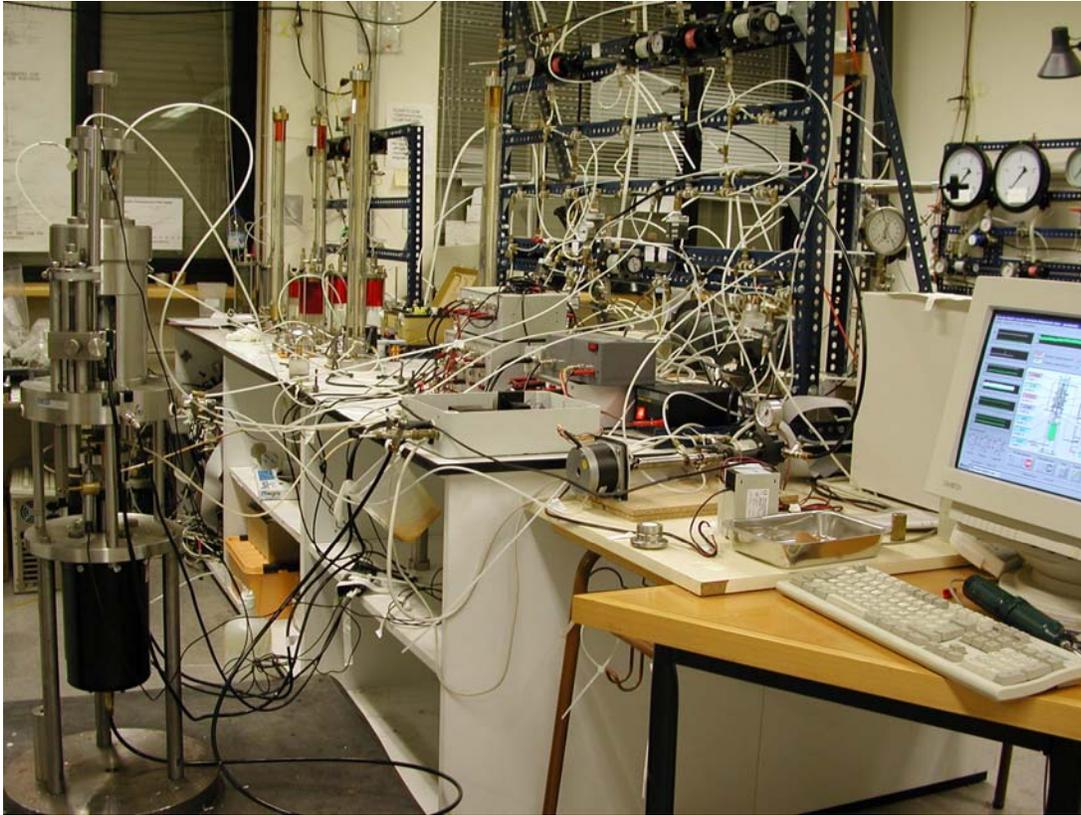


Figura 3.3 Fotografía del equipo triaxial con control de succión, sistema de control automatizado de presiones y sistema de medida totalmente instrumentado.

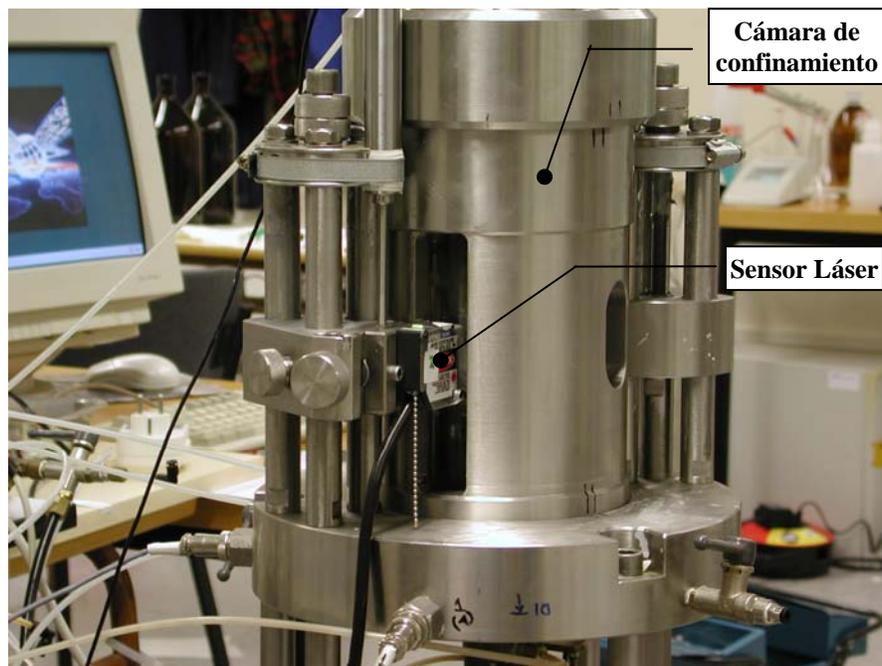


Figura 3.4 Fotografía de la célula triaxial con control de succión: cámara de confinamiento de metacrilato cubierta por un cilindro de acero inoxidable AISI 316; Sistema de medida radial (sensor láser).

La succión matricial se aplicó habitualmente mediante la técnica de traslación de ejes, aunque en algunos casos muy particulares, en los que se hace necesario proporcionar succiones inferiores a 10 kPa, la succión es aplicada con la técnica de columna negativa de agua. La técnica de traslación de ejes se realiza manteniendo constante la presión de aire (número 10 de la Figura 3.1) y variando la presión de agua (número 9 de la Figura 3.1) hasta alcanzar una diferencia de presión igual al valor prefijado de succión matricial. La presión de aire y agua requerida para aplicar la succión matricial puede ser aplicada simultáneamente sobre ambos extremos de la muestra, cabezal y pedestal, al incluir una combinación de dos diferentes piedras porosas: un anillo perimetral compuesto acero inoxidable poroso de bajo valor de entrada de aire (número 12 de la Figura 3.1) conectado a la línea de presión de aire y una piedra porosa interna de alto valor de entrada de aire (AVEA) de 1.5 MPa (número 11 de la Figura 3.1), conectada a la línea de presión de agua. De esta manera es posible suministrar las mismas presiones de aire y agua sobre los extremos de muestra, al mismo tiempo, alcanzando tiempos de equilibrio significativamente más cortos. Las presiones de fluido llegan a dichas piedras porosas, ubicadas en las piezas colocadas sobre y por debajo de la muestra, llamadas respectivamente cabezal y pedestal, a través del pistón superior y el de carga, que están perforados para permitir su paso.

Los desplazamientos axiales fueron medidos internamente usando dos transductores LVDT pequeños (con rango  $\pm 3$  mm), adheridos a la membrana, montados en lados opuestos y cubriendo la parte central del espécimen (véase número 2 de la Figura 3.1). Estos dispositivos tienen un amplio rango de medidas de deformación, entre  $10^{-5}$  a  $10^{-1}$ . Al estar montados sobre la muestra, se evitan errores provocados por deformación del equipo. Adicionalmente se hace uso de un transductor LVDT de mayor rango ( $\pm 7.5$  mm) colocado externamente (número 6 de la Figura 3.1), apoyado en la base del pistón de carga, con el fin de registrar las medidas de los desplazamientos axiales cuando se supere el rango de trabajo de los LVDTs internos. En este último caso, la deformación de la célula ante cambios de presión de confinamientos y tensión de corte se obtuvo para ser tomadas en cuenta en la medida externa de los desplazamientos verticales de la muestra.

Las deformaciones radiales fueron medidas sobre dos lados diametralmente opuestos mediante sensores láser electro-ópticos (número 3 de la Figura 3.1), de amplio rango (non-contac, long

range, electro-optical laser system) montados fuera de la cámara, en soportes rígidos sujetos a la base de la célula triaxial. El equipo es posicionado a una distancia de, aproximadamente, 45 mm desde el cabezal del sensor hasta la superficie objetivo sobre la muestra, por medio de un tornillo micrométrico. Un indicador de señal auxilia la colocación del sensor en el centro del rango. El láser transmisor y el sensor receptor proporcionan una resolución de 2  $\mu\text{m}$  (resolución de deformación de  $5 \times 10^{-5}$ ). Ciclos de calibración con diversas presiones de confinamiento fueron efectuados. Los cambios sobre la sensibilidad del sensor ante los cambios de presión de confinamiento son poco importantes. Sin embargo existe influencia de los cambios de presión de confinamiento sobre los cambios de offset, la cual es muy apreciable a bajas presiones (menor a 100 kPa). Esto es debido a los desplazamientos y expansión de la camisa de la cámara triaxial ante la aplicación inicial de la presión de confinamiento y al acomodo de la superficie de la membrana. Por lo anterior, se realizaron cuidadosos ciclos de calibración, a una distancia constante del sensor, para tomar en cuenta estos efectos.

Adicionalmente, es posible mover el sensor verticalmente por medio de un motor eléctrico (número 15 de la Figura 3.1 ), el cual actúa desplazando el sensor a una velocidad de 2.6 mm/s. Los desplazamientos laterales así obtenidos son relacionados con los desplazamientos verticales del sensor, medidos con LVDTs externos colocados sobre la base de movable (número 5 de la Figura 3.1 ), con el fin de conseguir perfiles de la muestra. También, pueden ser apreciados distintos modos de deformación (cilíndrica, de barril, etc.), irregularidades en la deformación muestra como son pequeñas inclinaciones, restricción de desplazamientos en los bordes (cabezal y pedestal) e irregularidades de la superficie de la membrana.

Los cambios en el contenido de humedad se registraron midiendo el volumen de agua que cruza los discos porosos AVEA por medio de buretas de doble pared, instrumentadas con transductores de presión diferencial (véase números 25 y 26 de la Figura 3.2 ). Las medidas de cambio de volumen fueron corregidas tomando en cuenta la cantidad de difusión de aire a través de los discos cerámicos, la pérdida a través de los tubos y la cantidad de agua evaporada. Se observó un error apreciable por histéresis, por lo cual se decidió que el flujo por las buretas sea en un solo sentido. Los cambios de presión de agua afectan también las curvas de calibración, y aunque esto no es un problema importante en la mayoría de los ensayos debido a que se mantiene constante la

presión de agua, solamente cambiándose al inicio de la etapa, se requiere hacer ciclos de calibraciones para tomar en cuenta estos efectos en los ensayos de colapso donde se varían gradualmente la presiones de agua. De esta manera, la salida y entrada de agua durante las trayectorias de tensión efectuadas pudieron ser cuidadosamente examinadas.

Un sistema de adquisición de datos, de dos placas, compuesto de 14 transductores es controlado por un ordenador personal (véase número 29 de la Figura 3.2 ), permitiendo el registro de datos y un control visual en pantalla con base a parámetros. Un módulo controlador bipolar (bipolar stepper motor drive module) gobernado por salidas digitales de la placa de adquisición de datos es usado para controlar uno de los motores paso a paso.

### **3.3.2 Control del estado de tensiones del espécimen.**

#### **3.3.2.1 Estado de tensiones en ensayos triaxiales con succión controlada.**

En esta investigación, el estudio del comportamiento hidromecánico de un suelo limo arcilloso compactado, en ensayos bajo condiciones no saturadas, se realizó usando dos variables de estado de tensiones independientes: la tensión total neta ( $\sigma_{ij}-u_a\delta_{ij}$ ) y la succión matricial ( $u_a-u_w$ )  $\delta_{ij}$ , donde  $\sigma_{ij}$  es la tensión total, mientras que  $u_a$  y  $u_w$  corresponden a la presión de la fase gaseosa y líquida respectivamente (Bishop y Blight, 1963; Matyas y Radhakrishna, 1968; Fredlund y Morgenstern, 1977). Con esta combinación de variables, los efectos de un cambio en la tensión total neta, induciendo cambios sobre las fuerzas de contacto entre agregados, puede ser separado de los efectos de la succión matricial que producen cambios en el esqueleto del suelo vía efectos de interfase aire-agua. En esta investigación, tal combinación de tensiones resulta ser muy ventajosa, lográndose aplicar mediante la técnica de traslación de ejes con presión de aire constante. En este sentido, se pueden aplicar cambios en la presión neta cambiando la tensión total o cambios en la succión matricial variando la presión de agua en forma independiente.

En el caso de ensayos triaxiales bajo condiciones no saturadas, el estado tensional quedará determinado mediante tres variables independientes: la tensión media neta  $p=(\sigma_a+2\sigma_r)/3-u_a=\sigma_m-u_a$ , la tensión de corte  $q=\sigma_a-\sigma_r$  y la succión matricial  $s= u_a-u_w$ , donde  $\sigma_a$  y  $\sigma_r$  son las tensiones principales axial total y radial total respectivamente. Por lo tanto, será necesario en estos ensayos

controlar  $\sigma_a$ ,  $\sigma_r$ ,  $u_a$  y  $u_w$ . En este capítulo a la tensión radial total,  $\sigma_r$ , se le denominará también presión de confinamiento.

### **3.3.2.2 Aplicación y Control de la tensión de radial o presión de confinamiento.**

La presión de confinamiento, corresponde a la tensión radial sobre la muestra. Para este trabajo de investigación se optó por el uso de aire como fluido de confinamiento. Este es suministrada mediante un sistema de aire comprimido con un regulador de alta presión (rango de trabajo: 35 kPa hasta 2.8 MPa, Fairchild, modelo 10) controlado por sistema de motor paso a paso (véase números 20 y 21 en la Figura 3.2), que a su vez es gobernado por un sistema digital tarjeta-ordenador (número 29 en la Figura 3.2) con base a las lecturas de un transductor de presión. Para medir la presión de confinamiento se utilizó un transductor de presión, tipo diafragma más medida de deformación por sensores capacitivos (número 22 en la Figura 3.2), con rango de trabajo de 2.5 MPa, colocado en la línea de presión entre el regulador y la cámara del triaxial. El error de no-linealidad, bajo incrementos monótonos de presiones, obtenida de las calibraciones fue de 0.13% FS (correspondiente a menos de 2 kPa en el rango máximo de trabajo usado en los ensayos) y de histéresis en un ciclo es de 0.09% FS (1 kPa en el rango de trabajo). La sensibilidad está alrededor de  $1.95 \pm 0.01$  V/MPa con una excitación eléctrica de 24 Vdc). La precisión en la aplicación de la presión mediante la combinación del regulador Fairchild modelo 10 con transductores de presión es de aproximadamente  $\pm 2$  kPa. Pero mediante el sistema de control automatizado fue posible gobernar la aplicación de la presión de confinamiento con una precisión de  $\pm 1$  kPa. Mediante este sistema la velocidad de aplicación de tensión radial puede ser controlada electrónicamente siendo posible obtener trayectorias con incrementos de tensión cuasicontínuos, a una velocidad predefinida. La migración de aire del fluido de confinamiento hacia la muestra, fue reducida por el uso de dos membranas de latex.

### **3.3.2.3 Aplicación y Control de la tensión de corte.**

La tensión de corte o desviadora en ensayos triaxiales es definida como  $q = \sigma_a - \sigma_r$ , con la tensión axial ( $\sigma_a$ ) siendo igual a la carga axial sobre la muestra (F) entre el área del espécimen, y la tensión radial ( $\sigma_r$ ) igual a la presión de confinamiento. En el equipo triaxial construido, la carga axial sobre la muestra (F) es producida por la presión en el pistón de carga (número 19 en la

Figura 3.1) generada por el aire a presión del cilindro neumático de diafragma Bellofram (número 23 en la Figura 3.1 y la Figura 3.2). El aire entra al cilindro neumático a una presión referida como presión de pistón ( $\sigma_p$ ), empuja la membrana interior, con área efectiva de 153.28 cm<sup>2</sup> generando de esta manera el desplazamiento del vástago de acero templado a través de las líneas de cojinetes, que a su vez producen el movimiento del pistón de carga sobre la base del espécimen de suelo. El pistón superior (número 18 en la Figura 3.1) se mantiene fijo por medio de un tornillo ajustable de bloqueo de carga colocado en la parte superior (número 17 en la Figura 3.1). La presión de aire que entra al cilindro neumático Bellofram ( $\sigma_p$ ) es generado por un sistema de motor paso a paso operando sobre un regulador de presión (números 20 y 21 en la Figura 3.2). Este sistema actúa controlado por el sistema digital tarjeta-ordenador (número. 29 en la Figura 3.2), con base a las medidas de carga axial proporcionado por una célula de carga ubicada dentro de la célula triaxial sujeta al pistón superior (número 4 en la Figura 3.1). Para realizar las trayectorias de descarga se reduce la presión dentro del cilindro neumático mediante el sistema de motor paso a paso con base, también, a la medida de la célula de carga.

#### **3.3.2.3.1 Medida de la tensión de corte.**

La carga axial (F) generada es medida mediante una célula de carga compensada ante cambios presión y con una capacidad de 9.8 kN (número 4 en la Figura 3.1), diseñada en el laboratorio de Geotecnia de la U.P.C. (Universidad Politécnica de Cataluña). Esta célula de carga se coloca internamente sobre la muestra, roscada entre el cabezal y el pistón superior, que se mantiene en posición fija debido al tornillo de bloqueo de carga. Este arreglo, que permite fijar al cabezal y la célula de carga con el pistón superior, evita las rotaciones del cabezal y mantiene el alineamiento entre el pistón de carga, la muestra, el cabezal de la muestra y el pistón superior. Sin embargo, con esta disposición la presión de confinamiento ( $\sigma_r$ ) genera presión sobre el cabezal (entre la cacerola de la célula y el pistón superior, y tiende a bajar la muestra y el pistón de carga. Por lo tanto, este movimiento deberá ser contrarrestado incrementando  $\sigma_p$  para aplicar la carga correcta sobre la muestra. Por otra parte, para evitar la rotación entre el pedestal y la muestra se fijó el pedestal al pistón de carga.

En la Figura 3.5a se muestra una fotografía de la célula de carga y la cacerola sobre la que va montada, en la Figura 3.5b el esquema de la ubicación de las galgas en el sensor de acero y en la

Figura 3.5c se presentan el diagrama del puente de Wheatstone de la célula de carga. La célula de carga está compuesta por un sensor de acero sobre el cual se instaló un puente Wheatstone completo a flexión formado por tres bandas extensométricas por rama. Cada banda extensométrica (de referencia N2A-06-S061P-350) posee una resistencia de  $350\Omega$ . Debido a lo complejo del pegado de las bandas extensométricas, la instalación del puente Wheatstone y la protección final fue realizada por una empresa privada. Verificaciones de respuesta bajo carga fueron realizadas. Se realizó la calibración de la célula de carga, alimentada a 10V, aplicando 3 ciclos de carga y descarga desde 0 a 220 kg usando un edómetro de brazo de 2m, determinándose la curva de calibración que asocia la carga aplicada con el voltaje de salida por medio de una regresión por mínimos cuadrados.

Las curvas de calibración de la célula de carga, como la mostrada en el anexo 1 muestran, una adecuada linealidad y una pequeña histéresis, con una sensibilidad de 32.505 kg/V. El máximo error por no linealidad e histéresis durante un ciclo de carga incrementos de carga y descarga, desde 0 hasta un rango de 220 kg (FS), es menor de 0.50% factor de escala (1.1 kg) y con un error de repetibilidad menor a 0.40% factor de escala (0.9 kg). Considerando que el área del espécimen de suelo sobre el que actuará la carga es de  $11.341\text{cm}^2$ , el error máximo, en tensión sobre la muestra, por no linealidad e histéresis será menor a 10 kPa y el error por repetibilidad menor a 8 kPa.

### **3.3.2.3.2 Control de la tensión de corte mediante un sistema de motores paso a paso.**

El arreglo, descrito arriba, permite el aislamiento entre la presión de confinamiento ( $\sigma_r$ ) y la presión de pistón ( $\sigma_p$ ) aplicada dentro del cilindro neumático que genera la carga axial sobre el espécimen de suelo. Esto permite que  $\sigma_r$  y  $\sigma_p$  sean independientes. Sin embargo  $\sigma_r$  causa una presión sobre la cacerola de la célula de carga, que tiende a moverla hacia abajo, provocando una fuerza de tracción sobre el pistón superior (pieza fija del triaxial) que es registrada por la célula de carga. Aunque en la célula de carga se registra una fuerza de tracción, al estar sujeta al pistón superior, en realidad, se produce una fuerza de compresión sobre la muestra. Al ser contrarrestada esta fuerza incrementando  $\sigma_p$ , hasta obtener una medida en la célula de carga muy cercana a cero,

se genera una tensión axial sobre la muestra  $\sigma_a$  igual a  $\sigma_r$  (estado de tensión isótropo). Por lo tanto, la célula de carga solo registrará al tensión de corte ( $q=\sigma_a-\sigma_r$ ).

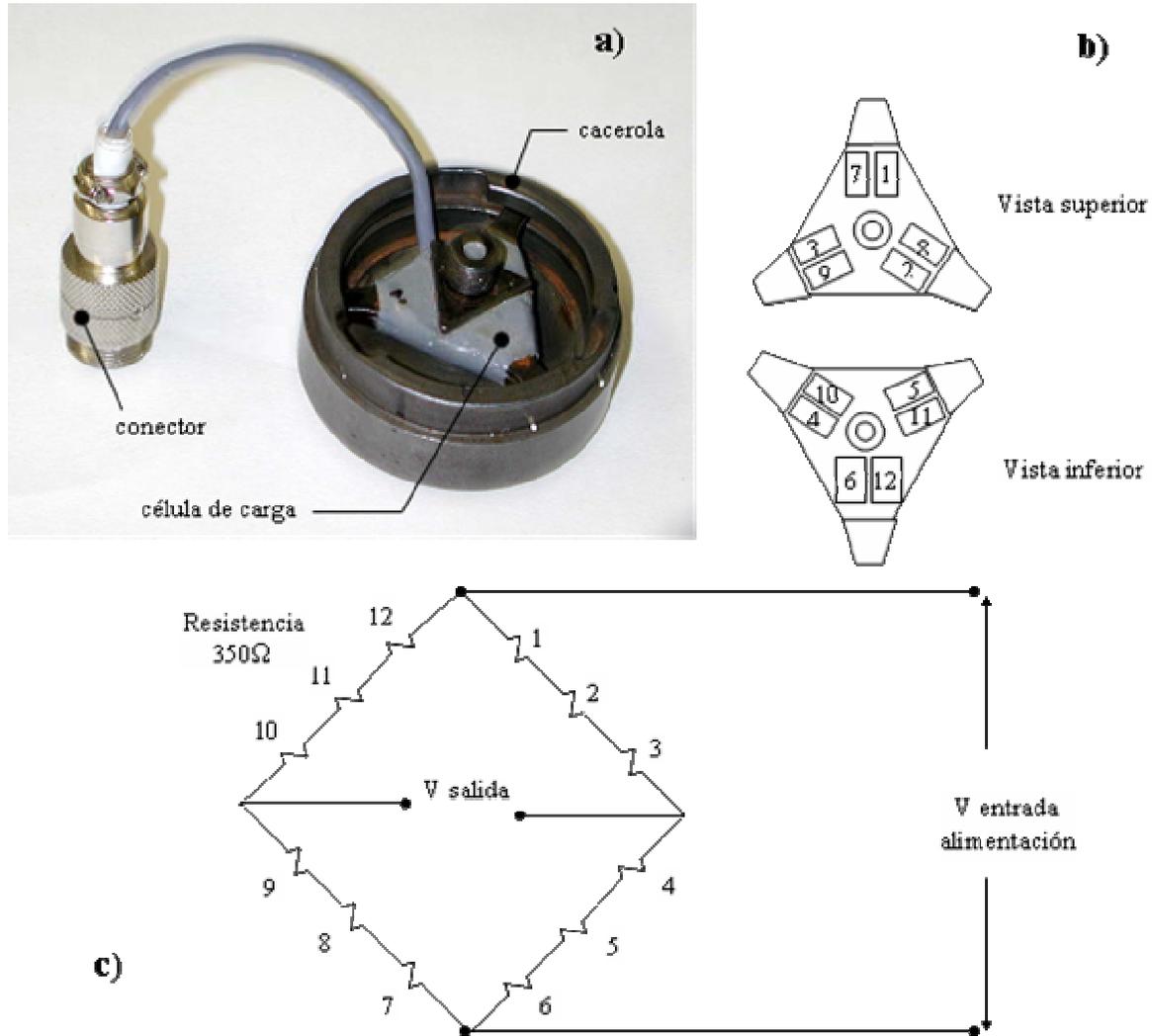


Figura 3.5 a) Fotografía de la célula de carga, b) Esquema de la ubicación de las bandas extensométricas en la célula de carga, c) diagrama del puente de Wheatstone.

Lo deseable para realizar ensayos triaxiales consiste en variar de manera controlada  $\sigma_a$ , y  $\sigma_r$ , para efectuar trayectorias con base a la tensión media neta  $p=(\sigma_a+2\sigma_r)/3-u_a=\sigma_m-u_a$ , y la tensión de corte  $q=\sigma_a-\sigma_r$ . Sin embargo, las dos presiones que pueden ser controladas directamente son la presión de confinamiento ( $\sigma_r$ ) y la presión de pistón ( $\sigma_p$ ) generada por el sistema cilindro neumático con motor paso a paso. Como  $\sigma_p$  es controlada con base a las medidas de carga axial, proporcionado por una célula de carga, es conveniente conocer la relación entre ambas. En este estudio la medida de la célula de carga estará expresada en unidades de tensión ( $q$ =medida de la célula / área de la muestra). La relación entre  $q$  y  $\sigma_p$  dependerá de los siguientes factores:

- Área efectiva (a) de aplicación de  $\sigma_p$  en el cilindro neumático con membrana de neopreno. El área efectiva, dada por el fabricante, es de 153.28 cm<sup>2</sup> (24 Sq. in ).
- Peso del pistón de carga, del pedestal y del espécimen de suelo (W)
- Área de la muestra (A).
- Presión generada por  $\sigma_r$  sobre el cabezal de la muestra. Esta presión genera una presión sobre la cacerola de la célula de carga provocando un movimiento hacia abajo del conjunto de la cazuela y pedestal, y provocando una fuerza de tracción sobre el pistón superior (parte fija del triaxial) que es leída por célula de carga. Cuando se requiere aplicar tensiones isotropas, se repone esta tensión aplicando tensiones mediante el cilindro neumático para que la tensión por compresión sea cercana a 0 (aprox. 10 kPa).
- Fricción (f) generada en el desplazamiento del vástago del cilindro neumático y del pistón de carga. Se ha buscado minimizar esta fricción usando un modelo Súper Cilindro Neumático con membrana, equipado con un vástago de acero templado que se mueve través de las líneas de cojinetes de esferas; y una pieza (casquillo guía) de acero F125 templado, colocada en la base de la cámara, que permita el paso del pistón de carga entre la cámara con el mínimo rozamiento entre piezas.
- Restricción de la membrana que cubre la muestra (se detalla en el tema de correcciones por membrana).

La tensión de corte o la tensión axial ejercida por el pistón de carga, mediante la acción del cilindro neumático, puede ser teóricamente determinada considerando el equilibrio sobre la célula de carga. La carga vertical captada por la célula de carga, C, es:

$$C = \sigma_a A - \sigma_r A \text{ ó } C = qA$$

Donde q es la tensión de corte  $q = \sigma_a - \sigma_r$

La tensión axial sobre la muestra considerando el equilibrio del pistón de carga:

$$\sigma_a A = \sigma_p a - W - f$$

La relación es obtenida entre la lectura de la célula de carga y la presión en el cilindro neumático:

$$C = \sigma_p a - \sigma_r A - W - f$$

y en términos de  $q$  ( $q=C/A$ ):

$$q = \sigma_p \frac{a}{A} - \sigma_r - \frac{W - f}{A}$$

Escrito en términos de cambios de tensión:

$$\Delta C = \Delta \sigma_p a - \Delta \sigma_r A \text{ ó}$$

$$\Delta q = \Delta \sigma_p \frac{a}{A} - \Delta \sigma_r$$

Sustituyendo por  $a=153.28 \text{ cm}^2$  y  $A=11.34 \text{ cm}^2$  :

$$\Delta q = \frac{153.28}{11.34} \Delta \sigma_p - \Delta \sigma_r, \text{ es decir, } \Delta q = 13.517 \Delta \sigma_p - \Delta \sigma_r$$

Para las condiciones donde  $\Delta \sigma_r=0$  :

$$\Delta q = 13.517 \Delta \sigma_p$$

La medida en la célula de carga presenta ligeras oscilaciones que repercute en la repetibilidad (menor a 0.9 kg), generando una variación de  $q$  menor de 8 kPa. La combinación del suministro de presión, mediante el regulador de presión controlado por un motor paso a paso, permite el control de la presión de aire que alimenta al cilindro neumático con una precisión de 0.07 kPa (equivalente a la presión dada por cada paso del motor) lo cual se traduce en una precisión de  $0.07*13.517=0.95 \text{ kPa}$  ( $0.07*a/A$ ). Por lo tanto, la precisión de la carga aplicada a la muestra estará gobernada por variación en la medida de la célula de carga. En las calibraciones efectuadas la presión mínima observada en el cilindro, registrada por el transductor de presión, es de  $8.7\pm 2 \text{ kPa}$  por lo tanto la presión mínima generada por el cilindro neumático es de  $8.7*13.517= 118 \text{ kPa}$ , sin embargo la tensión mínima registrada en la célula de carga es de solamente de  $43\pm 5 \text{ kPa}$ .

La diferencia es debida al peso ( $W$ ) del pistón de carga, más pedestal y más la probeta falsa de acero, y la fricción ( $f$ ) generada en el desplazamiento del vástago del cilindro neumático y del pistón de carga. Por lo tanto, podría considerarse que  $W+f$ , en las condiciones iniciales de carga y bajo una presión de confinamiento nula, corresponde aproximadamente a 8.5 kg (75 kPa sobre el área de contacto de la célula de carga).

Las calibraciones realizadas, utilizando una probeta falsa de acero, incrementado las presiones dentro del cilindro neumático,  $\sigma_p$ , y captando la carga recibida por la célula de carga,  $C$ , son mostradas en la Figura 3.6 y la Figura 3.7. Estas se realizaron manteniendo constante la presión de confinamiento (tensión radial,  $\sigma_r$ ) en valores de 0, 200 y 1000 kPa. La calibración en  $\sigma_r=0$  kPa fue realizada incrementando la tensión sobre la célula de carga desde 38 a 4600 kPa, mientras que las otras se realizaron hasta valores más acordes con el rango de trabajo usado en la investigación (1600 y 850 kPa). La velocidad empleada fue de 30 kPa por minuto, sobre la célula de carga. Para lograr claridad en las observaciones, las relaciones experimentales obtenidas son mostradas con líneas de tendencia en la Figura 3.6, pero en realidad están compuestas por un gran número de datos que presentan pequeñas dispersiones con respecto a esta línea de tendencia central. En la Figura 3.7 se muestra una vista ampliada de las calibraciones para  $\sigma_r$  igual a 0 y 200 kPa, observándose la dispersión de los datos debido al grado de precisión en las mediciones dada por el transductor de presión (en la presión de pistón  $\sigma_p$ ) y por la célula de carga (en la tensión de corte  $q$ ). Las relaciones experimentales son obtenidas, mediante líneas de tendencia (regresión por mínimos cuadrados), considerando la totalidad de datos registrados en cada ciclo.

En la Figura 3.6 y Figura 3.7 se observa que la relación teórica entre  $\Delta q$  y  $\Delta\sigma_p$  (13.517) difiere de las relaciones experimentales. Esto es más notorio para el caso  $\Delta\sigma_r=0$ , sin embargo, la relación obtenida mediante la calibración tiende a ser bastante similar a la relación teórica a medida que se incrementa  $\sigma_p$ . Cuando  $\Delta\sigma_r=0$  la relación experimental es cercanamente paralela a la teórica arriba de  $\sigma_p=200$  kPa (aproximadamente  $q=2500$  kPa). Adicionalmente, la relación experimental es muy cercana a la teórica para los casos de  $\Delta\sigma_r=200$  kPa y  $\Delta\sigma_r=1000$  kPa.

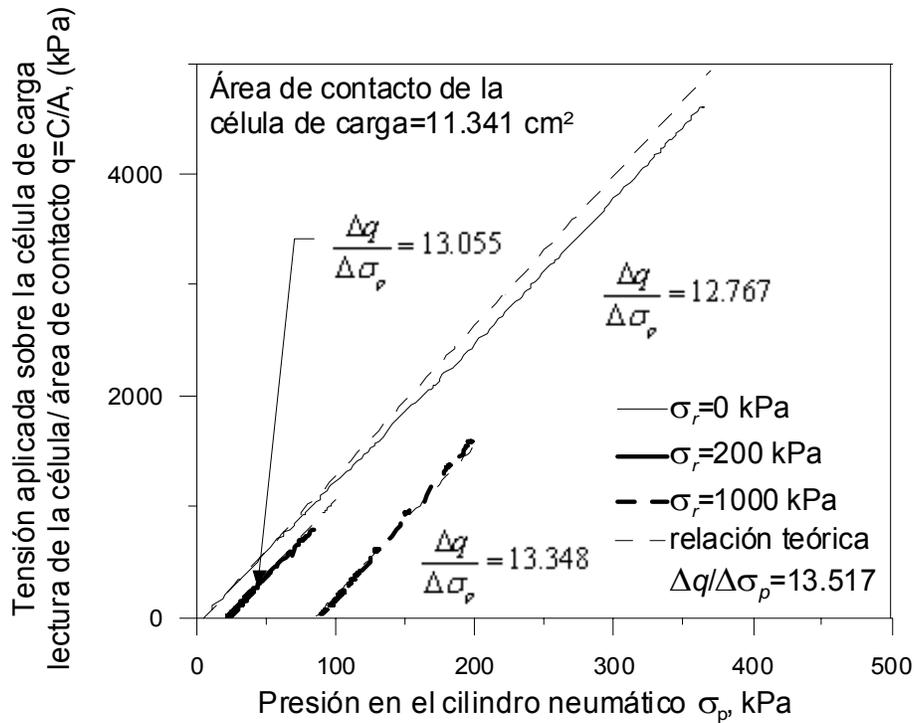


Figura 3.6 Relación, experimental y teórica, entre las presiones dentro del cilindro neumático ( $\sigma_p$ ) y la medida de tensión registrada en la célula de carga ( $q=C/A$ ), bajo presión de confinamiento (tensión radial,  $\sigma_r$ ) constante de: 0, 200 y 1000 kPa.

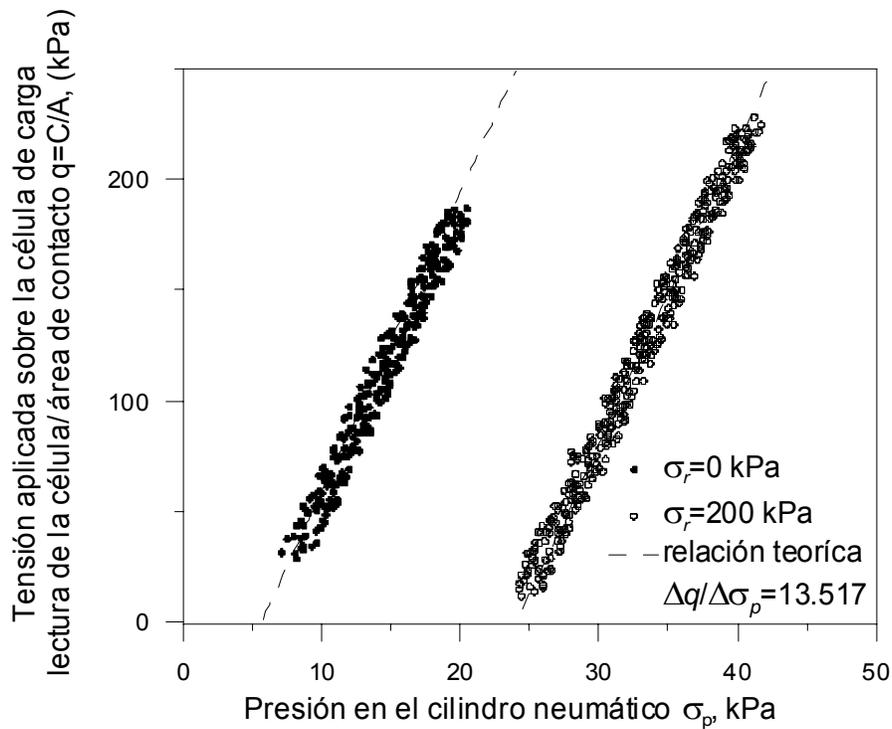


Figura 3.7 Vista ampliada de la relación, experimental y teórica, entre las presiones dentro del cilindro neumático ( $\sigma_p$ ) y la medida de tensión registrada en la célula de carga ( $q=C/A$ ), bajo presión de confinamiento (tensión radial,  $\sigma_r$ ) constante de: 0, y 200 kPa.

### 3.3.2.3.3 Efecto de la presión de confinamiento sobre la aplicación de la tensión de corte.

La aplicación de la presión de confinamiento  $\sigma_r$  resulta en presión sobre toda la superficie lateral del espécimen y sobre la cacerola de la célula de carga, provocando un movimiento hacia abajo del conjunto de la cacerola y pedestal. Este último efecto produce una medida, en la célula de carga, de tensión de corte negativa, tal como se deduce de la relación:  $q = \sigma_p \frac{a}{A} - \sigma_r - \frac{W}{A}$ .

Por lo tanto, para poder mantener constante la medida de tensión de corte es necesario incrementar la presión de pistón de forma que se compense este efecto. En realidad, el cambio en la medida de tensión de corte generada por  $\Delta\sigma_r$  es solo el producto de la tracción que sufre la célula de carga, y al compensar este efecto, incrementando la presión en el pistón, para obtener  $\Delta q=0$  y mantener sin cambio la lectura registrada en la célula de carga, se genera una tensión axial sobre la muestra que será  $\Delta\sigma_a=\Delta\sigma_r=13.517\Delta\sigma_p$ . Es decir, para realizar una trayectoria de tensiones isotropa basta con mantener la tensión de corte constante controlando la presión del pistón. Para trayectorias no isotropas la tensión axial estará dada por  $\Delta\sigma_a=\Delta\sigma_r+\Delta q=13.517\Delta\sigma_p$ , es decir la  $\Delta\sigma_a$  total será el resultado de la tensión de corte (deducida de la medida de la célula de carga) más la tensión axial que compensa el efecto de la presión de confinamiento (que será igual a la presión de confinamiento).

Se realizaron calibraciones utilizando una probeta falsa de acero con el fin verificar el comportamiento del sistema de aplicación de tensiones del equipo triaxial ante incrementos de la presión de confinamiento. Estas se realizaron incrementando la presión de confinamiento (tensión radial,  $\sigma_r$ ) hasta 800 kPa, mientras que la tensión de corte es mantenida constante en  $20\pm 5$  y  $25\pm 5$  kPa mediante incrementos de la presión de pistón que compense el efecto señalado. El sistema automatizado de regulación de presión con motor paso a paso es programado para controlar el incremento de la presión del pistón ante los cambios de medida registrados en la célula de carga. Considerando  $\Delta q=0$  en la ecuación  $\Delta q = 13.517\Delta\sigma_p - \Delta\sigma_r$ , la relación teórica entre los incrementos de presión de confinamiento y presión de pistón será:

$$\frac{\Delta\sigma_r}{\Delta\sigma_p} = 13.517.$$

En la Figura 3.8 se muestran líneas de tendencia de los incrementos de la presión de confinamiento con el respectivo incremento de la presión de pistón resultante para mantener la tensión de corte constante en  $20\pm 5$  y  $25\pm 5$  kPa. La línea de tendencia es estimada con regresión por mínimos cuadrados. En la Figura 3.9 se muestran todos los datos correspondientes a la tensión de corte igual a  $25\pm 5$  kPa. En esta figura se observa la dispersión de los resultados con su línea de tendencia.

Debido a que las relaciones experimentales obtenidas  $\Delta\sigma_r / \Delta\sigma_p$ , ante incrementos de  $\Delta\sigma_r$  (13.505 en  $q=20\pm 5$  y 13.452 en  $q=25\pm 5$ ) son bastantes similares a la teórica (13.517), y a que la dispersión de los resultados observada en la Figura 3.9 es poco significativa ante las presiones aplicadas, se considera adecuado el funcionamiento del sistema de automatizado para aplicar trayectorias isótropas de tensiones. Con base a la pequeña diferencia existente entre las relaciones experimentales en carga y descarga de presión de confinamiento, se considera que el efecto de la histéresis por descarga de la presión de confinamiento es despreciable.

La dispersión de los resultados mostrados en la Figura 3.9 es función de la precisión alcanzada en la aplicación de las presiones mediante el sistema de control automatizado (aproximadamente  $\pm 1$  kPa) y la precisión existente en las medidas obtenidas en la célula de carga. La calibración efectuada en  $q=20\pm 5$  kPa se realizó con presión de confinamiento de 30 a 400 kPa, observándose que no fue posible aplicar una tensión de corte menor a 25 kPa, cuando se aplicaron presiones de confinamiento menores a 25 kPa, debido a la restricción que posee el equipo para proporcionar una presión menor a  $8.7\pm 2$  kPa en el cilindro neumático. La calibración en  $q=25\pm 5$  kPa se inició a partir de una presión de confinamiento de 85 kPa. Para alcanzar la condición inicial en esta calibración, sin exceder  $q=25\pm 5$  kPa, la presión de confinamiento se incremento de 0 a 85 kPa, sin suministrar tensión axial mediante la presión de pistón y manteniendo fijo el pistón de carga (bloqueado, para tener condiciones de  $q=0$  kPa).

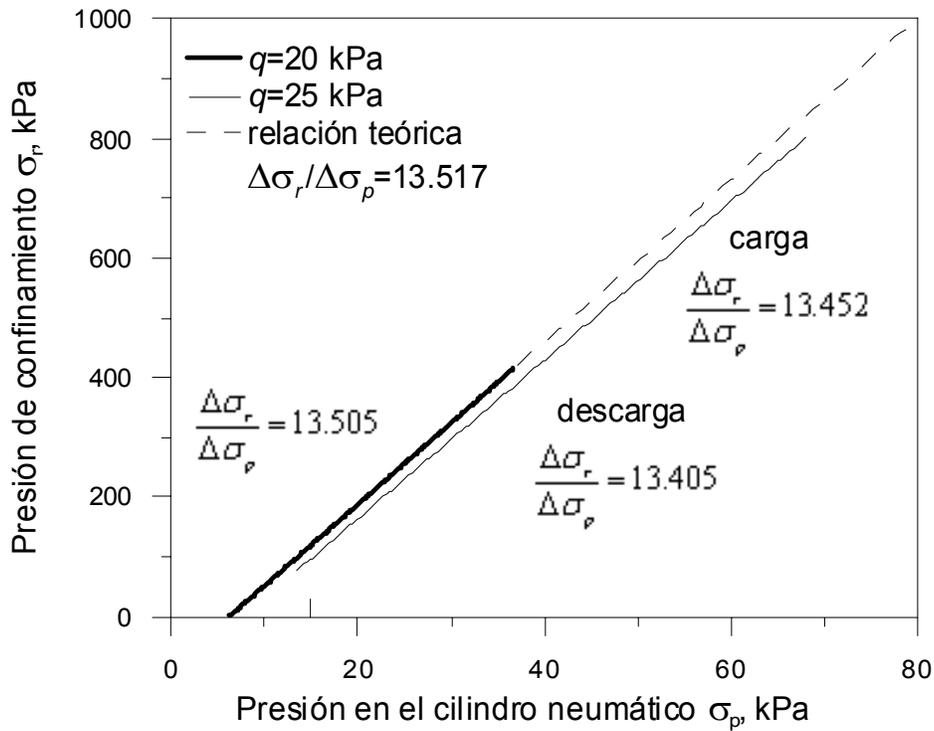


Figura 3.8 Relación, experimental y teórica, entre la presión de confinamiento (tensión radial,  $\sigma_r$ ) y la presión dentro del cilindro neumático ( $\sigma_p$ ), bajo tensión de corte ( $q$ ) constante de: 20 y 25 kPa.

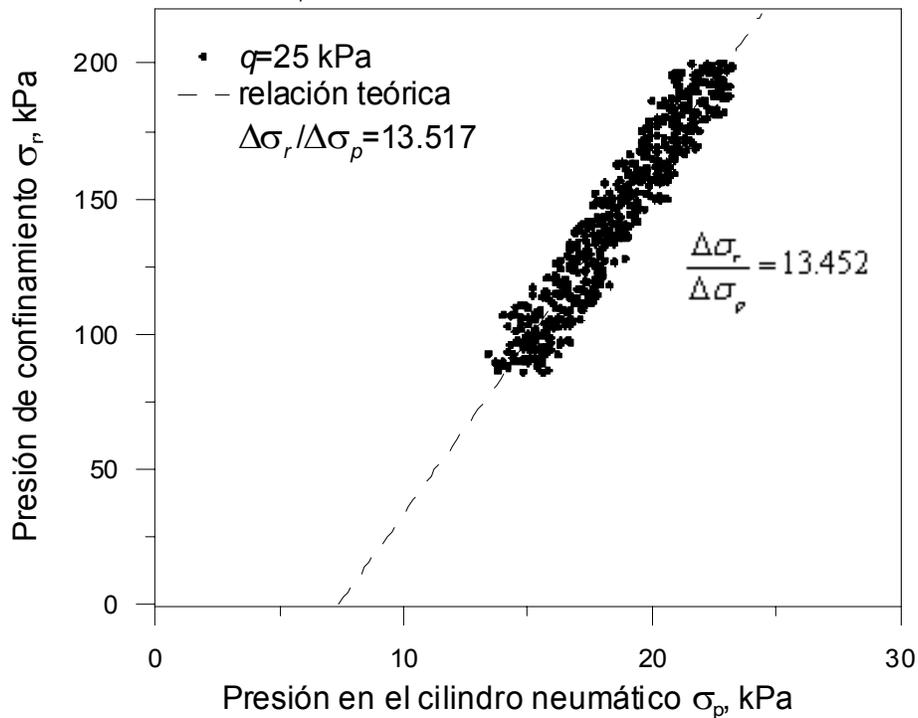


Figura 3.9 Vista ampliada de la relación, experimental y teórica, entre la presión de confinamiento (tensión radial,  $\sigma_r$ ) y la presión dentro del cilindro neumático ( $\sigma_p$ ), bajo tensión de corte ( $q$ ) constante de: 20 y 25 kPa.

### 3.3.2.4 Control de la succión matricial.

#### 3.3.2.4.1 Traslación de ejes.

La succión matricial es aplicada usando la técnica de traslación de ejes (Hilf, 1956). Este procedimiento comprende una traslación de la presión intersticial en el suelo aplicando presiones positivas de aire ( $u_a$ ) y agua ( $u_w$ ) para proporcionar una diferencia igual a la succión matricial ( $u_a - u_w$ ) prescrita. Una piedra de alto valor de entrada de aire (AVEA) es usada como una interfase entre el suelo no saturado y el sistema de medida de flujo de agua evitando el paso de aire libre dentro del agua del sistema. Una característica notable del equipo es la posibilidad de la aplicación simultánea de las presiones de aire y agua requeridas para el control de la succión matricial ( $u_a - u_w$ ), en los dos frentes extremos de la probeta. Tanto el cabezal como el pedestal poseen una combinación de dos diferentes piedras porosas (números 11 y 12 de la Figura 3.1 y Figura 3.10): un disco cerámico interior de alto valor de entrada AVEA (7.4 mm de espesor y 24.0 mm de diámetro) conectado al sistema de presión de agua, y un anillo poroso de acero inoxidable (3.00 mm de espesor y 10  $\mu\text{m}$  de tamaño de poro), rodeando al disco cerámico y conectado al sistema de presión de aire. El disco cerámico AVEA tiene un valor de entrada de aire de 1.5 MPa (los discos son ensamblados como se presenta en el inciso b) de la Figura 3.10). De esta manera, las presiones de aire y agua pueden ser aplicadas simultáneamente en ambos extremos de la muestra reduciendo considerablemente el tiempo de equilibrio, al disminuir la distancia de drenaje. Esto es una ventaja cuando se estudia el comportamiento hidromecánico de un suelo no saturado con una baja permeabilidad, pero tiene el inconveniente de atrapar aire en el centro de la muestra durante las trayectorias de humedecimiento debido al avance por dos frentes extremos. Las perforaciones de los pistones de carga y superior enlazan las líneas de presión de aire y agua a los extremos de la muestra.

Tanto el cabezal como el pedestal poseen dos orificios, ligados a la piedra cerámica AVEA, conectados por un canal en forma de espiral de 3mm de profundidad (Figura 3.10). La razón por la que se ha adoptado una doble entrada de presión de agua y el canal es para crear un flujo de agua a presión en cada uno de los conductos, que permita eliminar las burbujas de aire disueltas que se forman por difusión de aire a través de la piedra AVEA por la aplicación de la técnica de traslación de ejes. Por lo tanto, un sistema de desaireado  $u_w$  (presión de aire de salida), adicional

al sistema de presión de agua  $u_w$  de entrada, es usado para eliminar el aire disuelto que ingresa por difusión al sistema de medida de flujo de agua mediante circulación de agua realizado periódicamente. Adicionalmente, interceptores de burbujas de aire (número 24 de la Figura 3.2) que actúan como trampas de aire, están conectados al circuito de medición de cambios de volumen de agua. Si el flujo de agua que proviene de la muestra contiene burbujas de aire, al llegar al interceptor de burbujas de aire tiende a quedarse en la parte superior de la cámara, evitando que llegue a las buretas. Los cambios en el contenido de humedad en el suelo son medidos por medio de buretas provistas de instrumentación electrónica (números 25 y 26 de la Figura 3.2), conectadas a ambos discos cerámicos AVEA, siguiendo un arreglo similar al mostrado en la Figura 3.2. Se ha tomado especial cuidado en la instalación del disco cerámico (AVEA). Los discos fueron sellados en el pedestal y cabezal usando una resina especial en su perímetro, previamente limpiado con tricloroetileno para quitar la grasa del metal y del disco cerámico. 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.

La presión de agua es aplicada y mantenida constante mediante un sistema interfase aire-agua alimentada por el sistema de aire comprimido con reguladores. Generalmente las presiones de aire y agua se aplican manualmente. Sin embargo, se realizaron ensayos con etapas de reducción de la succión matricial, de 120 a 210 kPa, con control en su velocidad de cambio. En este caso, la presión de agua es suministrada mediante un regulador de alta presión (rango de trabajo: 35 kPa hasta 2.8 MPa) controlado por sistema de motor paso a paso gobernado por un sistema digital tarjeta-ordenador. Para medir las presiones de aire y agua se utilizó un transductor de presión, tipo diafragma más medida de deformación por sensores capacitivos (número 22 en la Figura 3.2) con rango de trabajo de 2.5 MPa, colocado en la línea de presión entre el regulador y la interfase aire-agua. Las características de estos transductores se han descrito en el apartado 3.2.1.

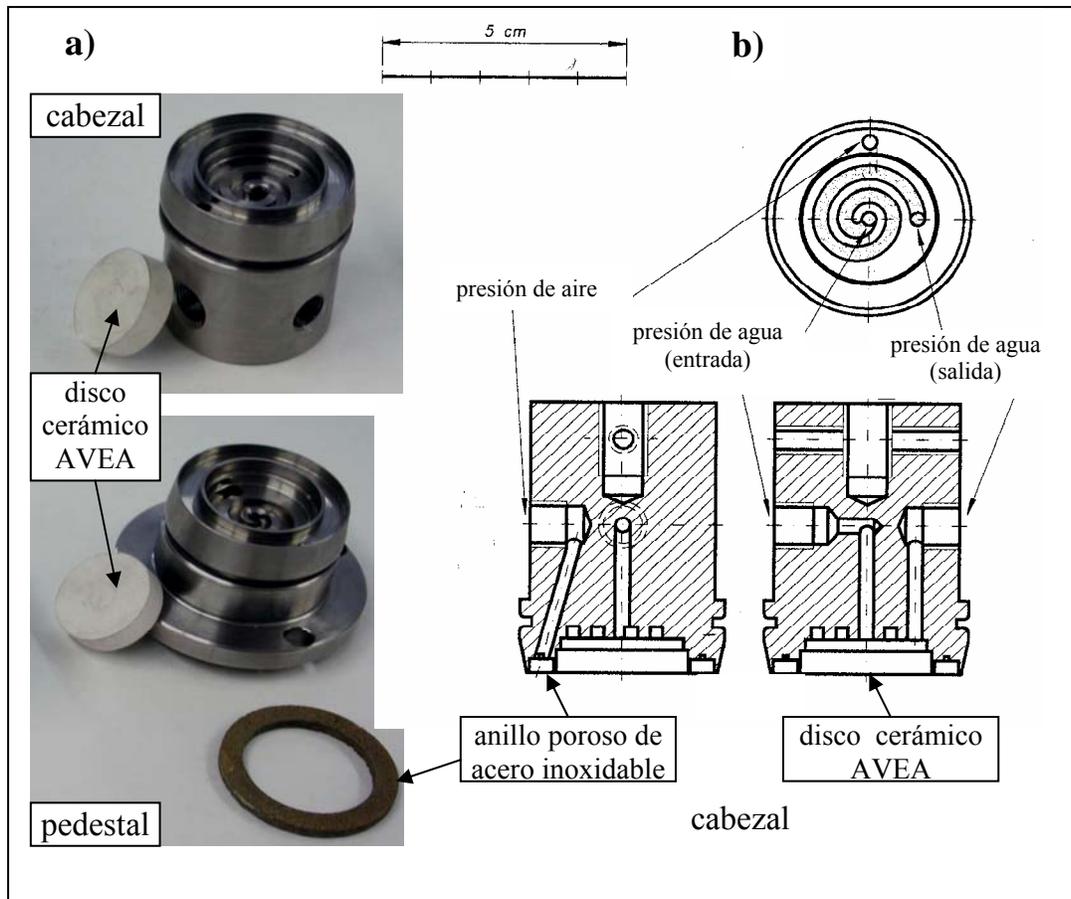


Figura 3.10 a) Fotografía de cabezal y pedestal: disco cerámico (AVEA), combinación anillo poroso de acero y diseño de la base para la eliminación del aire disuelto a través del disco cerámico; b) Esquema del sistema de aplicación de la presión de aire y agua (combinación del disco cerámico, AVEA, y anillo poroso).

### 3.3.2.5 Descripción del sistema de control automatizado de presiones.

Para automatizar la ejecución de las trayectorias de presión deseadas se utilizaron dos sistemas de reguladores gobernados mediante motores paso a paso. Para controlar la presión de confinamiento o presión de agua (en traslación de ejes) se acopló, a un regulador, un motor paso a paso modelo HN 200-3426-0140 AX08 con corriente de fase de 1.40 A, de la casa MAE, ligado a un módulo controlador bipolar GS-DC200 de la casa SGS-Thomson, que a su vez es gobernado por salidas digitales de la placa de adquisición de datos PCI-6036E. Este sistema es mostrado en la Figura 3.11 y representado con el número 20 y 21 en la Figura 3.2 El motor puede proporcionar hasta un par de 230 Ncm que es suficiente para alcanzar presiones mayores a las requeridas (25 bar). Debido a que el motor tiene un par máximo suficiente para regular la presión,

no es necesario un reductor, y solo un acoplamiento es utilizado entre el motor paso a paso y regulador.

Para controlar la presión de pistón,  $\sigma_p$ , se utilizó un sistema, realizado en el Imperial Collage, de motor paso a paso que controla un regulador de presión de precisión R27 (Figura 3.12 y número 20 y 21 en la Figura 3.2). El regulador de presión de precisión R27, con rango entre 0.14 y 8 bar, tiene una exactitud 0.02%, sensibilidad mejor que 0.3mbar y una histéresis y repetibilidad menor a 0.05%. Este regulador es alimentado con una presión de 8 bar (por especificación de fábrica la presión de alimentación máxima es de 10 bar). El sistema contiene un reductor entre el motor paso a paso y el regulador. Bajo este sistema cada pulso equivale a 0.07 kPa.

### **3.3.3 Medidas del estado de la muestra**

Los parámetros a medir deben de definir completamente el estado de la muestra en cada momento. En suelos no saturados el comportamiento mecánico bajo condiciones triaxiales se puede caracterizar conociendo el estado tensional y las deformaciones volumétricas,  $\varepsilon_v = \varepsilon_a + 2\varepsilon_r$ , y de corte,  $\varepsilon_s = 2/3(\varepsilon_a - \varepsilon_r)$ ; donde  $\varepsilon_a$  y  $\varepsilon_r$  son las deformaciones axial y radial respectivamente. Adicionalmente, en el estudio experimental de suelos no saturados es necesario conocer los cambios de humedad ante los cambios del estado de tensiones con el fin de caracterizar en forma completa su comportamiento hidromecánico. Para esta tesis se seleccionó, para describir los cambios de humedad, la relación de humedad,  $e_w = -V_w/V_s = G_s w$ , donde  $V_w$  es el volumen de agua dentro de la muestra,  $V_s$  es el volumen de sólidos,  $G_s$  es el peso específico relativo de las partículas sólidas y  $w$  es el contenido gravimétrico de agua. En algunas ocasiones también se consideró el grado de saturación,  $S_r = e_w/e = V_w/V_v$ , donde  $V_v$  es el volumen de poros de la muestra y  $e$  el índice de poros. El equipo triaxial desarrollado cuenta con sistemas que permiten medir  $\varepsilon_a$ ,  $\varepsilon_v$  (o preferiblemente sus componentes  $\varepsilon_a$  y  $\varepsilon_r$ ) y  $V_w$ . La medida de deformación volumétrica,  $\varepsilon_v$ , puede ser realizada tanto para una escala global como local. La medida global proporciona un dato de toda la sección de la muestra y la medida de deformación local proporciona un dato puntual en la muestra. La medida del cambio del contenido de humedad en la muestra es obtenida para toda la muestra, representando una medida global.



Figura 3.11 Sistema de motor paso a paso modelo HN 200-3426-0140 AX08, ligado a un módulo controlador bipolar GS-DC200, operando sobre un regulador de alta presión (rango de trabajo: 35 kPa hasta 2.8 MPa). Es usado para controlar la presión de confinamiento o presión de agua (en traslación de ejes).

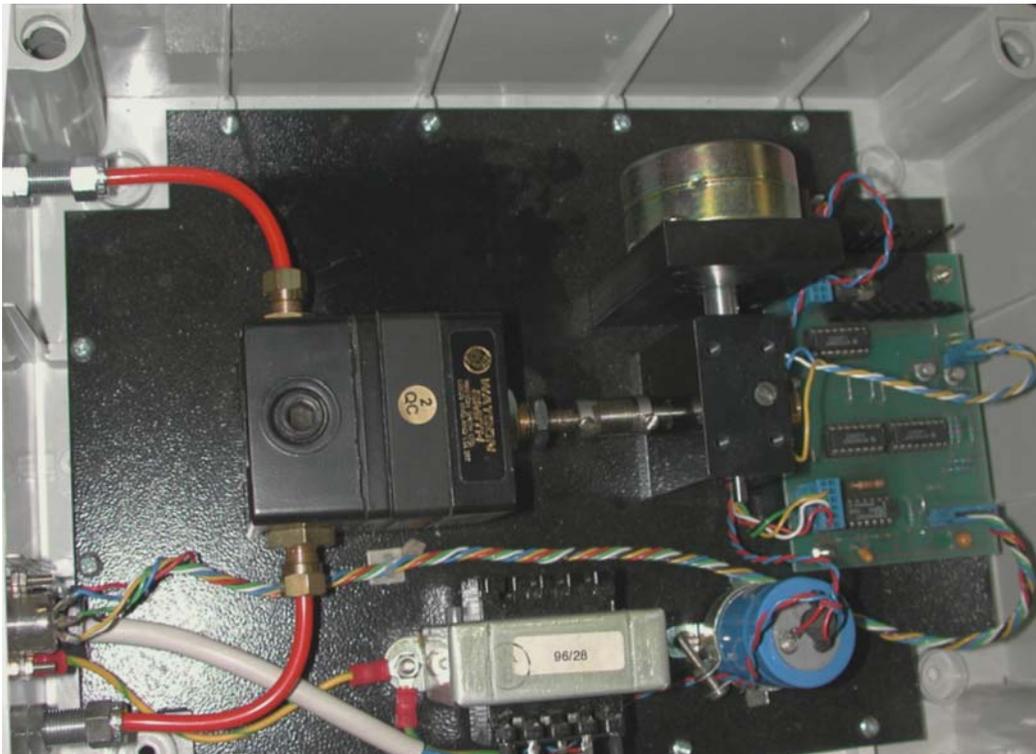


Figura 3.12 Sistema de motor paso a paso que controla un regulador de presión de precisión R27 con rango entre 0.14 y 8 bar. Este sistema fue realizado en el Imperial Collage, y es usado para controlar la presión de aire que entra al cilindro neumático Bellofram ( $\sigma_p$ ).

### **3.3.3.1 Medidas de cambio de volumen.**

El cambio de volumen de la muestra es calculado a partir de las medidas de las dimensiones de la muestra (altura y diámetros). Los dispositivos de medida axial y radial, colocados en este equipo triaxial, permiten obtener cambios de volumen tanto de forma local como global. El monitoreo del cambio de volumen de la muestra se realiza de forma local a partir de sensores desplazamiento sujetos sobre la muestra, midiendo las deformaciones axial internamente y un sistema de sensor láser electro-óptico (utilizado por Romero et al., 1997) midiendo la deformación local radial durante el ensayo. Las medidas directas de deformación en especímenes de suelo presentan algunas dificultades: los sensores son difíciles de fijar en suelos de baja resistencia y la necesidad de obtener medidas en varios puntos para dar el cambio de volumen total, debido a la deformación no uniforme de la muestra causada por las restricciones en los bordes.

Adicionalmente, el cambio de volumen global puede ser obtenido moviendo verticalmente el sensor por medio de un motor eléctrico. Los desplazamientos laterales son relacionados con los desplazamientos verticales del sensor medidos con LVDTs externos colocados sobre la base de movable. Con base a estos registros se obtienen perfiles de la muestra que permiten obtener valores precisos de cambios de volumen global. En los perfiles, también, pueden ser apreciados los patrones de deformación no homogénea, irregularidades en la deformación muestra (como son pequeñas inclinaciones), e irregularidades de la superficie de la membrana.

### **3.3.3.2 Transductores de desplazamiento axial.**

El desplazamiento axial de la muestra es obtenido tanto con un sistema de medida interna local como un sistema de medida externa global. Medidas internas del desplazamiento axial de la muestra fueron realizadas con el fin de evitar los errores de apoyo de los bordes del espécimen en contacto con el cabezal y pedestal, y los errores por la deformación del sistema de aplicación de carga del triaxial (incluyendo la célula de carga). En adición, medidas externas son realizadas para corroborar las medidas locales y tener la deformación axial cuando los transductores para medidas internas han rebasado su rango de trabajo.

### 3.3.3.2.1 Descripción de los LVDTs.

Los desplazamientos axial se miden internamente mediante dos transductores LVDTs miniatura modelo SM3 de Solartron (LVDT 1 y LVDT 2), adheridos a la membrana, en lados opuestos, cubriendo la parte central de la muestra (longitud inicial de 35 mm; referir a Figura 3.13 y número 2 de la Figura 3.1 ). Las características de fábrica son: rango de trabajo  $\pm 3$  mm; no linealidad de 0.3% de 6 mm; peso del núcleo incluyendo cables, 1.5 g. Los LVDTs están conectados a módulos de acondicionamiento BICM (Boxed inline conditioning module) que son alimentados por fuentes de  $\pm 15$  V dc y proporcionan una salida de  $\pm 10$  V para el rango de escala total. El convertidor está conectado a un ordenador donde es posible visualizar la evolución del desplazamiento axial. Estos transductores LVDTs fueron cuidadosamente calibrados. Las curvas de calibración presentadas en el anexo 1 muestran una adecuada linealidad. La sensibilidad operativa son:  $0.820 \mu\text{m/mV}$  en LVDT1 y  $0.920 \mu\text{m/mV}$  en LVDT 2, con una resolución de A/D de  $0.2 \mu\text{m}$ . Los errores por no linealidad e histéresis se encuentra entre  $\pm 0.20$  y  $\pm 0.18\%$  del fondo de escala. Las principales características de estos transductores se presentan en la Tabla 3.1 y

Se han montado los LVDTs en la muestra mediante un sistema de collares y platos bases, de PVC, que son adheridos a la membrana de látex como se muestra en la Figura 3.13 y la Figura 3.1 Para el montaje de estos transductores se utilizó una guía que permite la fijación de los collares y bases a la misma altura en todos los ensayos. Para la adherencia con la membrana se usó un pegamento instantáneo de tipo cianoacrilato. Se ha intentado mantener al mínimo la interferencia con el comportamiento real de la muestra. En este sistema el vástago es libre de moverse dentro del núcleo del LVDT permitiendo acomodarse y rotar para mantener las mediciones a pesar de la deformación no uniforme (abombamiento) que sufre la muestra en grandes deformaciones. La salida de los LVDTs resultaron ser insensitivos a los cambios de presión de confinamiento sobre el rango de trabajo experimentado en las pruebas (entre 0.2 y 1.2 MPa). Sin embargo, cuando la muestra sufre grandes deformaciones el rango de trabajo de los LVDTs (deformación de 0.171) es superado por lo cual las medidas internas obtenidas con este sistema no pueden usarse. Adicionalmente, en esas condiciones se observa deslizamientos de la membrana con respecto a la muestra y los cambios en la deformación no uniforme del suelo son considerables.

Un LVDT modelo B7.5 de Solartron con rango de trabajo de  $\pm 7.5$  mm (Figura 3.14 y número 6 en la Figura 3.1 ), fijado en el pistón de carga (número 19 en la Figura 3.1 ), permite obtener medidas externas de deformación axial que son utilizadas cuando las medidas internas de deformación no sean confiables. Este LVDT, también, está conectado a un módulo de acondicionamiento BICM (Boxed inline conditioning module) que es alimentado por una fuente de  $\pm 15$  Vdc. La salida proporcionada por el módulo, hacia el convertidor A/D es de  $\pm 10$  V para el rango de escala total, operando con una sensibilidad operativa de  $0.7386 \mu\text{m/mV}$  y una resolución A/D de  $0.2 \mu\text{m}$ . El rango de trabajo de este dispositivo corresponde a una medida de deformación axial de  $0.197$ , sin embargo es posible medir deformaciones más altas, superiores a  $0.25$ , reposicionando el LVDT antes de que se supere su rango de trabajo durante los ensayos. La curva de calibración presentadas en el anexo 1 muestran una adecuada linealidad, con un error por no linealidad e histéresis de  $\pm 0.15\%$  del fondo de escala. Las principales características de este transductor se presentan en la Tabla 3.1 y

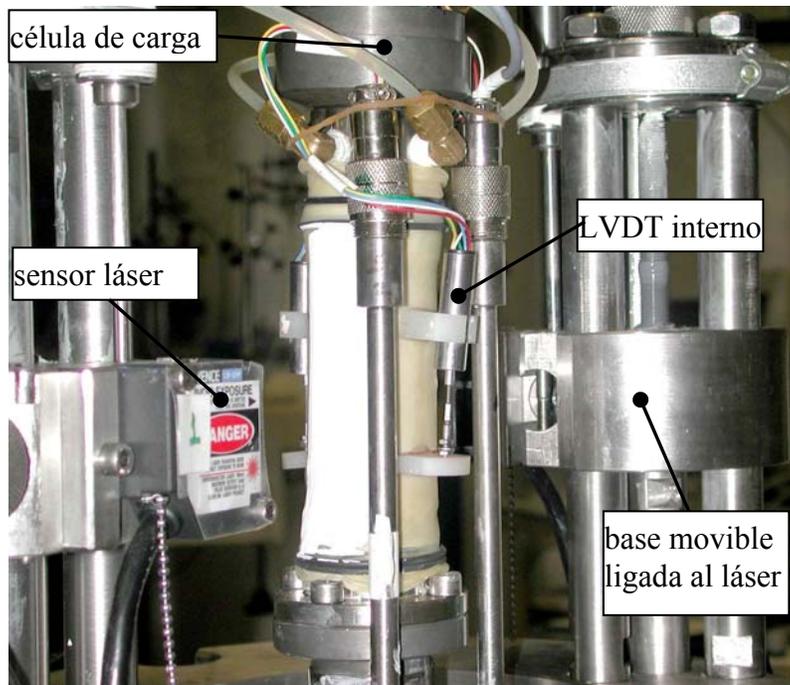


Figura 3.13 Montaje inicial de la muestra: instalación de los LVDTs internos, colocación de pintura y montaje del pedestal con la célula de carga.

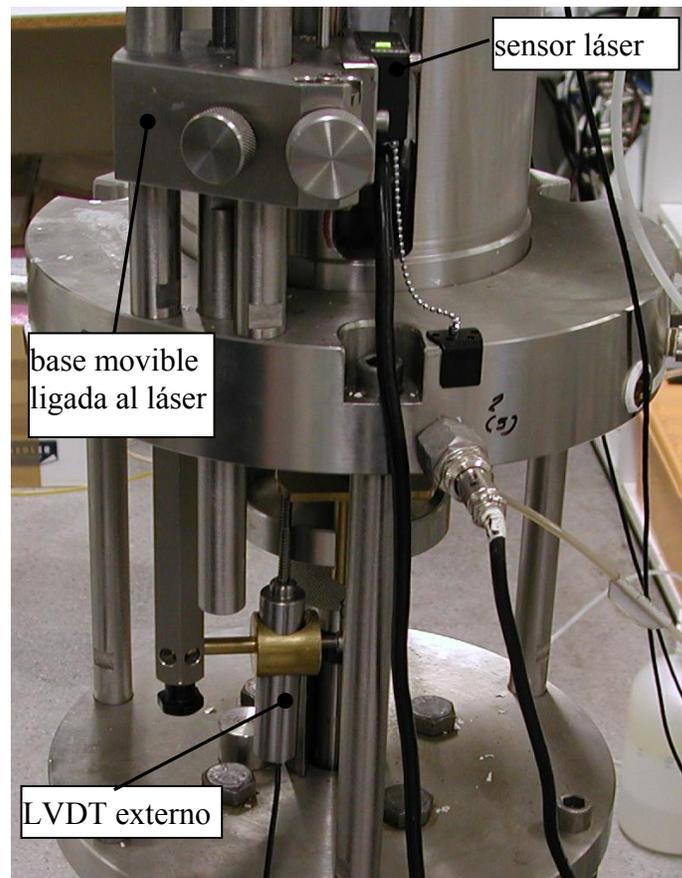


Figura 3.14 Dispositivos externos de medida: LVDT externo y sensor láser sujeto a una base móvil.

### **3.3.3.2 Efecto de la deformación del equipo sobre la medida externa de la deformación axial.**

Las deformaciones axiales medidas en forma externa pueden tener errores debido a la deformación del equipo, la inclinación del cabezal al ser montada la muestra (causando la falta de paralelismo) y por la falta de un adecuado contacto entre el cabezal y la probeta (Baldi et al., 1988; Scholey et al., 1995). En nuestro caso, donde se mide el desplazamiento del pistón de carga, la deformación del equipo será resultado de la suma de las deformaciones del pistón, de la célula de carga, del cabezal y de la piedra porosa. El efecto de la falta de alineamiento y de buen contacto entre el cabezal y la probeta fue reducido fijando al cabezal y la célula de carga con el pistón superior que se mantiene en posición fija debido al tornillo de bloqueo de carga (números 17 y 18 de la Figura 3.1). Este arreglo permite mantener el alineamiento entre el pistón de carga, la probeta y el cabezal.

Para obtener la deformación del equipo ante la aplicación de cargas se midieron las deformaciones correspondientes a incrementos y decrementos de tensión de corte (que genera el movimiento del pistón de carga), bajo diferentes presiones de confinamiento. La muestra es sustituida por un cilindro de acero de 38 mm de diámetro por 76 mm de altura (probeta falsa), que se considera indeformable con estas cargas de trabajo, y las deformaciones registradas se deben exclusivamente al aparato. La deformación del equipo considera todos los desplazamientos desarrollados entre dos puntos de referencia externos: el tornillo de bloqueo de carga (números 17 de la Figura 3.1 que se considera fijo) y la base del pistón de carga (número 19 de la Figura 3.1 que es desplazado hacia arriba, generando una tensión de axial). El LVDT registra el desplazamiento del pistón de carga, y por lo tanto la medida obtenida incluye la deformación de la célula de carga, del cabezal, del pedestal, del pistón superior y del pistón de carga, así como errores de asentamiento debido a los acoplamientos entre los diferentes elementos indicados previamente. Las piedras porosas y cerámicas AVEA no experimentan deformaciones al estar contenidas dentro del cabezal y del pedestal. Los errores de acoplamiento por irregularidades en la superficie de las interfases entre probeta y el pedestal (o cabezal) 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 superficies horizontales son obtenidas en los bordes).

Los resultados de estas calibraciones se presentan en la Figura 3.15 y la Figura 3.16. En la Figura 3.16 son mostrados los resultados, con todos los registros obtenidos, de un ciclo carga-descarga, mientras que en la Figura 3.15 sólo se presentan las tendencias seguidas por los datos, obtenidos en ciclos de carga, para proporcionar una mejor claridad. La velocidad de aplicación de tensión es de 30 kPa por minuto. Un ciclo carga–descarga, previo a la calibración, fue aplicada para eliminar el asentamiento inicial en el contacto entre la cacerola y la estrella de la célula de carga.

Un primer ciclo de calibración, incrementando la tensión de corte,  $q$ , de 85 kPa a 2000 kPa se realizó sin presión de confinamiento y un segundo ciclo se efectuó incrementando la tensión de corte de 43 a 1500 kPa bajo una presión de confinamiento de 1000 kPa. Las tendencias de los resultados de estos dos primeros se muestran en la Figura 3.15. Los resultados muestran que no existe una diferencia apreciable de las deformaciones del equipo por efecto de la presión de

confinamiento. Los desplazamientos totales medidos externamente en los ensayos, para una trayectoria de carga o descarga, son corregidos restando la deformación del equipo de acuerdo a la expresión polinomial presentada en la Figura 3.15. También es posible usar la ecuación  $def(\%)=0.00016q+0.0077$  para estimar las deformaciones del equipo triaxial cuando la tensión de corte es mayor a 200 kPa debido a la linealidad que es observada en la curva de calibración en ese intervalo de tensiones.

El tercer ciclo de carga y descarga entre 43 y 120 kPa, sin presión de confinamiento, fue realizado para observar los errores por histéresis dentro del rango de tensión de corte en que se prevé la realización de trayectorias descarga en los ensayos del presente estudio. El error por histéresis de la deformación del equipo llega a ser mayor a un 0.005% (4  $\mu$ m) de deformación axial referido a la altura de la probeta (76 mm). Este error es menor al obtenido por no linealidad e histéresis del LVDT (30  $\mu$ m para un fondo de escala de 15 mm). Sin embargo, este error es muy alto si consideramos que se presentarán pequeñas deformaciones en esta trayectoria de tensiones. Por lo tanto, en el presente estudio, en las trayectorias de carga-descarga-recarga se consideraran como más representativas las medidas internas de las deformaciones axiales. Otros ciclos de calibración han sido realizados incrementando la presión de confinamiento bajo tensiones de corte constantes. Los resultados muestran que la deformación del equipo experimentada por cambios de la presión de confinamiento es despreciable (menor a 10  $\mu$ m en el rango de tensiones realizadas en el estudio).

### **3.3.3.3 Transductores de desplazamiento radial.**

#### **3.3.3.3.1 Descripción de los sensores láser electro-ópticos.**

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. Para proporcionar medidas confiables los sistemas de medida de desplazamiento radial deben de satisfacer las siguientes condiciones (Kolymbas y Wu, 1989; Romero, 1999):

- ser estables en ensayos de larga duración, precisión y tener una alta resolución en deformaciones (de al menos  $10^{-2}$  %),
- ser capaces de medir grandes desplazamientos,

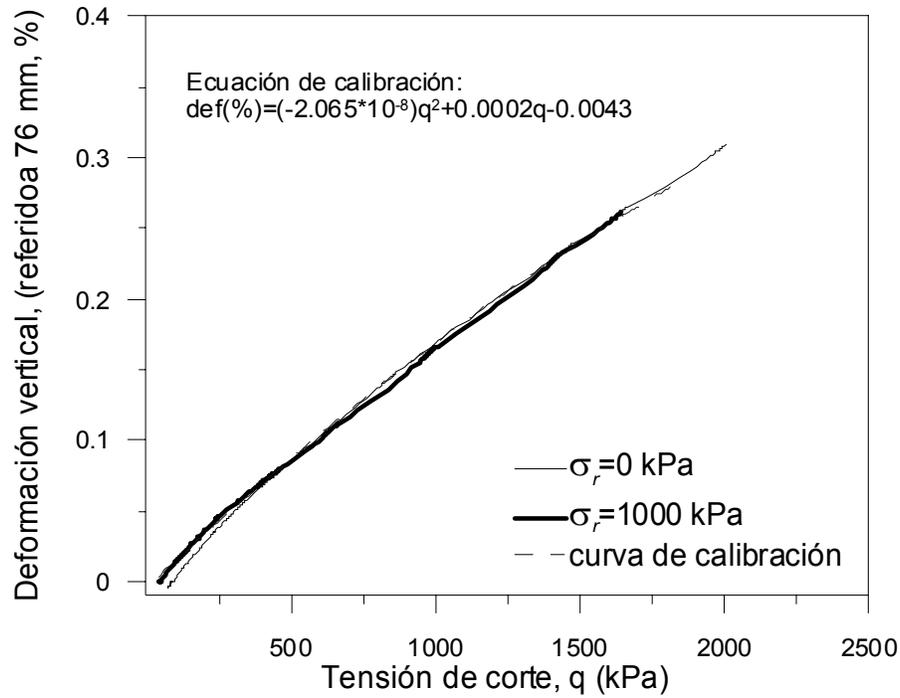


Figura 3.15 Resultados de la deformación vertical del sistema de aplicación de carga por incrementos y decrementos de la tensión de corte a una velocidad de 30 kPa por minuto, bajo presiones de confinamiento constantes ( $\sigma_r$ ) de 0 y 1000 kPa.

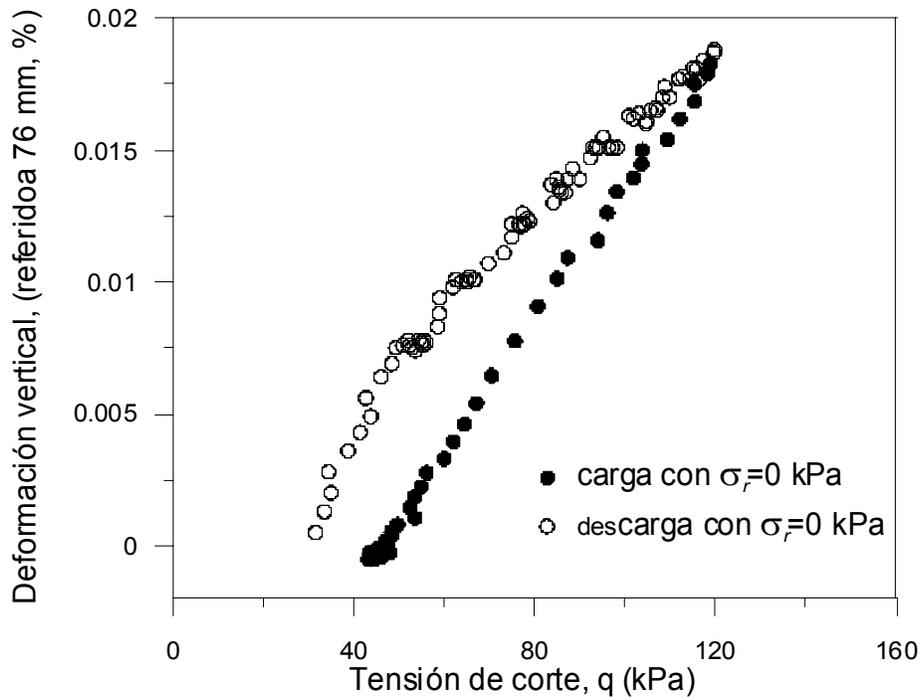


Figura 3.16 Resultados de la deformación vertical del sistema de aplicación de carga en un ciclo de carga-descarga sin presión de confinamiento ( $\sigma_r = 0$ ).

- tener mínima influencia sobre la deformación de la muestra, evitando restringir o cargar la muestra,
- ser capaz de medir grandes deformaciones en varios sitios de la muestra,
- 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 confinamiento,
- ser simples de operar e instalar, y
- poder registrar los datos en forma automatizada

En la literatura sobre estos sistemas de medida se han presentado varios sistemas que proporcionan medidas bastantes exactas, pero es difícil de satisfacer todos los puntos arriba señalados, en especial con respecto a la posibilidad de obtener mediciones en varios sitios de la muestra, de no ser afectados por los cambios de presión de confinamiento y en la simplicidad para operar y ser instalados. Con base a lo anterior, se optó por usar sistema de sensor láser electro-óptico, de amplio rango (utilizado por Romero et al., 1997 y Barrera, 2002), que proporciona una alta exactitud dentro de un amplio rango de mediciones, y desde diferentes distancias entre el sensor y el objeto. Este sistema es instalado externamente a la célula triaxial (véase Figura 3.13, Figura 3.14 y número 3 en la Figura 3.1 con el fin de no influir en la deformación de la muestra y evitar ser afectado por las variaciones de la presión de confinamiento. Esta posición, también, permite detectar los desplazamientos laterales a lo largo del perfil de la muestra con la ayuda de un motor.

Los sensores láser electro-ópticos se basan en el principio de la técnica de triangulación, el cual se muestra en la Figura 3.17. 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  $\pm 10$  mm a una distancia de referencia de 40 mm (ver Figura 3.17a), resolución de 2  $\mu\text{m}$  a una respuesta de 60 ms (frecuencia de respuesta de 6 Hz), no-linealidad alrededor de 10  $\mu\text{m}/\text{mm}$ , sensibilidad obtenida entre 1  $\mu\text{m}/\text{mV}$  y 2  $\mu\text{m}/\text{mV}$ .

Las deformaciones radiales fueron medidas sobre dos lados diametralmente opuestos mediante sensores láser electro-ópticos montados fuera de la cámara, en soportes rígidos sujetos a la base de la celda triaxial. El equipo es posicionado a una distancia de aproximadamente 45 mm desde el cabezal del sensor hasta la superficie objetivo sobre la muestra, por medio de un tornillo micrométrico. Un indicador de señal auxilia la colocación del sensor en el centro del rango. El láser transmisor y el sensor receptor proporcionan una resolución de 2  $\mu\text{m}$  (resolución de deformación de  $5 \times 10^{-5}$ , que es del mismo orden que la medida local de deformación axial). 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). 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. Romero (1999) presentó una extensa descripción de los principios básicos de operación este sistema de medición instalado en un equipo triaxial.

Calibraciones, utilizando una probeta falsa de acero, han sido realizadas con el fin de investigar los efectos de refracción sobre la señal de salida, causados por los diferentes medios transparentes que interfieren entre el cabezal sensor y la superficie de objeto. En la Figura 3.17 se representa el efecto de refracción sobre la respuesta al sensor. 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. Por lo tanto, es indispensable realizar las calibraciones usando el mismo esquema de montaje de ensayos. El procedimiento de calibración consistió en desplazar el cabezal sensor con respecto a un punto fijo, registrando la señal de salida del láser que actúa sobre una probeta falsa de acero, cubierta con una membrana latex, y siguiendo el mismo montaje ejercido en los ensayos triaxiales. El desplazamiento fue medido mediante un micrómetro certificado de alta resolución (0.001 – 5 mm) posicionándolo en contacto con el cabezal sensor.

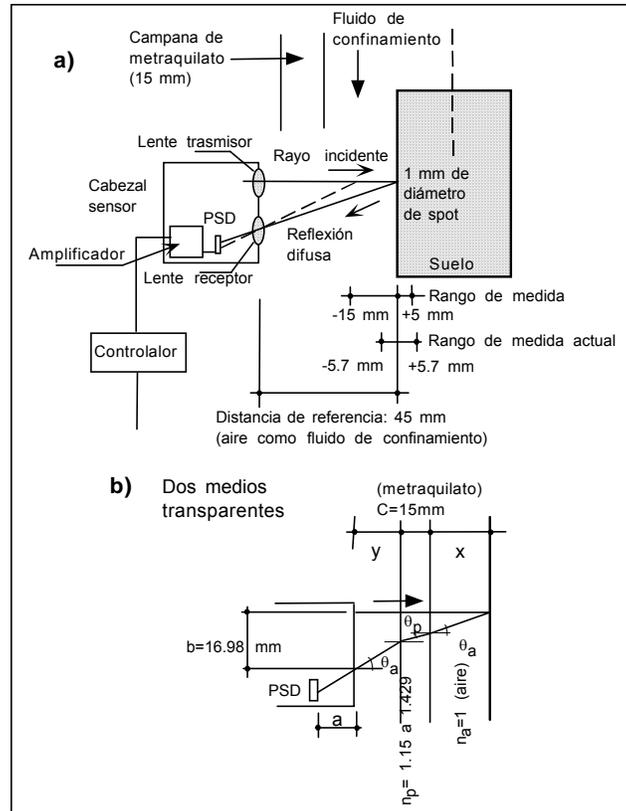


Figura 3.17 a) Esquema del cabezal sensor de deformación radial y técnica de triangulación óptica. b) Efecto de la refracción sobre el cabezal sensor (Romero, 1999).

En la Figura 3.18 se presentan las curvas de calibración para diferentes medios transparentes (aire y aire-metacrilato-aire) y con dos diferentes presiones de confinamiento ( $\sigma_r=0$  y 1500 kPa, en el medio transparente aire-metacrilato-aire). Las curvas de calibración muestran una adecuada linealidad, tanto para un medio transparente (aire) como para con dos medios transparentes (aire-metacrilato-aire). La influencia de la presión de confinamiento, sobre la lectura de salida de los sensores láser electro-ópticos, puede ser analizada en la misma Figura 3.18, mediante las curvas de calibración efectuadas bajo diferentes presiones de confinamiento,  $\sigma_r$  igual a 0 y 1500 kPa, en el medio transparente aire-metacrilato-aire. Puede observarse que, en concordancia con lo notado por Barrera 2002, los cambios sobre la sensibilidad del sensor ante los cambios de presión de confinamiento son poco importantes, en ambos sensores láser electro-ópticos, sin embargo existe influencia de la presión de confinamiento sobre los cambios de offset (mostrando cambios en la señal o lectura de salida de 0.482 V y 0.390 V en los sensores láser 1 y 2 respectivamente).

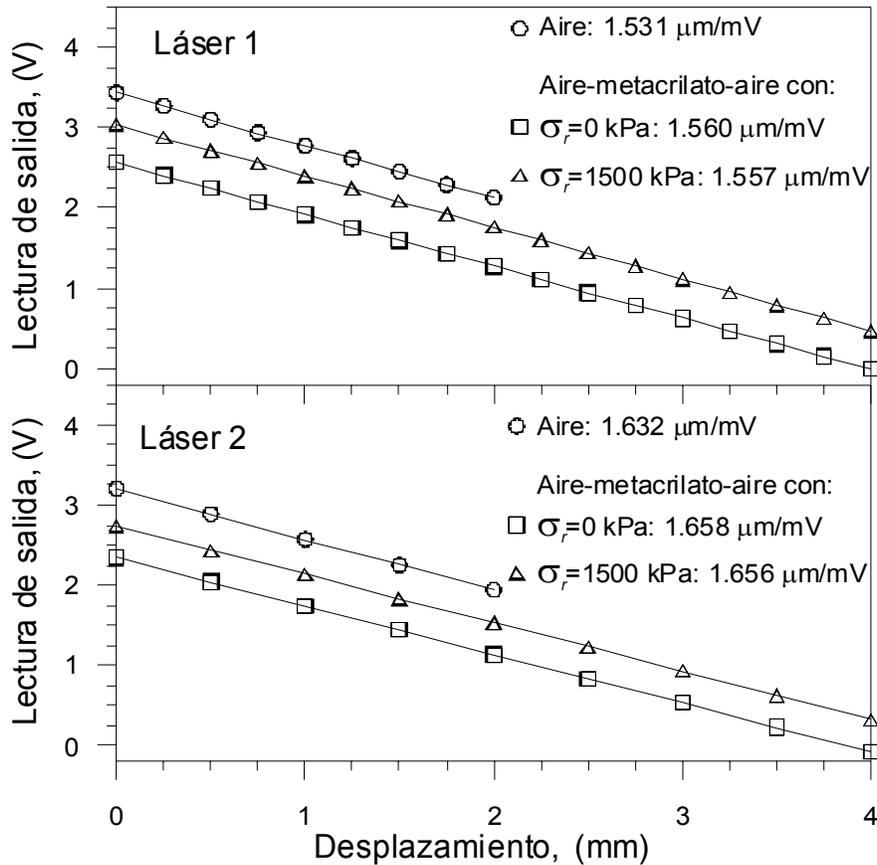


Figura 3.18 Curvas de calibración para diferentes medios transparentes (aire y aire-metacrilato-aire) y con dos diferentes presiones de confinamiento ( $\sigma_r=0$  y 1500 kPa, en el medio transparente aire-metacrilato-aire).

Este efecto es atribuido a los desplazamientos y expansión de la camisa de la cámara triaxial ante el incremento de la presión de confinamiento,  $\sigma_r$  (Barrera 2002). El efecto es de alguna manera contrarestando con el uso de una cámara de confinamiento de acero inoxidable Figura 3.4, sin embargo no es totalmente eliminado. El movimiento lateral, no lineal, de la cámara influye en la señal de salida del sensor, debido a la reducción en la distancia ( $y$ ) en el esquema de la Figura 3.17. Los desplazamientos máximos de la cámara de metacrilato, en nuestro caso, son de alrededor de  $\Delta y = -\Delta x = -50 \mu\text{m}$  (medido a la mitad de la altura de la ventana) a una presión de confinamiento de 1500 kPa.

Tomando en consideración que la sensibilidad del sensor láser permanece prácticamente constante, un mismo factor de calibración (relación constante entre incremento del

desplazamiento lateral e incremento de la señal de salida) puede ser usado en todo el rango de presiones abarcado en este trabajo de investigación, pero correcciones debido al error provocado por la modificación del offset deberán ser realizadas. Los factores de calibración usados son  $1.560 \mu\text{m/mV}$  y  $1.658 \mu\text{m/mV}$  para el sensor láser 1 y 2 respectivamente.

### **3.3.3.3.2 Evaluación de su fiabilidad y calibraciones ante cambio de presiones de confinamiento.**

Con el fin de determinar las correcciones por cambio del offset, ciclos de cambios, cuasi-continuos, de presiones de confinamiento fueron efectuados manteniendo constante la distancia entre el cabezal sensor láser y el objeto. Estos ciclos fueron realizados con probetas falsas de acero, en unos casos cubierta con membrana de látex y en otros sin membrana. Los resultados, con la lectura de los sensores convertidos a milímetros (mediante el factor de calibración correspondiente), son mostrados en la Figura 3.19. En el análisis de estos resultados se considera que la influencia de los cambios de presión sobre la sensibilidad de los sensores es insignificante para el rango de presiones estudiado, y por lo tanto, los cambios en la lectura de salida serán únicamente relacionados con el efecto de los cambios de presión sobre el offset de las curvas de calibración. Los incrementos de presión de confinamiento fueron aplicados a una velocidad de 30 kPa por minuto.

Puede observarse que los incrementos de presión sobre la probeta de acero cubierta con membrana (línea delgada continua en la Figura 3.19) causan significativos cambios en las lecturas de los sensores láser, los cuales son más evidentes a bajas presiones (menor a 200 kPa). Durante esta calibración fue necesario tomar precauciones para evitar la desaturación de las piedras porosas colocando platos de hule humedecidos en los bordes de la probeta y proporcionando una presión constante de agua, de 10 kPa, hacia el cabezal y pedestal, sin embargo esto crea una interfase menos rígida entre las superficies de la probeta falsa, y las superficies de las piedras porosas y cerámicas AVEA del triaxial.

Los resultados obtenidos muestran dos tendencias. En la etapa inicial de la aplicación de presión, de 0 a 500 kPa, con una tensión de corte constante de 15 kPa, una aparente expansión de la probeta es detectada por el sensor láser 1 mientras que una compresión es detectada por el sensor

láser dos. Adicionalmente, en la suma de las medidas de los sensores láser una gran histéresis en la curva es observada en bajas presiones, al reducir la presión de confinamiento de 1300 kPa a 0 kPa (línea gruesa discontinua en la Figura 3.19), evidenciando la existencia de desplazamientos irrecuperables durante el incremento de presiones en la etapa inicial. Las curvas de descarga para cada sensor láser no son presentadas para dar claridad a la Figura 3.19.

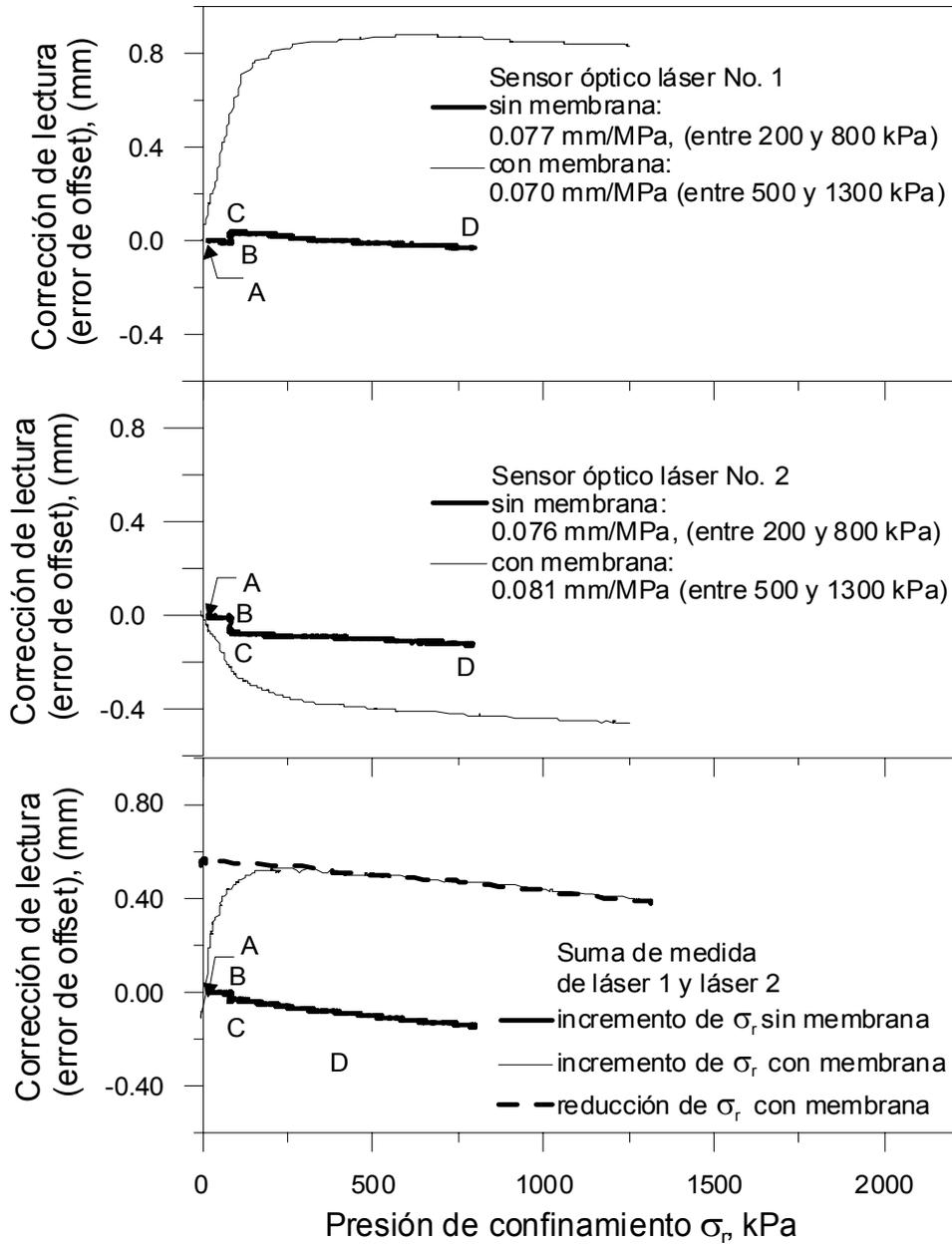


Figura 3.19 Influencia de los cambios de presión de confinamiento sobre del offset (en mm) de los sensores láser.

Por otra parte, una diferente tendencia se observa en presiones de confinamiento arriba de 500 kPa. En este rango de presiones se producen lecturas de aparentes desplazamientos de contracción, y las curvas de calibración presentan una evidente linealidad, sin apreciables errores por histéresis. El error por incremento de presión es del orden de  $-0.070$  mm/MPa para el sensor 1 y alrededor de  $-0.081$  mm/MPa para el sensor 2.

Un detalle importante, a tomar en cuenta en el análisis, es la suma de las lecturas de los dos sensores (Figura 3.19). Podría pensarse que las medidas obtenidas en los dos sensores láser, de expansión y compresión observadas en los sensores láser 1 y 2 respectivamente, se compensan. La compensación es parcial para el rango de presiones comprendido entre 0 y 250 kPa (con dominio de la medida de expansión), y una compensación total arriba de 250 kPa. Las curvas de calibración, de esta suma de lecturas, convergen después de 250 kPa, tanto en incremento como en reducción de presiones, presentando ambas una apreciable linealidad; al reducir la presión, la linealidad, se muestra hasta en valores muy cercanos a 0 kPa.

Los resultados presentados se han seleccionado de varias calibraciones efectuadas, mostrando un comportamiento típico, con diferencias importantes entre calibraciones, tan solo, en la magnitud de desplazamientos registrados en la etapa inicial (pero siguiendo similares tendencias al descrito arriba).

La calibración efectuada sobre la muestra de acero sin membrana fue realizada sin platos de hule en los bordes de la muestra con el fin de proporcionar una mejor interfase, y condiciones más reales, entre las superficies de contacto de la probeta y del equipo triaxial (piedras porosas y cerámicas AVEA). El incremento de presiones de confinamiento fue realizado siguiendo tres etapas. Los resultados obtenidos de esta calibración (cambios en la lectura de los sensores por incrementos de presión de confinamiento) son exhibidos en la Figura 3.19 (con líneas gruesas continuas); correspondiendo los intervalos A-B, B-C y C-D a la primera, segunda y tercera etapas respectivamente. La primera etapa, corresponde a incremento de presión de confinamiento de 0 a 80 kPa con el pistón de carga fijo (evitando su movimiento mediante un cilindro ranurado colocado entre la base intermedia del triaxial y la parte superior del pistón del cilindro

neumático). En una segunda etapa la presión de confinamiento fue sostenida en 80 kPa mientras que era aplicada una tensión de corte desde, aproximadamente, 0 kPa hasta 30 kPa a una velocidad de 7 kPa/min, manteniendo esta tensión constante durante 3 minutos. Los resultados de esta etapa son mostrados en el intervalo B-C. Posteriormente, en la tercera etapa, se realizó una trayectoria de incremento de la presión de confinamiento de 80 a 800 kPa bajo una tensión de corte constante de 30 kPa, cuyos resultados son mostrados en el intervalo C-D.

En la primera etapa los cambios de lectura del sensor por incrementos de presión de confinamiento, indicado por el intervalo A-B (en la Figura 3.19), presentan una apreciable linealidad con una resultante (suma de los registros de ambos sensores) de “aparente compresión” de la muestra de acero. Durante la segunda etapa, en la cual la presión de confinamiento es mantenida en 80 kPa, una aparente expansión del cilindro es registrada por el sensor láser 1 y una compresión es detectada por el sensor láser 2. Este comportamiento es similar al observado en la etapa inicial de la calibración realizada con la probeta de acero cubierta con membrana, pero con valores notablemente más pequeños. En la tercera etapa, correspondiente a los resultados mostrados en el intervalo C-D, las lecturas presentan aparentes desplazamientos de contracción, con una evidente linealidad, con un error por incremento de presión del orden de  $-0.077$  mm/MPa para el sensor 1 y alrededor de  $-0.076$  mm/MPa para el sensor 2. Una cuarta etapa fue realizada siguiendo una trayectoria de reducción de presión de confinamiento de 800 a 80 kPa, observándose que el error por histéresis es despreciable. Los resultados de la cuarta etapa no se presentan en la Figura 3.19 debido a que prácticamente se superponen a los resultados de la tercera etapa (intervalo C-D).

Las calibraciones anteriores, usando probetas de acero con y sin membrana, muestran comportamientos similares por arriba de 500 kPa de presión de confinamiento: curvas con alta linealidad, con prácticamente pendientes iguales y sin histéresis apreciable. Cuando se considera la suma de las lecturas obtenidas en los dos sensores láser (donde se podrían contrarrestar los efectos de inclinación y desplazamiento lateral en el sentido seguido por el rayo), la similitud en linealidad y pequeña histéresis en las curvas se muestran, ya, arriba de 250 kPa. En el caso de la calibración con probeta sin membrana tal linealidad se hace patente desde valores bajos de presión de confinamiento (80 kPa). Sin embargo, son notorios el comportamiento irregular que se

presenta a bajas presiones, siendo muy evidente el efecto que genera la membrana. El comportamiento observado a bajas presiones puede ser atribuido a: desplazamiento lateral o inclinación de la probeta de acero, desplazamientos de la membrana (ajustes y arrugas), y/o desplazamiento vertical del punto inicial de registro; que en las primeras calibraciones efectuadas, la magnitud de estos movimientos se vieron incrementados por la presencia de los platos de hule humedecidos colocados en sus bordes del cabezal y pedestal. Por arriba de este rango de presiones los cambios de lectura observados, con alta linealidad y sin histéresis, pueden ser atribuidos a los desplazamientos y expansión de la camisa de la cámara triaxial ante el incremento de la presión de confinamiento. Una adecuada y sencilla corrección de las medidas de los sensores láser, por incremento de la presión de confinamiento, puede ser efectuada en este último rango debido su comportamiento altamente lineal, repetible y reversible.

Con base a lo anterior, es posible definir y controlar trayectorias de tensiones apropiadas para obtener en forma confiable las medidas de la deformación lateral, corregidas por incremento de la presión de confinamiento. Es posible aplicar una tensión radial neta ( $\sigma_r - u_a$ ) inicial baja (por ejemplo  $\sigma_r - u_a = 20$  kPa), y utilizar una presión de confinamiento inicial ( $\sigma_r$ ) que permita medidas confiables de la deformación lateral ( $\sigma_r$  arriba de 250 kPa), suministrando la presión de aire,  $u_a$ , necesaria.

### **3.3.3.3 Perfiles de la muestra.**

Adicionalmente, es posible mover el sensor verticalmente por medio de un motor eléctrico (número 15 de la Figura 3.1 , el cual actúa desplazando el sensor a una velocidad de 2.6 mm/s. Los desplazamientos laterales así obtenidos son relacionados con los desplazamientos verticales del sensor medidos con LVDTs externos colocados sobre la base movable (número 5 de la Figura 3.1 , con el fin de conseguir perfiles de la muestra. Los LVDTs externos tienen un rango de 100 mm, sensibilidad alrededor de 150 mV/mm y una resolución de 50  $\mu$ m (en el anexo 1 se presentan los gráfico de calibración de estos LVDTs externos).

En la Figura 3.20 se presentan los perfiles de una probeta falsa de acero sin membrana recubriéndolo y sin presión de confinamiento. En la figura se manifiesta el considerable número de puntos registrados en el proceso que hacen posible la obtención detallada de los perfiles de la

probeta falsa de acero. Las medidas de los desplazamientos horizontales y verticales están representadas a diferentes escalas, siendo amplificadas 10 veces más las medidas horizontales que las verticales, y sólo se visualiza una porción del perfil (22 cm partiendo de una elevación de la muestra de 18 cm, con la base de la muestra como punto de referencia). Por lo tanto, son más notorias las irregularidades de los perfiles que lo observado ha escala real. En algunos tramos, de los perfiles de la muestra de acero, se observan importantes irregularidades indicándonos las alteraciones sufridas debido a su envejecimiento y su uso.

Una representación menos amplificada de los perfiles laterales, de la probeta falsa de acero, es presentada en la Figura 3.21. Los perfiles laterales, en este caso, son obtenidos con los desplazamientos horizontales amplificados 5 veces más que los verticales y mostrando los perfiles a lo largo de toda la altura de la probeta. Esta forma de representación es más cercana a una imagen a escala real de la muestra pero no son apreciables los pequeños desplazamientos que ocurren en los ensayos de suelos.

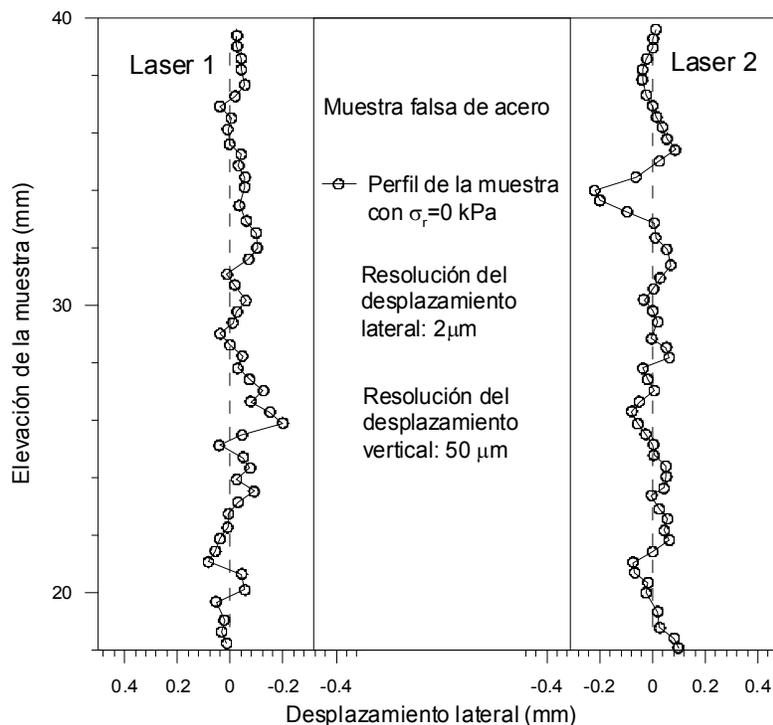


Figura 3.20 Perfiles de una probeta falsa de acero sin membrana recubriéndolo y sin presión de confinamiento. Escala horizontal 10 veces la escala vertical. Con la lectura de los sensores convertida a milímetros.

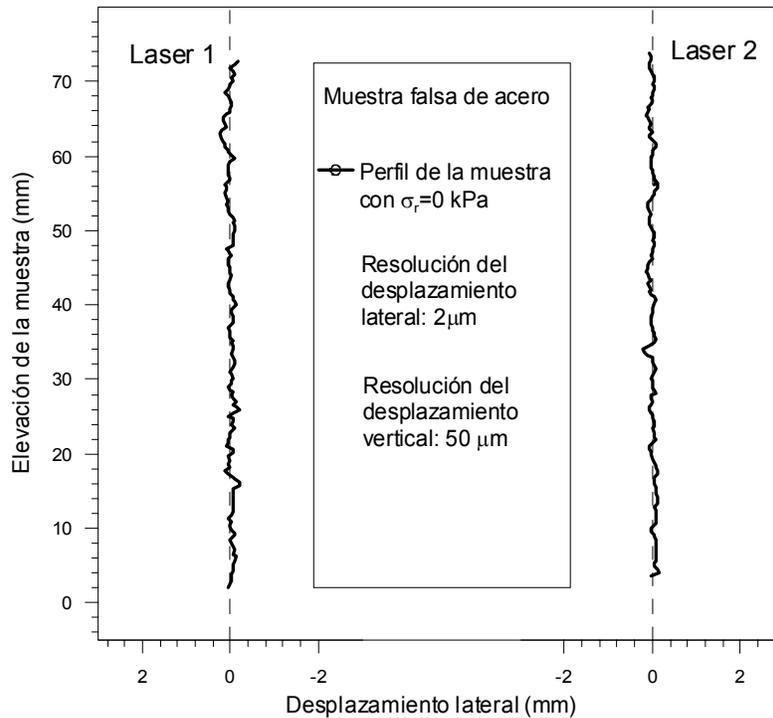


Figura 3.21 Perfiles de una probeta falsa de acero sin membrana recubriéndolo y sin presión de confinamiento. Escala horizontal 5 veces la escala vertical. Con la lectura de los sensores convertida a milímetros

#### **3.3.3.3.4 Efecto de la presión de confinamiento sobre las medidas de desplazamiento lateral a lo largo de la muestra.**

Cinco perfiles de una probeta falsa de acero, sin recubrimiento de membranas, son obtenidas a diferentes presiones de confinamiento ( $\sigma_r= 0, 80, 100, 600, 800$  kPa). El propósito de esta prueba es complementar la descripción de los cambios offset, en los sensores láser ante cambios de presión de confinamiento, y su efecto sobre las medidas de desplazamiento radial de la muestra. Fueron efectuados manteniendo constante la distancia entre el cabezal sensor láser y el objeto mientras se realizaba el movimiento del sensor verticalmente por medio de un motor eléctrico a una velocidad de 2.6 mm/s.

Los resultados de dos perfiles ( $\sigma_r= 0$  y  $\sigma_r= 800$  kPa), con la lectura de los sensores convertidos a milímetros (mediante el factor de calibración correspondiente), son mostrados en la Figura 3.22. En este caso, los perfiles laterales son obtenidos con los desplazamientos horizontales

amplificados, aproximadamente, 40 veces más que los verticales y mostrando los perfiles a lo largo de toda la altura de la probeta. Estos perfiles muestran la misma tendencia que las observadas en altas presiones de confinamiento en la Figura 3.19. A medida que aumentan las presiones de confinamiento las lecturas presentan aparentes desplazamientos de contracción. El error promedio debido al incremento de presión, considerando todos los puntos que delinean los perfiles, es del orden de -0.061 mm/MPa para el sensor 1 y alrededor de -0.068 mm/MPa para el sensor 2. Este error es algo distinto a los encontrados en las calibraciones anteriormente efectuadas con medidas puntuales (del orden de -0.077 mm/MPa para el sensor 1 y alrededor de -0.076 mm/MPa para el sensor 2). Las causas de esto puede ser atribuida al número escaso de perfiles estudiados en contraste con el gran número de medidas locales obtenidas en las calibraciones con medidas locales, y a la variación del efecto de la presión de confinamiento, sobre el offset de la curvas de calibración, a lo largo de la altura de la muestra. Sin embargo, esta diferencia, entre variación del error obtenida con los perfiles y la observada con medidas locales, produce un error menor a 18  $\mu\text{m}$  con el valor máximo de presión de confinamiento adoptado en esta investigación, y menor de 6  $\mu\text{m}$  en el rango usualmente empleado en la investigación. Por lo tanto, se cree más conveniente usar los resultados de las calibraciones efectuadas con medidas puntuales para corregir las medidas de deformación lateral en los perfiles de las muestras de suelo.

#### **3.3.3.3.5 Medidas de cambios de volumen local y global de la muestra.**

En los ensayos realizados, en este equipo triaxial, la deformación volumétrica ( $\varepsilon_v$ ) de la muestra ha sido derivada, principalmente, usando las medidas obtenidas mediante instrumentación local (cambios de volumen local). Basada sobre la suposición, usual, de deformación del tipo cilindro recto (manteniendo una forma cilíndrica, con el mismo diámetro a lo largo de toda su altura), la deformación volumétrica ha sido calculada como:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_a + 2\varepsilon_r$$

Donde  $\varepsilon_a$  es el promedio de las dos lecturas de la deformación axial local obtenidos de las medidas de los LVDTs sujetos a la muestra (cubriendo el tercio central de su altura), y  $\varepsilon_r$  es el promedio de las dos lecturas de la deformación radial local obtenidos de las medidas de los

sensores láser electro-ópticos (monitoreando, cada sensor, un punto ubicado en la mitad de la muestra).

Las medidas radial y axial locales se consideran más representativas al no ser afectadas por los efectos de fricción presentes en los bordes de la muestra. La fricción entre los bordes del espécimen y los del pedestal o cabezal del triaxial, restringen el desplazamiento lateral del suelo en la zona adyacente a estas superficies. Esto genera condiciones de no uniformidad de tensiones y deformaciones en la muestra. En ensayos de compresión triaxial se presentan deformaciones no homogéneas a lo largo de la altura de la muestra, manifestando progresivamente un abombamiento, adoptando la muestra un aspecto semejante a un barril. Este efecto esta siempre presente, aunque su magnitud e importancia depende de la historia de tensiones del material y tipo de prueba. Sin embargo, la mayoría de los estudios para describir el comportamiento hidromecánico de un suelo (identificar la curva de tensión-deformación), tanto saturado como no saturado, han usado técnicas donde se obtienen medidas globales de la deformación volumétrica.

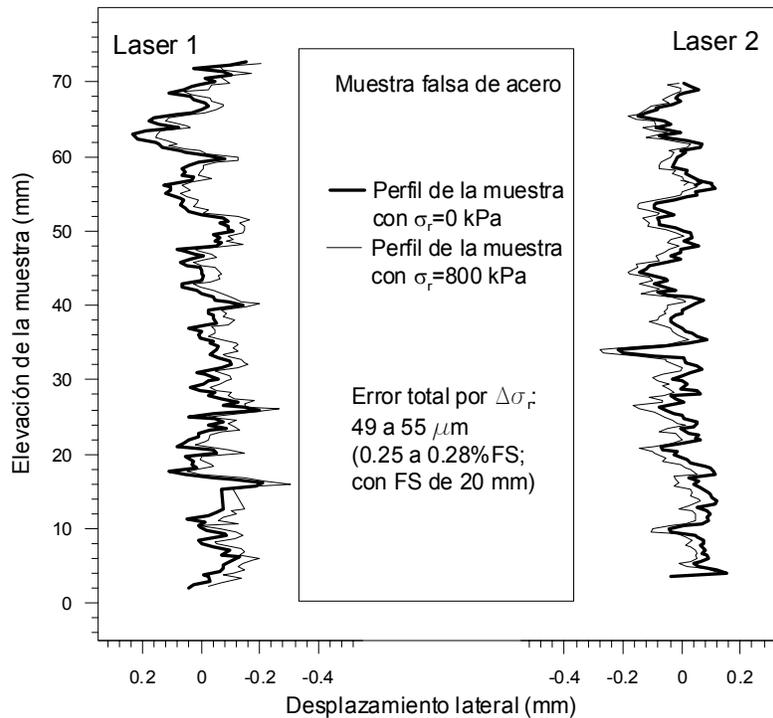


Figura 3.22 Perfiles de una probeta falsa de acero, sin membrana recubriéndolo, bajo presión de confinamiento de  $\sigma_r = 0$  y  $\sigma_r = 800$  kPa. Escala horizontal 40 veces la escala vertical. Con la lectura de los sensores convertida a milímetros.

Germaine y Ladd (1988), enumeran algunos efectos que causa la variación del estado de tensiones entre los bordes y el centro del espécimen:

- 1) Las medidas de deformación axial (y de corte) van en aumento hacia el centro del espécimen;
- 2) Cambios significativos en la geometría del espécimen en grandes deformaciones causan abombamiento y por lo tanto no uniformidad de tensiones;
- 3) Grandes diferencias en presiones de poro inducidas o en deformación volumétrica entre el punto medio y los bordes del espécimen.

Con respecto al punto 3), para el caso de ensayos con succión controlada, su efecto se verá reflejado en diferencias (no homogeneidad) de la succión matricial entre el punto medio y los bordes del espécimen. Lo que podía causar problemas con el control de la succión matricial cuando se usa la técnica de traslación de ejes, debido a que esta es aplicada en los bordes. Por lo tanto, las pruebas deben desarrollarse a una velocidad de aplicación de tensiones suficientemente bajas para asegurar que la succión matricial sea igual a través de todo el espécimen. Al aplicar tensiones sobre el espécimen se ven incrementadas las presiones de agua, pero con magnitudes diferentes en los bordes y el centro, por lo tanto el agua debe migrar dentro del espécimen para equilibrar las presiones de agua. En esta investigación, donde se desea estudiar las características de anisotropía en el comportamiento mecánico del suelo, se considera más representativo usar las medidas locales obtenidas en el centro del espécimen.

Dentro de la literatura existente sobre ensayos triaxiales, la influencia de estos efectos de fricción sobre el comportamiento mecánico de la muestra ha sido abordada por varios investigadores desde diferentes puntos de vista, por ejemplo: evaluación de las características de cambio de volumen de la muestra (Bishop y Henkel, 1962; Ueng et al., 1988; Kolymbas y Wu, 1989; Romero et al., 1997; Barrera et al. 2002); descripción de potenciales orígenes de error en la medida axial (Baldi et al., 1988); comparación de medidas de deformación local contra global (Linton et al., 1988); correcciones de área de la muestra durante el ensayo (Germaine y Ladd, 1988; La Rochelle et al., 1988) e identificación de la línea de estado crítico usando correcciones de la deformación volumétrica (Klotz y Coop, 2002). Aunque, una mayoría de trabajos enfatizan

la influencia de la restricción en los bordes sobre las características de resistencia del suelo, por ejemplo Bishop y Henkel (1962) y Goto y Tatsuoka (1988).

Algunos autores han intentado contrarrestar estos efectos de fricción usando superficies lubricadas y/o muestras achaparradas. Sin embargo no es posible lubricar los bordes de la muestra cuando se aplica la técnica de traslación de ejes para controlar la succión matricial. Además, no siempre estos intentos han tenido un total éxito (por ejemplo: Kolymbas y Wu, 1989) detectaron deformaciones no homogéneas a lo largo de la altura de la muestra en etapas tempranas de la prueba a pesar de estar lubricados los bordes y de ser achaparrada la muestra). Adicionalmente, en el caso de realizar las medidas de deformación radial local hay que tomar en cuenta que: la deformación axial de la muestra genera un desplazamiento vertical del punto monitoreado lo cual produce errores apreciables cuando el grado de abombamiento es grande, y la existencia de arrugas en la membrana que se hacen notoria a grandes deformaciones también afecta las medidas obtenidas mediante este sistema.

Este equipo tiene la ventaja de poder obtener también las medidas globales de deformación volumétrica. El monitoreo del cambio de volumen global de la muestra a partir de medidas directas de sus dimensiones es también ampliamente usado. Comúnmente, los desplazamientos radiales son medidos en uno a tres puntos discretos y es hecha una suposición de la forma de la muestra para obtener la deformación volumétrica total. En este equipo triaxial el volumen global es obtenido a partir de dos perfiles de la muestra, conseguidos moviendo el sensor láser verticalmente por medio de un motor eléctrico, con lo cual no es necesario suponer la forma de la muestra y se posee un gran número de puntos discretos. Se registran pares de perfiles (opuestos entre sí) en varios estados, convenientemente espaciados, de las trayectorias de tensiones. De esta manera es posible obtener la evolución de los perfiles de la muestra durante los ensayos, y por lo tanto conseguir la deformación volumétrica comparando los volúmenes globales de los perfiles.

Para cada perfil, el volumen global de la muestra es estimado usando el método de los discos (para generar un sólido de revolución) y resolviendo la integral con el método compuesto del trapecio con incrementos no constantes. En la Figura 3.23 se muestra un perfil de la muestra (extraído de uno de los ensayos realizados en esta tesis). Cada dato del perfil representa un punto discreto ( $P_i$ ), constituido por el radio ( $r_i$ ) y la elevación ( $y_i$ ) de la muestra en  $P_i$ . La elevación  $y_i$

corresponde al desplazamientos vertical del sensor láser registrado por LVDTs externos colocados sobre la base movable, y tomando como punto de referencia el borde superior de la muestra. Se seleccionó este punto como referencia por que es el borde fijo de la muestra (el borde inferior, adyacente al pedestal del triaxial, es movido al entrar en acción el pistón de carga). La altura de la muestra deducida desde estas medidas se comprueba usando la medida de desplazamiento axial externa (obtenida mediante un LVDT, modelo B7.5 de Solartron, fijado en el pistón de carga). El radio  $r_i$  es estimado a partir del radio inicial ( $r_{0i}$ ) de la muestra, adicionándole el desplazamiento lateral relacionado con el desplazamiento vertical del sensor, y por lo tanto vinculado con la elevación  $y_i$ . Es razonable considerar constante el radio  $r_{0i}$  a lo largo de la muestra debido al procedimiento utilizado para formar la muestra de suelo (compactación estática dentro de un molde de radio interior igual a  $r_{0i}$ ).  $y_{i+1}$ ,  $r_{i+1}$  son la elevación y el radio de la muestra en el punto discreto,  $P_{i+1}$ , posterior (por debajo) al punto  $P_i$ .

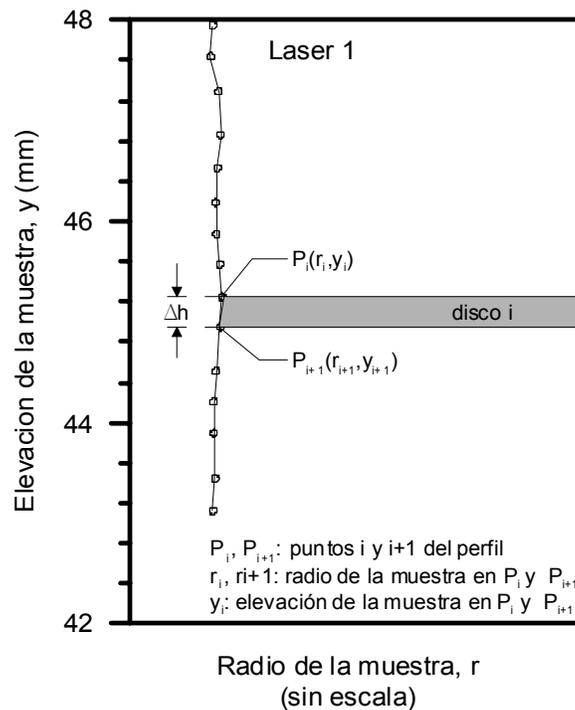


Figura 3.23 Representación de un disco (generando un sólido de revolución) en un perfil de desplazamientos laterales de la muestra.

El volumen del disco  $i$  será, por lo tanto:

$$V_{discoi} = \pi \left( \frac{r_i + r_{i+1}}{2} \right)^2 \Delta h_i$$

donde  $\Delta h_i = y_{i+1} - y_i$

Posteriormente, el volumen global para cada perfil de la muestra se aproxima por el de todos los discos, obtenidos de este perfil:

$$V_{gk} = \pi \left[ \left( \frac{r_0 + r_1}{2} \right)^2 \Delta h_0 + \left( \frac{r_1 + r_2}{2} \right)^2 \Delta h_1 + \dots + \left( \frac{r_{n-1} + r_n}{2} \right)^2 \Delta h_{n-1} \right]$$

donde  $n$  es el número de puntos que posee cada perfil.

Finalmente, el volumen global de la muestra, en cada estado de tensión evaluado, se obtiene promediando los volúmenes globales de los perfiles delineados por los sensores láser1 y láser2:

$$V_g = \frac{V_{gláser1} + V_{gláser2}}{2}$$

La deformación volumétrica global ( $\epsilon_{vg}$ ) de la muestra ha sido obtenida usando:  $\epsilon_{vg} = \Delta V_g / V_{g0}$ ; donde  $\Delta V_g$  es el cambio de volumen global (del estado inicial de tensiones al estado evaluado) y  $V_{g0}$  es el volumen global en el estado inicial de tensiones.

Son dos los principales beneficios de disponer, tanto, de medidas globales como locales del cambio de volumen de la muestra:

1) Aunque, como ha sido mencionado anteriormente, las medidas locales se consideran más representativas al no ser afectadas por los efectos de fricción en los bordes de la muestra, estas no pueden ser relacionadas con el grado de saturación en el estudio hidromecánico de suelos no saturados, ya que los cambios de humedad solo pueden ser obtenidos de forma global (Barrera et al. 2002);

2) Los errores debidos al abombamiento de la muestra, pueden minimizarse utilizando medidas locales para deformaciones axiales pequeñas y globales para deformaciones axiales grandes. La razón es que en grandes deformaciones el grado de abombamiento de la muestra es muy grande

(con una deformación radial pronunciada cerca del punto medio de su altura), por lo que la suposición de una deformación del tipo cilindro recto es errónea. Adicionalmente, no es posible obtener en grandes deformaciones las medidas locales de deformación axial debido a que estas deformaciones superan el rango de trabajo de los LVDTs internos. Para la obtención de la deformación volumétrica local ( $\epsilon_v$ ), una posible alternativa es utilizar las medidas de deformación axial obtenidas con el LVDT externo (corregida por deformación del equipo) y la deformación radial medida localmente.

### **3.3.4 Medida de variación de volumen de agua dentro de la muestra.**

#### **3.3.4.1 Descripción del sistema de buretas instrumentadas con TPDs.**

Para medir la variación de volumen de agua de la muestra se adaptó un transductor de presión diferencial (TPD) a una bureta de doble cámara de uso tradicional en la mecánica de suelos, lo que permite tener tanto una lectura visual como una automática (Figura 3.24, Figura 3.25 y números 25 y 26 de la Figura 3.2). Este sistema se realizó con base a los ensayos presentados por Lade (1988) y Carvalho (2002). El principio operacional de este sistema consiste detectar el movimiento de la columna de agua midiendo la diferencia de presión entre las dos cámaras, ya que el gasoil que permite visualizar la lectura es de una densidad menor que el agua ( $0.783 \text{ g/cm}^3$ ). 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 (ver Figura 3.24). El menisco formado por los dos líquidos se desplaza dentro de la bureta graduada, el cual nos indica la cantidad de agua que entra o sale de la muestra. Al desplazarse el menisco, también se presentan cambios de presión entre las dos cámaras que son registradas por el TPD y convertidos a cambios de volumen de agua por medio de un factor de calibración. Por consiguiente, este sistema nos permite determinar en forma continua los cambios de humedad de la muestra. Dos de estos sistemas son usados en el equipo triaxial, conectados al sistema presión de agua (aplicando la traslación de ejes): uno ligado al cabezal y otro al pedestal de la muestra.

Se utilizaron dos buretas graduadas (resolución de  $50 \text{ mm}^3$  y escala del medidor de 0 a 15 ml) ubicado en el interior de un cilindro de metacrilato de 30 mm de diámetro interior y 680 mm de

longitud. En el circuito del medidor de volumen de agua intersticial, el agua desairada viene presurizada a través de un sistema interfase de acero inoxidable (Figura 3.24 y número 27 en la figura Figura 3.2 ). Para evitar la llegada de agua conteniendo burbujas a las buretas el circuito 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 (Figura 3.24 y número 24 en la figura Figura 3.2 ) tiende a quedarse en la parte superior de la cámara. Debido a que el flujo de agua puede causar interferencias en las medidas del sensor TPD si el punto de medida es perturbado por el mismo (Lade 1988), se usó una base igual a la proyectada por Carvalho (2002). En esta base la medida de la presión exterior es tomada del lado opuesto al del flujo, mientras una cámara interior de forma cónica permite separar el punto de medida del flujo de agua.

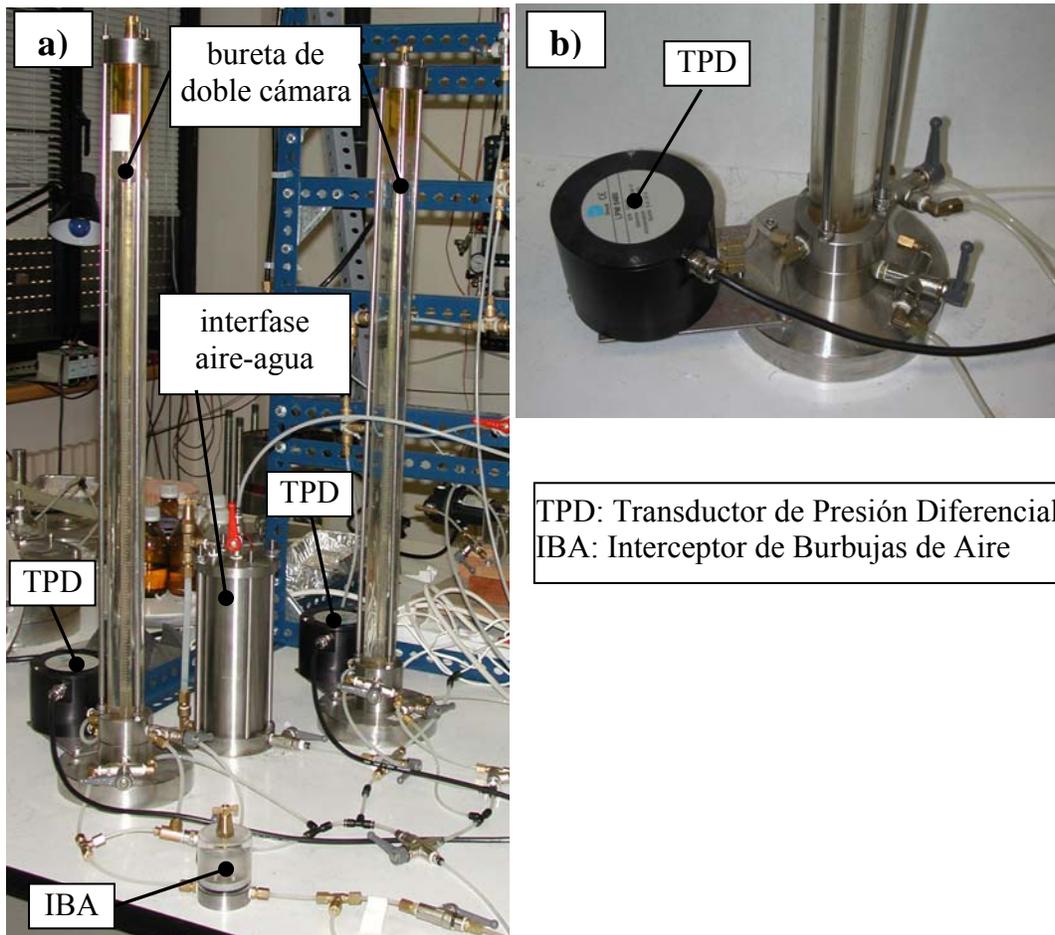


Figura 3.24 a) Disposición del sistema de medida de variación de volumen de agua de la muestra: bureta de doble cámara con transductor de presión diferencial (TPD) conectada a la línea de presión de agua; b) Vista ampliada de TPD con bureta de doble cámara.



Figura 3.25 Detalle de conexión de transductor de presión diferencial TPD con bureta de doble cámara.

Se usaron dos transductores de presión diferencial baja, TPD1 y TPD2, modelo LPM5480 de Druck con rango de 15 mBar (1.5 kPa), precisión de fábrica de  $\pm 0.25\%$  de fondo de escala, y salida de 0-10 V, acoplado a sus respectivas buretas de doble cámara. Se realizaron calibraciones para obtener las relaciones entre los cambios volumen de agua en la bureta y la salida obtenida en el transductor de presión diferencial.

Una primera calibración, en los dos TPD, se realizó con base a dos medidas de referencia: peso del agua que sale de las buretas y lecturas visuales en la bureta graduada. La relación entre ambas medidas de referencia se presenta en la Figura 3.26. Para la medida en peso se utilizó una balanza de alta precisión ( $\pm 0.0001$  g) modelo 80A de Precisa. Esta primera calibración se efectuó sin presión sobre el agua fluyendo dentro el sistema de medida. En la Figura 3.27 se presenta el resultado de las calibraciones efectuadas para el TPD1. La diferencia entre la calibración con la medida en peso y la obtenida mediante la bureta graduada es del orden de 0.8% en un rango de 10 ml (rango menor a los cambios de humedad presentes en las diferentes etapas de los ensayos). La diferencia es causada por la dificultad en obtener la medida de modo visual (tomando las medidas de la bureta graduada) debido a la forma irregular y cambiante que va tomando el menisco, en la interfase agua- gasoil, durante el movimiento de la columna de agua. Por lo tanto, es considerada más precisa la calibración efectuada midiendo en peso el agua que sale. Por otra parte, para evitar el error por histéresis se harán las medidas conduciendo al flujo dominante,

solo, en el sentido descendente dentro de la bureta. En la calibración por peso se obtuvo como resultado una salida proporcionada por el transductor, hacia el convertidor A/D, de 0 a 10 V para el rango de escala total, operando con una sensibilidad de 2.0687 ml/mV y 2.0535 ml/V en los TPD1 y TPD2 respectivamente, con una resolución dada por el convertidor A/D de  $0.6 \text{ mm}^3$  (0.0006 ml). El error por no linealidad más histéresis es menor a 0.22% FS (0.033 ml). Posteriores calibraciones, aproximadamente año y medio después de la primera, se realizaron para observar los posibles cambios de los factores de calibración de los TPDs con el tiempo. Estas se efectuaron, solamente, con base a las lecturas visuales en la bureta graduada, y tal como se muestra en la Figura 3.27, no se observan cambios apreciables, por lo que es posible usar el mismo factor de calibración a lo largo de toda la investigación. En la Tabla 3.1 y en la se presenta un resumen de las calibraciones efectuadas.

#### **3.3.4.2 Fiabilidad y precisión de las medidas. Calibraciones ante cambios de presión de agua.**

Otras calibraciones fueron efectuadas bajo diferentes presiones de agua dentro del sistema con el fin de conocer su efecto sobre las lecturas de los TPD. Esta presión de agua no afecta la diferencia de presión en el interior del sistema ya que fue impuesta sobre ambas salidas de las buretas. En este caso, no se obtuvieron las medidas en peso del agua que fluye en el sistema por la dificultad de controlar en forma eficiente la salida de agua sin alterar la diferencia de presión interna del sistema. Los resultados, tal como los presentados en la Figura 3.28 para el TPD2, muestran cambios poco notorios en las pendientes de las curvas de calibración ante los cambios de presión, con diferencias que son del mismo orden que las obtenidas al comparar las calibraciones realizadas por peso y por medidas en la bureta graduada. Por lo cual los factores de calibración son mantenidos constantes durante la realización de todas las etapas de los ensayos. Sin embargo, el offset de estas curvas presenta cambios más notorios. Este fenómeno es causado por la deformación del sistema (compresibilidad del agua, deformación de la bureta exterior, etc.).

En la mayoría de los ensayos este fenómeno no causa problemas debido a que durante ellos se mantiene constante la presión de agua en la aplicación de la traslación de ejes, y es posible seleccionar el factor de calibración vinculado con la presión de agua de trabajo. Sin embargo,

existen ensayos en los cuales en una de sus etapas se va incrementando la presión de agua (correspondiente a la traslación de ejes) de 120 a 210 kPa, controlando la velocidad de cambio, con el fin de crear colapsos del suelo por reducción de la succión matricial. Por esta razón fue necesario realizar calibraciones de los medidores de volumen para conocer el efecto de incrementar la presión de agua. Esta calibración se realizó considerando el sistema completo de aplicación de presión de agua (buretas, tubos, interceptor de burbujas de aire y válvulas) para obtener la deformación total del sistema. Algunos resultados de estas calibraciones, dentro del intervalo de tensiones en estudio, son presentados en la Figura 3.29. Los aparentes cambios de volumen de agua al incrementarse la presión dentro del sistema pueden ser aproximados mediante ecuaciones de segundo grado, tal como se muestra en la Figura 3.29, con el fin de realizar las correcciones pertinentes en los ensayos.

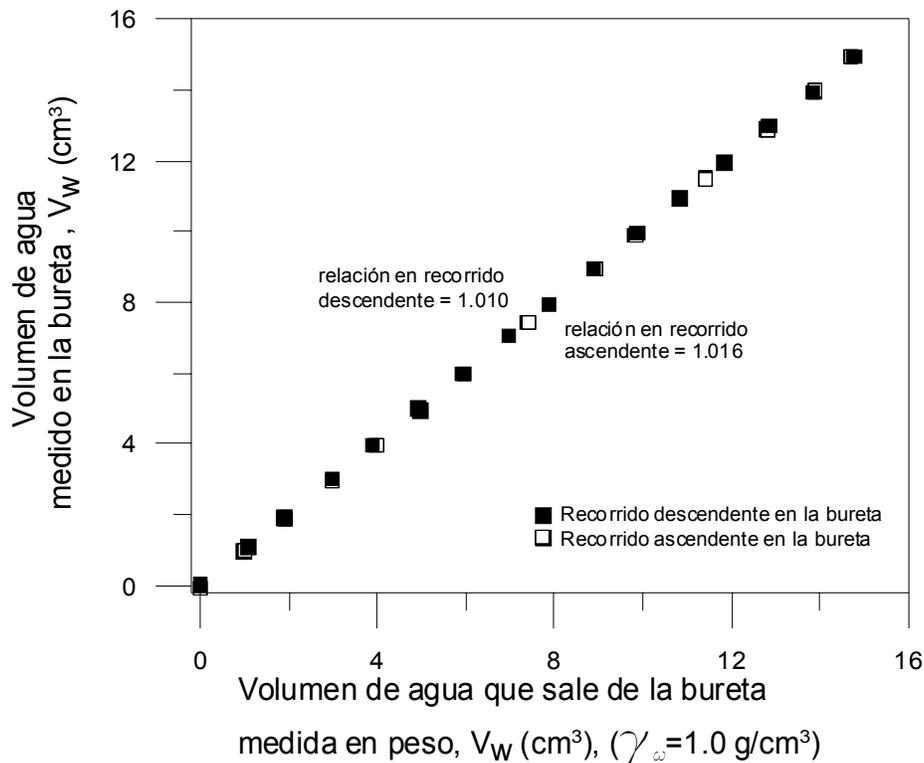


Figura 3.26 Relaciones entre el cambio de volumen de agua medido visualmente en la bureta graduada y la obtenida con base a medidas del peso del agua que sale de la buretas.

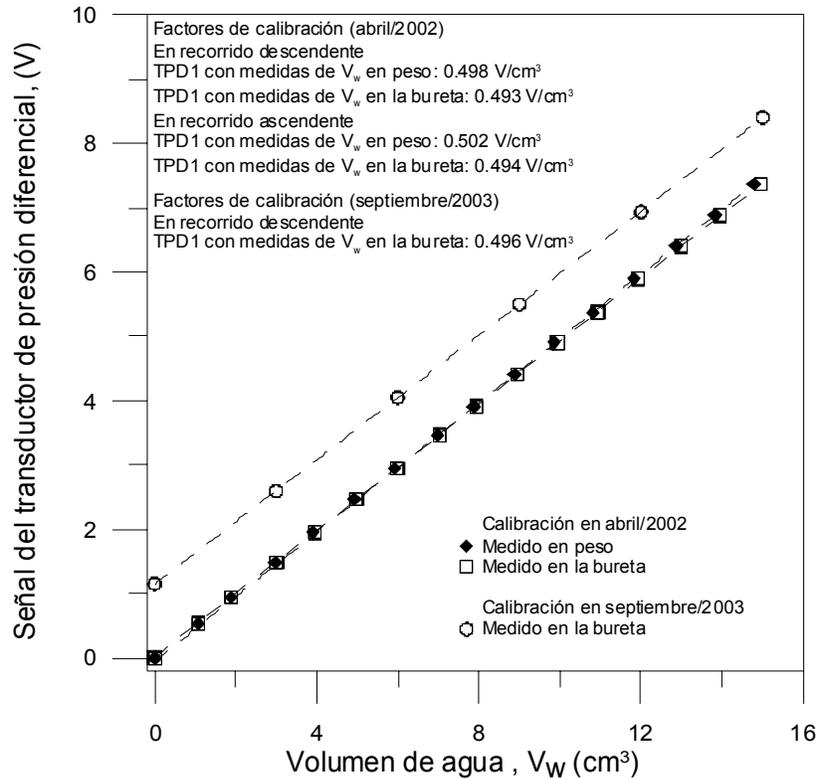


Figura 3.27 Resultado de las calibraciones del transductor de presión diferencial (TPD) obtenidas con base a medidas del peso del agua que sale de las buretas y con base a lecturas en la bureta graduada.

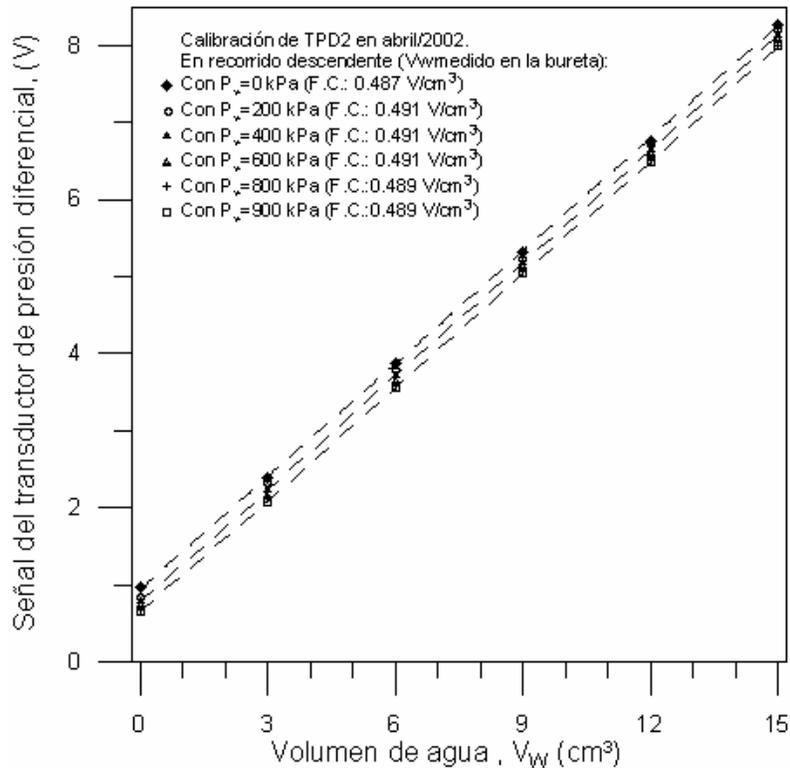


Figura 3.28 Resultado de las calibraciones del transductor de presión diferencial (TPD) bajo diferentes presiones de agua dentro del sistema, con base a lecturas en la bureta graduada.

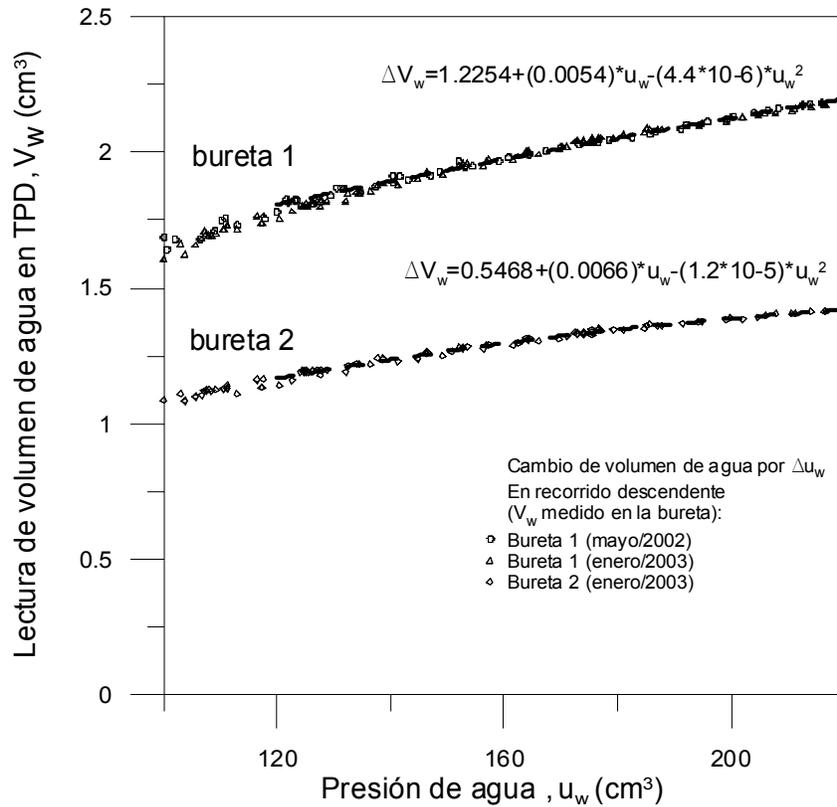


Figura 3.29 Calibraciones de los medidores de volumen con transductor de presión diferencial (TPD) ante incrementos de presiones de agua. Se toma en cuenta el sistema completo de aplicación de presión de agua (buretas, tubos, interceptor de burbujas de aire y válvulas).

### 3.3.5 Sistema de adquisición de datos.

#### 3.3.5.1 Sistema de adquisición de datos y control.

Para la adquisición de datos se utilizaron una tarjeta de adquisición de datos y sistema de control modelo AT-MIO-16XE-50, y una modelo PCI-6036E de la casa National Instruments, conectado a un ordenador IBM PC. Ambas tarjetas con convertidor A/D poseen 16 entradas analógicas (8 de  $\pm 10V$  en modo diferencial) con 16 bit de resolución y amplificadores de señal independientes; dos salidas analógicas de  $\pm 10V$ ; y 8 líneas de entrada/salida digitales TTL. La posibilidad de configurar en forma individual cada canal de entrada analógico de la tarjeta, programando la polaridad (unipolar o bipolar) y el rango de voltajes de entrada, permite mejorar la resolución de los transductores. Resolución, en este caso, se refiere al valor de un LSB (least significant bit) del controlador analógico digital (A/D); es decir el incremento de voltaje correspondiente al cambio de un conteo del A/D de 16 bit.

Dentro del programa de adquisición de datos, elaborado en la UPC, se han configurado cada canal seleccionando una adecuada ganancia (gain) para la señal de entrada analógica, dependiendo del rango de entrada esperado de la señal de salida de cada sensor. Ganancia (gain) se refiere al factor por el cual se amplifica la señal de entrada, de tal manera que un rango grande de entrada puede acomodar una variación grande de señal pero reduce la resolución de voltaje. En todos los canales se ha usado una entrada bipolar que permite seleccionar un rango de hasta  $\pm 10V$ . La Tabla 3.1 muestra los valores ciertos que pueden ser obtenidos seleccionando una adecuada resolución del convertidor analógico digital. El ruido electrónico en la señal de entrada, que también afecta la precisión de las medidas, se ha minimizado promediando varias lecturas (dependiendo de la magnitud del ruido, desde 500 lecturas en transductores de presión hasta 10000 en la célula de carga) para obtener un único valor en el programa de registro y almacenamiento de datos.

Tabla 3.1 Resumen de calibraciones

Parámetro medido (tipo)	Tipo de transductor	Error		Rango de calibración
		linealidad	histéresis	
$u_w$ (presión)	diafragma	3 kPa	0.13% FS	0 a 2.5 MPa
$\sigma_p$ (presión)	diafragma	3 kPa	0.13% FS	0 a 2.5 MPa
$\sigma_r$ (presión)	diafragma	3 kPa	0.13% FS	0 a 2.5 MPa
$u_a$ (presión)	diafragma	3 kPa	0.13% FS	0 a 2.5 MPa
q (fuerza)	célula de carga	11 N	0.05% FS	0 a 2150 N
$\varepsilon_{a1}$ interno (desplazamiento)	LVDT	11 $\mu m$	0.18% FS	6 mm
$\varepsilon_{a2}$ interno (desplazamiento)	LVDT	12 $\mu m$	0.20% FS	6 mm
$\varepsilon_a$ externo (desplazamiento)	LVDT	22 $\mu m$	0.15% FS	15 mm
$\varepsilon_{r1}$ (desplazamiento)	sensor láser electro-óptico	11 $\mu m$	0.21% FS	5 mm
$\varepsilon_{r2}$ (desplazamiento)	sensor láser electro-óptico	11 $\mu m$	0.21% FS	5 mm
Desplazamiento vertical del láser (desplazamiento)	LVDT	100 $\mu m$	0.20 % FS	50 mm
Desplazamiento vertical del láser (desplazamiento))	LVDT	100 $\mu m$	0.20% FS	50 mm
$V_{w1}$ (diferencial de presión)	diafragma	0.024 ml	0.16% FS	15 ml
$V_{w2}$ (diferencial de presión)	diafragma	0.033 ml	0.22% FS	15 ml

$u_w, \sigma_p, \sigma_r, u_a$ : presión de agua, de pistón, de confinamiento y de aire.

q : tensión de corte (lectura de célula de carga)

$\varepsilon_{a1} \varepsilon_{a2} \varepsilon_a$ : deformación axial interna No. 1, interna No. 2 y externa.

$\varepsilon_{r1} \varepsilon_{r2}$ : deformación radial No. 1 y No. 2.

$V_{w1} V_{w2}$ : cambios de volumen de agua en bureta.

Tabla 3.2 Tabla de descripción de canales A/D y resolución de los transductores.

Canal: denominación en programa (parámetro medido)	Ganancia (rango de voltaje de entrada)	LSB* $\mu\text{V}$	Sensitividad de operación	Rango por voltaje de entrada (unidades mecánicas)	Resolución A/D
<b>Dispositivo1: Tarjeta PCI-6036E</b>					
0: TP1 ( $u_w$ )	0.5( $\pm 10\text{V}$ )	305.18	512.98 kPa/V	$\pm 5130$ kPa	0.16 kPa
1: TP2 ( $\sigma_p$ )	0.5( $\pm 10\text{V}$ )	305.18	512.51 kPa/V	$\pm 5125$ kPa	0.16 kPa
2: TP3 ( $\sigma_r$ )	0.5( $\pm 10\text{V}$ )	305.18	511.08 kPa/V	$\pm 5111$ kPa	0.16 kPa
3: TP4 ( $u_a$ )	0.5( $\pm 10\text{V}$ )	305.18	512.36 kPa/V	$\pm 5124$ kPa	0.16 kPa
4: TPD1 ( $V_{w1}$ )	0.5( $\pm 10\text{V}$ )	305.18	2.0687 ml/V	$\pm 20.7$ ml	0.0006 ml
5: TPD2 ( $V_{w2}$ )	0.5( $\pm 10\text{V}$ )	305.18	2.0535 ml/V	$\pm 20.5$ ml	0.0006 ml
6: célula de carga (q)	0.5( $\pm 10\text{V}$ )	305.18	32.505 kg/V	$\pm 3.2$ kN	0.1 N
<b>Dispositivo1: Tarjeta AT-MIO-16XE-50</b>					
1: LVDT1 (Desp.Vert.láser)	1( $\pm 10\text{V}$ )	305.18	5.0393 mm/V	$\pm 50$ mm	1.5 $\mu\text{m}$
2: LVDT2 (Desp.Vert.láser)	1( $\pm 10\text{V}$ )	305.18	8.0424 mm/V	$\pm 80$ mm	2.5 $\mu\text{m}$
3: LVDT3 ( $\epsilon_a$ ext.)	1( $\pm 10\text{V}$ )	305.18	0.7386 mm/V	$\pm 7.4$ mm	0.2 $\mu\text{m}$
4: LVDT4 ( $\epsilon_{a1}$ int.)	1( $\pm 10\text{V}$ )	305.18	0.8199 mm/V	$\pm 8.20$ mm	0.2 $\mu\text{m}$
5: LVDT5 ( $\epsilon_{a2}$ int.)	1( $\pm 10\text{V}$ )	305.18	0.9196 mm/V	$\pm 9.2$ mm	0.2 $\mu\text{m}$
6: láser 1 ( $\epsilon_{r1}$ )	2( $\pm 5\text{V}$ )	305.18	1.5603 mm/V	$\pm 7.8$ mm	0.2 $\mu\text{m}$
7: láser 2 ( $\epsilon_{r2}$ )	2( $\pm 5\text{V}$ )	305.18	1.6585 mm/V	$\pm 8.3$ mm	0.3 $\mu\text{m}$

\*LSB; menor bit significativo (least significant bit).

Los programas de adquisición de datos, almacenamiento, visualización en tiempo real y control han sido desarrollados en Visual Basic 5.0, utilizándose controles activos del programa Component Work de la casa National Instruments. Los datos adquiridos de los 14 sensores son visualizados en la pantalla del ordenador personal en unidades de ingeniería (transformando el voltaje de salida con los factores de calibración) y en tiempo real (véase la Figura 3.30). El programa contiene rutinas que permiten controlar los dos motores paso a paso para efectuar trayectorias de tensiones isotropas y anisotropas, así como trayectorias de humedecimiento. Otra rutina es usada para adquirir y almacenar los datos originados cuando son obtenidas las medidas de perfiles laterales de la muestra. Para este último caso no es mantenido el control de las tensiones por medio del sistema de adquisición y control durante un breve tiempo, debido a la necesidad de registrar en un lapso muy corto de tiempo un gran número medidas de los sensores

láser y de los LVDTs de desplazamiento de estos. El programa cuenta con otras ventajas: los factores de calibración pueden ser cambiados dentro del programa en cualquier momento; los resultados son convertidos a unidades de ingeniería y visualizados en la pantalla del ordenador en tiempo real, o en diferentes intervalos de tiempo que pueden ser seleccionados en la pantalla en cualquier momento; estos datos son salvados en formatos de hoja de cálculo y guardados en el disco duro, también, en diferentes intervalos de tiempo que pueden ser seleccionados en la pantalla en cualquier momento; existe la opción de cambiar los intervalos de tiempo de visualización y guardado de los datos.

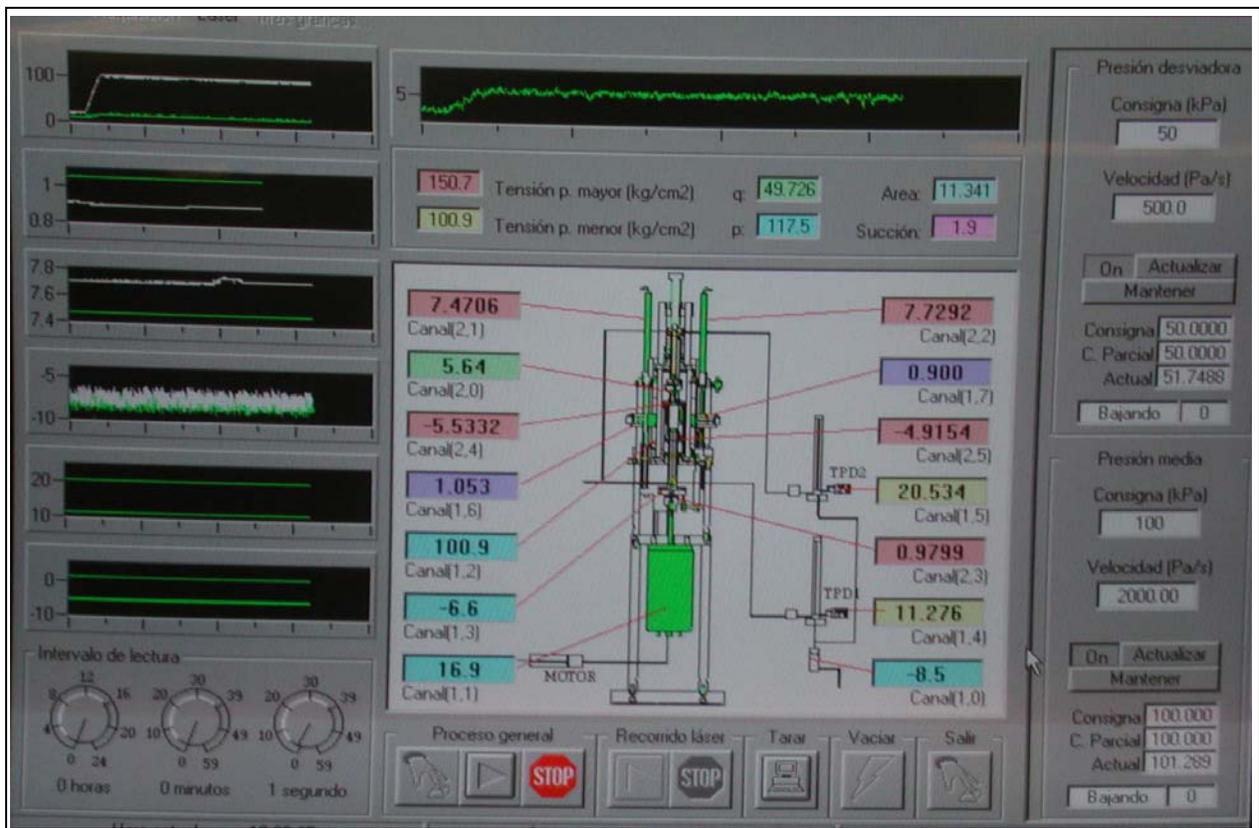


Figura 3.30 Pantalla del PC presentando los datos adquiridos de los 14 sensores en unidades de ingeniería y en tiempo real.

### 3.3.6 Consideraciones sobre el montaje de los ensayos triaxiales.

En este apartado se describen algunas consideraciones sobre el procedimiento de montaje seguido en los ensayos triaxiales. Previo al montaje de cada muestra se realizaba la saturación de las piedras AVEA y después se determinaron sus permeabilidades. Se usaron piedras de 1.5 MPa de valor de entrada de aire, con una porosidad aproximada de 30%vol., y tamaño de poro máximo de 0.16  $\mu\text{m}$ . El procedimiento para saturar los discos cerámicos consistió forzar el paso de agua desmineralizada y desaireada por el disco poroso cerámico a diferentes presiones por arriba de su valor de entrada de aire (1.5 MPa), por un período no inferior a 300 minutos.

Posteriormente, el coeficiente de permeabilidad  $k_d$  es determinado midiendo el volumen de agua que fluye a través del disco poroso cerámico, a diferentes presiones, cuando este ya se encuentra saturado. La carga piezométrica,  $\delta h$ , fue calculada considerando un peso unitario del agua de 10  $\text{kN/m}^3$ . Se usaron accesorios especiales, similares a los utilizados por Barrera 2002, para lograr la saturación de los discos cerámicos del cabezal y pedestal del equipo triaxial y así obtener su permeabilidad ( $k_d$ ). 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 y los transductores de presión diferencial (TPD). Esta medida de volumen  $V_m$  es graficada contra lapsos de tiempo, en la Figura 3.32, para distintas presiones de agua. El coeficiente de permeabilidad  $k_d$  es determinado por la siguiente expresión:

$$k_d = \frac{\Delta V_m \delta z}{\Delta t \delta h A}$$

Donde  $\Delta V_m$  es el volumen de agua medido que cruza el disco cerámico en una área de sección transversal  $A$  durante un incremento de tiempo  $\Delta t$ . El coeficiente de permeabilidad de los discos cerámicos (24 mm de diámetro) varió entre  $6.8 \times 10^{-11}$  m/s y  $4.5 \times 10^{-11}$  m/s.

La saturación de los discos cerámicos se verifica aplicando diferentes presiones a ambos lados del disco cerámico, una presión de aire comprimido y otra presión de agua de menor magnitud. La presión de aire comprimido es aplicada sobre una cantidad pequeña de agua (de 1 a 4  $\text{cm}^3$ ), colocada en el accesorio especial para saturar, que la fuerza a pasar por la piedra porosa al ser menor la presión agua aplicada sobre el otro lado del disco cerámico. Tanto los indicadores de

cambio de volumen de agua como los transductores de presión diferencial (TPD) registran el volumen de agua que fluye a través del disco cerámico debido al gradiente. Cuando la totalidad del agua ha pasado, la presión de aire actúa sobre los poros saturados de agua de la cerámica. Si la piedra porosa está saturada y la diferencia de presiones ( $u_a - u_w$ ) es menor al valor de entrada de aire, los medidores de volumen no registrarán cambios. Esto no se cumple totalmente debido al proceso de difusión de aire a través del disco cerámico, de la pérdida de agua por fugas y evaporación del agua a través de la línea de presión de aire. Sin embargo, un cambio brusco en la tendencia de flujo es suficiente para comprobar la adecuada saturación del disco cerámico. En la Figura 3.32 se presentan resultados de las pruebas para verificar la saturación de los discos cerámicos AVEA.

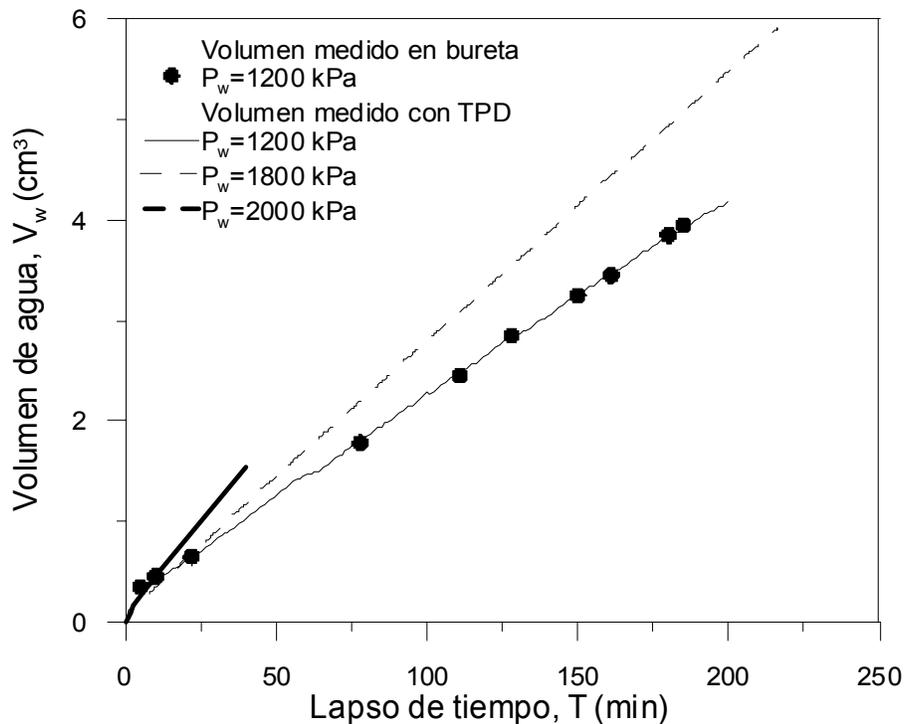


Figura 3.31 Volumen de agua contra lapsos de tiempo durante las pruebas para determinar el coeficiente de permeabilidad de los discos cerámicos AVEA

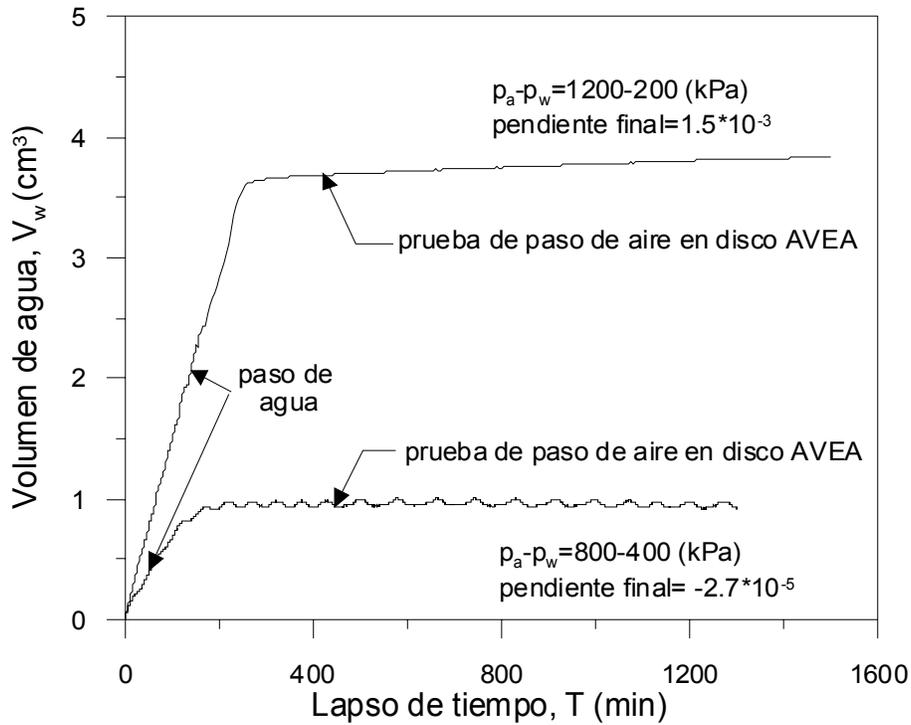


Figura 3.32 Volumen de agua contra lapsos de tiempo durante las pruebas para verificar la saturación de los discos cerámicos AVEA.

Antes de colocar la muestra, mediante la aplicación de una pequeña película de agua sobre la piedra cerámica AVEA se garantizó el contacto entre ésta y la muestra. Además, con el fin de conocer el estado inicial de la muestra, se realizaron medidas su peso, diámetro y altura. Debido a la prolongada duración de los ensayos, para evitar el fallo por rompimiento de una membrana, la muestra se cubrió con dos membranas de látex. Se han montado los LVDTs en la muestra mediante un sistema de collares y platos bases, de PVC, que son adheridos a la membrana de látex como se describió en el apartado 3.3.3.2. Para el montaje de estos transductores se utilizó una guía que permite la fijación de los collares y bases a la misma altura en todos los ensayos. Mediante la visualización en la pantalla del ordenador se verificó que los transductores marcasen la medida en mm apropiada para el inicio del ensayo. Se ha cubierto con una capa delgada de pintura acrílica blanca la parte de la membrana que ha de ser iluminada por el sensor láser, con el fin de mantener la superficie de color en ensayos de larga duración.

### **3.3.7 Correcciones por área y por membrana.**

#### **3.3.7.1 Corrección por área.**

La tensión de corte es calculada dividiendo la fuerza desviadora aplicada sobre la muestra (registrada por la célula de carga colocada dentro de la cámara del triaxial) entre un área efectiva de la muestra. Debido a que la muestra se deforma durante la consolidación y la compresión triaxial, es necesario estimar el área corregida basada en el área inicial, las medidas de deformación axial y volumétrica, y una geometría idealizada de deformación asumida. Lo más común es calcular el área transversal promedio asumiendo que la muestra se deforma manteniendo la geometría de un cilindro recto (con igual diámetro a lo largo de toda su altura). Esto podría ser admitido durante la consolidación, y aún en pruebas de compresión triaxial con platos lubricados entre el equipo y la muestra. Sin embargo, con platos rugosos, el área computada en grandes deformaciones diferirá substancialmente del área verdadera en la porción central de la muestra. En el caso de la prueba de compresión triaxial, el área de la sección transversal verdadera en la sección central de la muestra será más grande que la calculada siguiendo esta suposición, lo que conduce a una sobrestimación de la tensión axial. Germaine y Ladd (1988) presentan ecuaciones para corregir áreas transversales de la muestra, con base a las deformaciones axial y volumétrica, aplicables a los modos de deformación más comunes en pruebas triaxiales.

Considerando la historia de tensiones de las muestras a ensayar (características de compactación) y las trayectorias de tensiones que se aplicaron, las geometrías de deformación se conducen entre la cilíndrica recta y la abombada (con perfil parabólico); sin presencia de fallas de tipo frágil (con plano de corte bien definido). Debido a ello, en esta investigación se computo el área transversal de la muestra con base a las medidas locales de los desplazamientos en la sección central de la muestra, y asumiendo una geometría de deformación del tipo cilindro recto. El error por considerar durante las primeras etapas del ensayo (aplicación de succión, consolidación e inicio de compresión triaxial, con deformaciones axiales no mayores al 10%) esta geometría de deformación es despreciable. Al realizarse medidas de desplazamiento radial en cortos intervalos de tiempo (menos de 30 minutos), con los que se actualiza el cómputo del área transversal durante los ensayos, no es necesario aplicar ecuaciones para corregir el área.

Se consideró que es más representativo computar el área trasversal de la muestra mediante la medida radial local en grandes deformaciones, al no ser afectadas por los efectos de fricción presentes en los bordes de la muestra. En grandes deformaciones la geometría del espécimen se desvía bastante de una forma cilíndrica, y esto introduce incertidumbre en el uso de las correcciones comúnmente utilizadas en el análisis del área efectiva. La fricción entre los bordes del espécimen y los bordes del triaxial restringen el desplazamiento lateral del suelo en la zona adyacente a estas superficies. Esto genera condiciones no uniformes de tensiones y deformaciones a lo largo de la altura de la muestra, adoptando progresivamente ésta un aspecto semejante a un barril. Esto no puede ser estudiado considerando únicamente las medidas de deformación global, aún si la restricción de los bordes es eliminada totalmente. Este efecto está siempre presente, aunque su magnitud e importancia depende de la historia de tensiones del material y tipo de prueba.

### **3.3.7.2 Corrección por membrana.**

El efecto de restricción lateral de la membrana, que cubre el espécimen, contribuye levemente a la resistencia ofrecida a compresión en un ensayo triaxial. Para conocer la magnitud de esta contribución se han realizado correcciones por membrana debido al abombamiento que sufre la muestra (progresivo cambio hacia una geometría semejante a un barril) durante los ensayos de compresión triaxial. No siendo necesario realizar otras correcciones por membrana (plano de deslizamiento, penetración de membrana, aire atrapado, etc.). Esta corrección es necesaria conocerla ya que se ensaya una muestra de densidad muy baja ( $e=0.82$ ) cubierta por dos membranas. Henkel y Gilbert (1952) originalmente desarrollaron una corrección por membrana, que debe de ser restada a la medida de tensión de corte, para ensayos triaxiales no drenados. Duncan y Seed (1967), mencionados en Germaine y Ladd (1988), extendieron este trabajo para incluir tanto la deformación volumétrica como la axial y aplicar correcciones para tensiones axial y radial.

El módulo de elástico de la membrana es determinado siguiendo el mismo procedimiento dado por Bishop y Henkel (1962) y Head (1994), en el cual se asume que ese módulo es igual en extensión y compresión. Una porción de 25 mm de membrana es suspendida y es cargada con pesos, por incrementos pequeños, y medidas de su deformación (alargamiento) son tomadas.

Se han determinado los módulos de compresión de una membrana sin usar, otra membrana después de ser utilizada en un ensayo (de larga duración) y el módulo de compresión de dos membranas juntas. Los valores medidos son 0.33, 0.31 y 0.82 N/mm para la membrana usada, la no usada y de dos membranas respectivamente. En la Figura 3.33 se muestran las curvas peso-desplazamiento de los tres casos.

Se consideró una deformación axial del 20% como criterio de falla, cuando no fue alcanzado el estado crítico, durante los ensayos de compresión triaxial, y se juzgo que también será la máxima deformación que sufrirá la membrana. Con base a lo anterior, un módulo secante (promedio) en 10% fue usado par calcular la corrección. Para estimar la presión de confinamiento causada por la membrana al inicio de de la prueba de compresión se utilizó un módulo secante en 1% de deformación, debido a que la deformación de la membrana es muy pequeña.

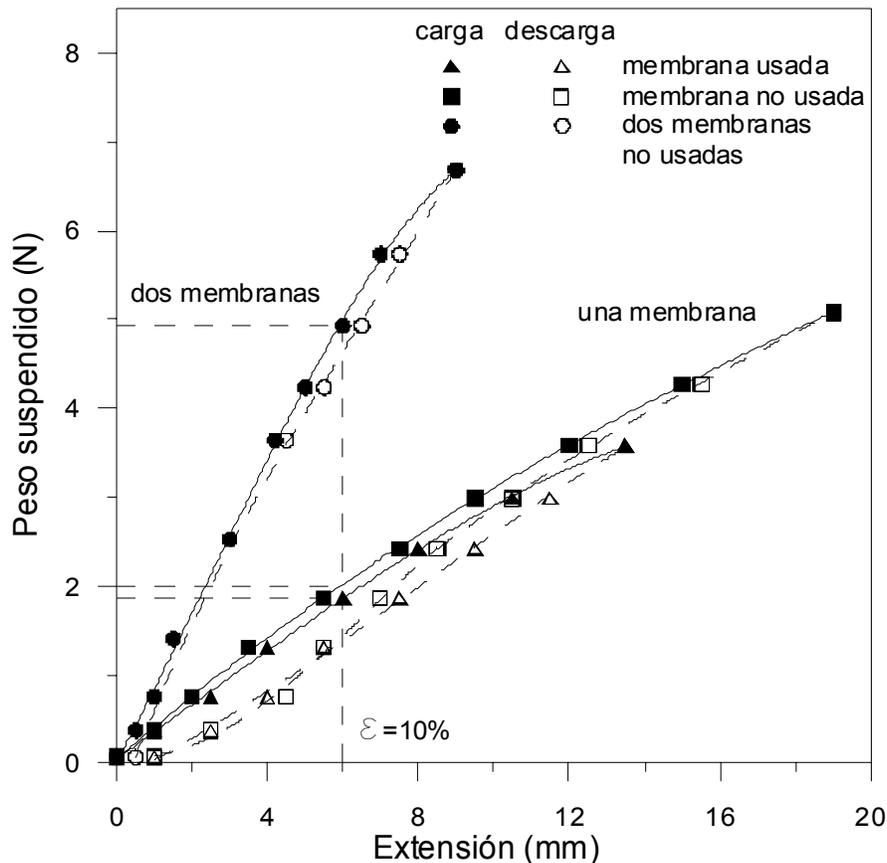


Figura 3.33 Determinación de los módulos de compresión de: una membrana sin usar, otra membrana después de ser utilizada en un ensayo (de larga duración) y de dos membranas juntas.

La magnitud de la corrección por membrana, aplicada a la tensión de corte, se estimó usando la relación presentada por Head (1994), originada de la propuesta por Henkel y Gilbert (1952):

$$c_M = \frac{0.4M\varepsilon(100 - \varepsilon)}{D}$$

Donde  $c_M$  es la corrección por membrana dada en  $\text{kN/m}^2$ ,  $\varepsilon$  es la deformación axial del espécimen, dada en porcentaje (%),  $M$  es el módulo de compresión de la membrana dado en  $\text{N/mm}$  y  $D$  es el diámetro del espécimen dado en  $\text{mm}$ . Aunque la corrección ha sido determinada para ensayos no drenados, sobre suelos saturados, puede ser usada en ensayos drenados con poco error (Bishop y Henkel, 1962). La corrección máxima, con una deformación axial de 20% y un módulo secante inicial de la membrana de  $0.87 \text{ N/mm}$  (tomando dos membranas juntas), es de aproximadamente  $15 \text{ kPa}$ . La corrección es usualmente pequeña comparada con la resistencia y el cálculo simplificado arriba es suficiente.

En cuanto a las correcciones sobre la tensión radial, se estimó la presión de confinamiento inicial provocada por la membrana con la fórmula dada (y evaluada experimentalmente) por La Rochelle et al. (1988).

$$\Delta\sigma_{rim} = 2M_i \frac{d_0 - d_{im}}{d_0 d_{im}}$$

Donde  $\Delta\sigma_{rim}$  es la presión de confinamiento inicial dada por la membrana,  $M_i$  es el módulo secante inicial de la membrana,  $d_0$  es el diámetro inicial del espécimen y  $d_{im}$  es el diámetro inicial de la membrana. Considerando que el diámetro inicial de la membrana (no tensionado) sería el 90% del diámetro de la muestra y un módulo secante inicial de la membrana de  $0.87 \text{ N/mm}$  (tomando dos membranas juntas), extraído de la Figura 3.33, para una deformación axial del 1%, la presión inicial podría ser de aproximadamente  $9 \text{ kPa}$ . La tensión radial corregida es obtenida agregando la presión de confinamiento inicial producida por la membrana a la tensión radial aplicada en el estado inicial. Esta corrección por membrana no afecta de manera importante el estado inicial de la muestra al no provocar deformaciones plásticas.

Debido a la tensión de corte (desviador) de  $10 \text{ kPa}$ , que se aplica en el estado inicial, la corrección por membrana tampoco causa una desviación significativa del estado de tensiones isótropo que se busca al iniciar los ensayos. Durante las etapas de consolidación y aplicación de

succión, donde se tienen reducciones del diámetro de la muestra, la presión ejercida por la membrana, de 9 kPa, disminuye ya que esta depende de la diferencia entre diámetros de la muestra y de la membrana. Por lo tanto, en estas etapas, el valor de la corrección se hace despreciable cuando se presentan deformaciones radiales importantes. Esta corrección se aplicaría sobre la presión de confinamiento (tensión radial), produciendo la modificación de la tensión neta media ( $p-u_{ai}$ ).

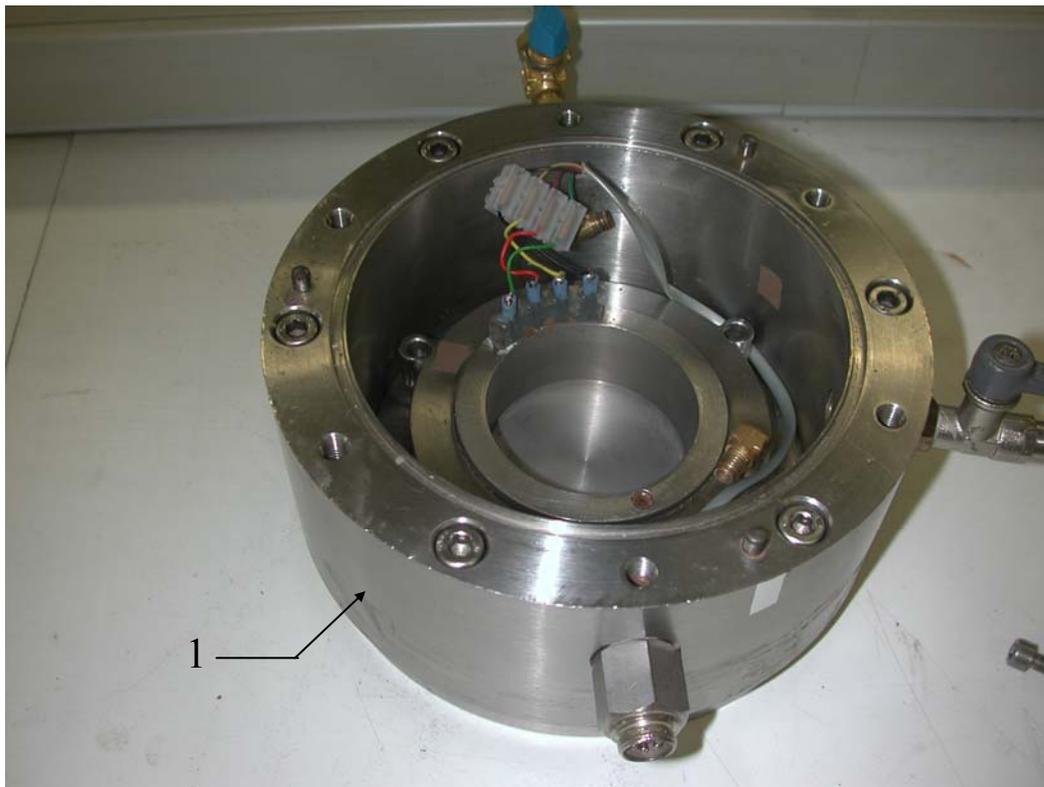
Las correcciones de la tensión radial durante la compresión triaxial, usando la relación propuesta por Duncan y Seed (1967), dependen de las deformaciones volumétricas de la muestra, por lo que causa reducciones de la tensión radial durante las deformaciones de contracción e incrementos en las dilatantes. Tal corrección se contabiliza a partir de la presión de confinamiento por membrana estimada al final de la etapa de consolidación. Debido a los dos puntos anteriores, la corrección de la tensión radial durante la compresión triaxial será de una magnitud despreciable para la presente investigación.

### **3.4 Equipos experimentales complementarios.**

#### ***3.4.1 Célula edométrica con medida de presión lateral.***

En el estudio de suelos compactados resulta de gran utilidad determinar su historia de tensiones vertical y lateral completa. Para conocer la trayectoria completa de tensiones seguida por la muestra durante la compactación estática unidimensional (a humedad constante) se realizó un estudio de tensiones, vertical y lateral, por medio de un edómetro con medida de tensión lateral. Con estos resultados es posible conocer la tensión media máxima de preconsolidación (final de compactación), de la muestra que se usará en esta investigación.

Romero utilizó un anillo edométrico con capacidad de restituir la condición de  $K_0$  mediante imponer presión a un fluido hidráulico en el interior del anillo. En este caso se utilizó un anillo semi-rígido sin compensación ni restitución de la condición de  $K_0$ . La célula edométrica con control de tensión lateral tiene cuatro partes fundamentales: base, anillo instrumentado, cuerpo central y pistón de carga. La Figura 3.34 muestra las la célula edométrica.



3.34 Célula edométrica con control de tensión lateral; (1) base y anillo instrumentado; (2) cuerpo central; (3) pistón de carga.

La base tiene por función dar apoyo al anillo durante la compactación. El anillo edométrico permite el control de la tensión lateral mediante un sistema semi-rígido y tiene dimensiones de 70mm de diámetro y 30mm de altura. 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 extensométricas, 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. 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.

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.

### **3.4.2 Célula triaxial automática. (GDS instrument Ltd.)**

En las Figuras 3.35 y 3.36 se presenta un esquema general y la imagen del equipo triaxial para realizar ensayos convencionales sobre suelos saturados. En estas figuras se muestra 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. 3.37 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 se aplica en la base de la célula triaxial a través de un servomotor con un límite de recorrido de  $\pm 100$  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  $\mu\text{m}$ .

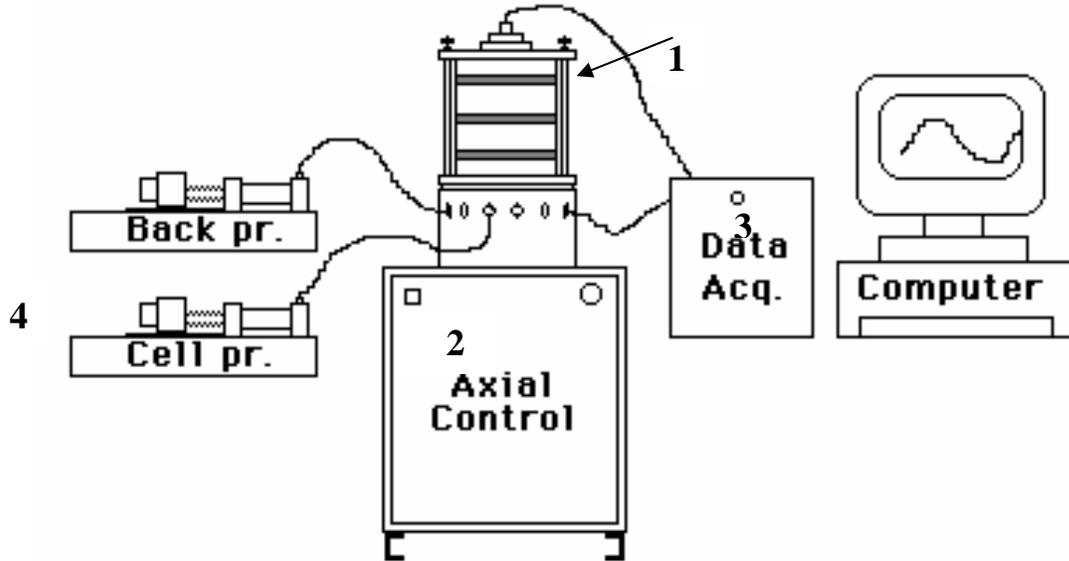


Figura 3.35 Equipo triaxial: (1) célula triaxial, (2) control axial, (3) adquisición de datos y acondicionamiento de señal, (4) controladores digitales de presión y volumen (Barrera 2002).

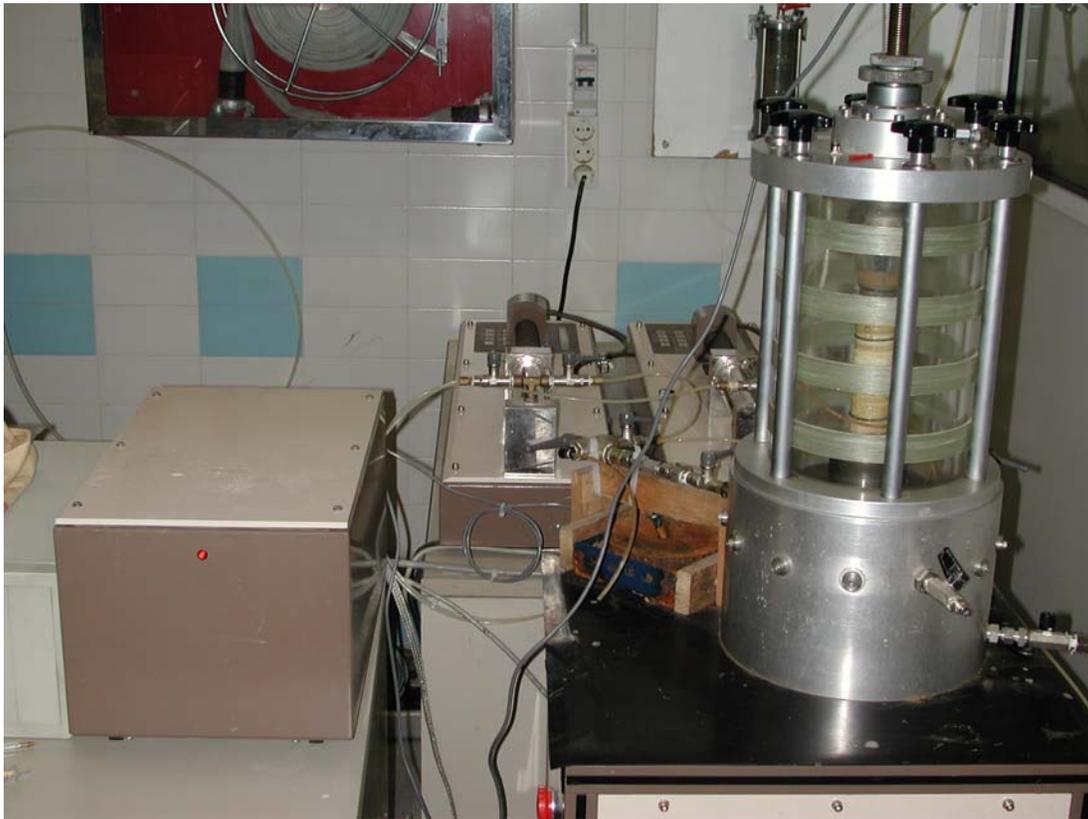


Figura 3.36 Triaxial automático (GDS Instruments Ltd).



Figura 3.37 Controladores digital de presión y volumen, utilizados para imponer presión de confinamiento y presión de cola.