

Capítulo 3

Equipo Triaxial para Escolleras

El diseño de un equipo triaxial para escolleras, comienza por la toma de una decisión acerca del tamaño de probeta que se ha de utilizar. Esta en función del tamaño de la escollera, que oscila entre 0.6 y 2 m de diámetro, por tanto, el equipo tiene a ser de grandes dimensiones. Su tamaño ideal sería aquel que albergara una probeta con partículas del mismo tamaño, que las que se utilizan en la construcción de presas. Esta idea condujo a Marsal (1963b) y Marachi *et al.* (1969) a desarrollar equipos gigantescos; con tamaños de probetas de 2.50 m de altura por 1.13 m de diámetro y de 2.28 m de altura por 0.91 m de diámetro respectivamente. Lo que se significó una gran inversión, y aún así, no se llegó a ensayar material del tamaño utilizado en las obras de construcción de presas. La maniobrabilidad de un equipo de estas dimensiones no es sencilla, es necesario además equipamiento adicional para su manejo. La restricción económica y funcional lleva por tanto a pensar en equipos de menor tamaño; que sean asequibles y se puedan manejar con relativa facilidad.

No se ha vuelto a invertir en la construcción de equipos de grandes dimensiones. Actualmente se utilizan equipos de menor tamaño, empleando granulometrías escaladas geoméricamente (Marachi *et al.* 1969). Los equipos triaxiales actuales para escollera tienen un diámetro de probeta que oscila alrededor de 300 mm. (Veiga Pinto 1983, Indraratna *et al.* 1993, Bathurst y Karpurapu 1993, Flora y Modoni 1997). Se recomienda en general, mantener una relación diámetro de la probeta a tamaño máximo de la partícula de 6 (Marachi *et al.* 1969, ASTM D4767). En el departamento de Ingeniería del Terreno de la UPC se construyó un edómetro de diámetro de 300 mm y se utilizó un tamaño máximo

de partícula de 40 mm (Oldecop 2000); esta investigación previa condujo a la idea de estudiar el material en condiciones triaxiales. Como el objetivo era conocer el comportamiento desviador del material bajo distintas succiones, en el presente estudio se utiliza el mismo material y granulometría empleados en el edómetro. Con estos datos se decidió construir un equipo, con un diámetro de probeta de 250 mm por 500 mm de altura; se logra así, una relación diámetro de la probeta a tamaño máximo de 6.25, adecuada según las recomendaciones comúnmente aceptadas.

En el diseño del equipo triaxial se prefirió optar por la instrumentar internamente de la célula triaxial. Se utilizaron dos formas de medición interna la global y la local. La global se refiere a la medición hecha en base a las dimensiones generales de la probeta. La referencia global que se toma para la deformación axial, es el cabezal, y la de la deformación volumétrica, es el volumen de agua que desaloja la probeta cuando se deforma. La medición local se refiere a la colocación de un transductor en la zona media de la probeta. La deformación axial se mide sobre la parte media de la probeta y para la deformación volumétrica se mide directamente el diámetro de la probeta en la zona deseada. Es preferible realizar medidas locales para evitar acumulación de errores por mal contacto con el cabezal y por penetración de membrana, entre los principales. Este tipo de instrumentación lo poseen muy pocos equipos para ensayos en escolleras.

3.1 Descripción general del equipo

Las partes principales del equipo son: la célula triaxial, la prensa de aplicación de carga, la instrumentación, el sistema de adquisición de datos, el control de temperatura y los accesorios para el montaje del equipo. La aplicación de carga axial se hace con una bomba de aceite conectada al pistón de un marco de carga, este sistema es capaz de aplicar hasta 1 MN. Permite realizar ensayos con deformación controlada; mediante la aplicación de un gradiente de presión elevado. Para mantener la carga axial constante, se diseñó una interfase aire-aceite, con capacidad de aplicar una carga axial de 156 kN. La presión de confinamiento se aplica con aire comprimido.

El diseño de la célula triaxial, empezó con la ubicación de la instrumentación dentro de la célula triaxial. Existen mediciones que se repiten con el fin de realizar una verificación

global o indirecta. Para medir la deformación axial se utilizan LVDT (Linear Variable Differential Transducer) y LDT (Local Deformation Transducer). La deformación radial se mide con células de medición diametral (CMD), especialmente desarrolladas para el equipo. Además, la célula triaxial cuenta con un sistema de doble pared que permite realizar mediciones de cambios de volumen; captando la variación del nivel de agua de la cámara interior con un transductor diferencial de presión (Differential Pressure Transducer, DPT). La carga vertical se mide con una célula de carga que está atornillada en el cabezal. El equipo permite imponer la humedad relativa deseada a la probeta; aplicando un flujo de vapor de agua, que se encuentra en equilibrio termodinámico con una solución colocada en un recipiente dentro del circuito (Oldecop 2000). Se utiliza una tarjeta de adquisición de datos de 16 bits para grabar las salidas amplificadas de los transductores durante los ensayos. Los equipos auxiliares principales son: una grúa constituida por un pescante giratorio, y un polipasto con una capacidad de soportar 9.8 kN; un molde para la compactación; y pisón compactador.



Figura 3.1 Fotografía del equipo triaxial de escolleras. a) Célula triaxial, b) Grúa para la manipulación del equipo.

La Figura 3.1 muestra una fotografía de la célula triaxial colocada sobre la prensa y de la grúa utilizada. En la foto a), a la izquierda se encuentra el equipo de adquisición de datos y un tablero con reguladores de presiones de aire, amplificadores y fuentes de alimentación que suministran a los transductores. Al lado derecho de la misma foto, se encuentra la bomba de aceite para la aplicación del desviador y el pisón compactador. En la foto b), se observa la grúa con que se realizan todas las maniobras del montaje del equipo. Sobre el pescante se desplaza y cuelga el polipasto manual. Al polipasto se engancha un pulpo con tres brazos que permite sujetar las piezas de una manera más estable.

El equipo se describe en dos partes en el apartado siguiente: la célula triaxial junto con la instrumentación y el sistema general donde se ubica a la célula triaxial como un elemento más.

3.1.1 Célula triaxial. Elementos mecánicos

Antes de empezar el diseño de la célula triaxial, se definieron las mediciones que se querían realizar y los transductores más adecuados para obtener la información y colocarlos dentro de la célula. En base a los requerimientos de espacio de los transductores, se les asignó una ubicación dentro de la célula, y, con esta distribución se dimensionó la célula triaxial.

La idea inicial era colocar la célula triaxial en el laboratorio de temperatura controlada, que se ubica en la primera planta del edificio D2 del Departamento de Ingeniería del Terreno. Debido a las dimensiones que se necesitaban y el poco espacio con el que se contaba, aunado a la problemática de encontrar transductores comerciales capaces de captar las mediciones deseadas, con un tamaño mínimo, y, a la necesidad de construir una prensa especial para la aplicación del desviador, se desistió de ubicar el equipo en ese espacio. Se eligió como ubicación del equipo el garaje del edificio D2; donde anteriormente se había empezado a poner a punto un edómetro de escolleras de grandes dimensiones. Contando con un espacio más grande se pudo pensar en transductores con menos restricciones, y se comenzó a dimensionar la célula.

Se ubicaron tres LVDT que miden del desplazamiento axial, espaciados horizontalmente a un ángulo de 120° sobre el cabezal. La medición del volumen se realiza de manera global e indirecta. Para ello, se coloca un segundo cilindro interior lleno de agua, para medir el nivel del agua localizado entre el cilindro y la prolongación del cabezal, con un transductor diferencial de presión. La presión de confinamiento se aplica con el sistema de aire comprimido del laboratorio, el cual, tiene una capacidad de 2.94 MPa. La presión dentro de la célula triaxial se mide con un transductor de presión (Pressure Transducer, PT), externo, conectado a la célula triaxial. Para conocer la carga aplicada en la probeta, se colocó una célula de carga interna en el cabezal donde se apoya el eje de aplicación de carga. Con las consideraciones anteriores se llegó a la configuración general de la célula triaxial, que se muestra en detalle en el esquema de la Figura 3.2.

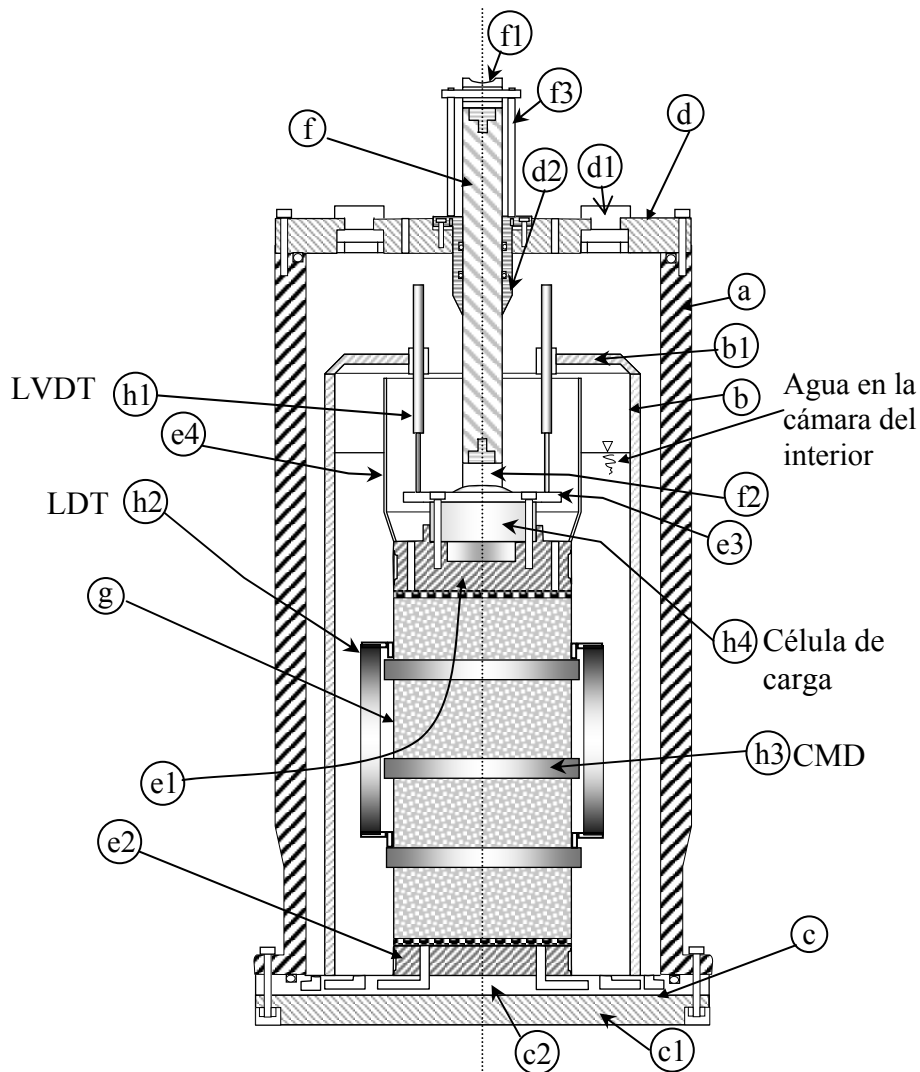


Figura 3.2 Esquema de la cámara triaxial desarrollada.

Posteriormente surgió la idea de colocar transductores de medida local. Se pensó en desarrollar las células de medición diametral (CMD). Su desarrollo no influía en la configuración ya definida del equipo, por lo que se diseñaron paralelamente a la célula triaxial (se explica detalle en el apartado 3.2.1). Después de realizar los primeros ensayos, se pensó en implementar otro transductor local para la medición de la deformación axial, y así eliminar los errores por mal contacto entre el cabezal y la probeta, efecto “bedding”. Se decidió colocar unos LDT, como los desarrollados por Goto *et al.* (1991) para pequeñas deformaciones, pero utilizados para un rango mayor de deformaciones. Para colocar los LDT se diseñaron unos soportes adosados a las CMD. Este sistema se adapta perfectamente al espacio entre el cilindro interior y los soportes de las células diametrales, donde se montaron, aunque la muestra haya dilatado.

La cámara principal de la célula está diseñada para soportar presiones de hasta 3 MPa y se compone de tres piezas: la tapa (d)*, la base (c) y un cilindro central (a), que se construyeron de acero ST-52 (límite de fluencia 47 kg/mm², resistencia última 65 kg/mm²). Para evitar su corrosión estas piezas se galvanizaron. La base esta formada de dos piezas, y solo una es de acero ST-52 (c1), su función es estructural. La otra (c2) aloja las tuberías que conducen el agua y los cables eléctricos al interior de la célula, por ello es de acero inoxidable AISI 316 (límite de fluencia 29 kg/mm², resistencia última 58 kg/mm²).

La tapa (d) tiene dos componentes importantes: 4 ventanas (d1) y la guía del eje que aplica la carga (d2). Las ventanas están alojadas en perforaciones con un diámetro de 100 mm. Se colocan en ellas cristales templados, que resisten una presión de 3.92 MPa y tienen un diámetro de 80 mm. Observando a través de las ventanas, se verifica el montaje y la variación del nivel del agua durante los ensayos. La guía del eje se encuentra atornillada a la tapa, y se extiende hacia abajo 120 mm para mantener vertical el eje. Esta guía tiene dos sistemas de juntas tóricas que aseguran la estanqueidad. Cada sistema está compuesto de una tórica y un anillo de teflón. La tórica empuja al anillo de teflón contra el eje (f) cuando se aumenta la presión de confinamiento en la célula. El contacto teflón-eje garantiza un mínimo rozamiento. Para mantener una distancia constante entre la guía y el eje, se

* En el presente apartado, las letras entre paréntesis se refieren a las partes de la célula triaxial referenciadas en la Figura 3.2.

colocaron dos bandas deslizantes de bronce, grafito y teflón, de 10 mm de ancho por 2.5 mm de espesor a los lados exteriores de los sistemas de estanqueidad.

El eje o pistón de carga (f) esta fabricado de acero F-122, con un cromado exterior. En sus extremos superior e inferior se colocaron rótulas, la inferior (f2) se adapta perfectamente a la superficie curva de la célula de carga (h4). Además permite y limita el giro del conjunto del cabezal a un máximo de 3.5°. La rótula superior (f1) ensambla con la rótula del marco de carga, ubicada en el eje de apoyo. Cuando el pistón no se utiliza, descansa en un pequeño marco desmontable (f3) ubicado sobre la tapa.

El cilindro principal (a) tiene una altura de 1.15 m con un diámetro interior de 0.551 mm por 20 mm de espesor. Tiene una disminución en el diámetro exterior en la parte inferior para atornillar cómodamente el cilindro en la base de la célula triaxial (c).

La base principal (c) tiene un espesor total de 112 mm. La placa de acero inoxidable (c2) tiene un espesor de 37 mm y se utiliza para alojar tuberías de 15 y 24 mm necesarias para la conducción del agua, aire y los cables eléctricos al interior de la célula. La parte complementaria de la base (c1) tiene un espesor de 75 mm, es la parte estructural del conjunto de la base. Para lograr la estanqueidad cuando se introducen los cables por la base, se coloca un conector multipolar macho roscado en un racor especial, se rellena la zona de las conexiones eléctricas con una resina epóxica y por último se instala el racor en la base de acero inoxidable con cinta de teflón.

Para conectar la base de la célula triaxial con el cabezal de la probeta, se utilizan tubos de poliamida con diámetro exterior de 12 mm y un espesor de 1.5 mm. En las conexiones de los racors ubicados en el interior de la célula triaxial, se utiliza un refuerzo en el interior de los extremos de las tuberías, para evitar que el tubo se deforme y provoque fugas del aire comprimido hacia el interior de la probeta.

El cabezal (e1) y la base (e2) de la probeta son de acero inoxidable, tienen un diámetro de 250 mm. En la parte central poseen una franja de un diámetro menor (242 mm). En esta zona se coloca una banda de látex de 2 mm de espesor. La estanqueidad se logra aprisionando la membrana de neopreno en la zona de menor diámetro del cabezal o la base

de la probeta, con dos bridas de acero inoxidable contra las bandas de látex. Como discos porosos se utilizan discos perforados con un acabado muy pulido, para disminuir al máximo el rozamiento entre el material y el disco. Están contruidos con acero inoxidable y tienen un diámetro 236 mm por 10 mm de espesor.

En la parte superior del cabezal sale un pequeño cilindro hueco que aloja a la célula de carga, y la fija horizontalmente. Para fijarla verticalmente se utiliza un anillo (e3) que abraza la célula por su parte superior, y se atornilla al cabezal. Este anillo sirve también como apoyo a los LVDT (h1) que miden el cambio de longitud de la probeta.

Al cabezal se le construyó una prolongación (e4), con ayuda de un pequeño cilindro de acero F-115 galvanizado, que se rosca al cabezal con una tórica para lograr la estanquidad. La prolongación del cabezal (e4) y el cilindro interior (b), forman un cilindro hueco de dimensiones regulares. Esta zona es ideal para relacionar el cambio de altura del agua con el cambio de volumen de la probeta.

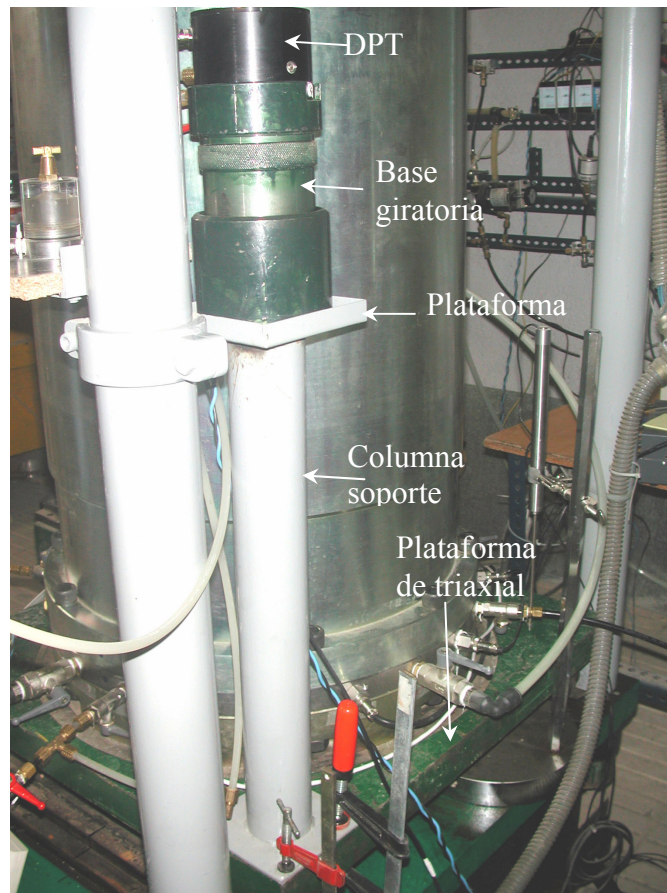


Figura 3.3 Sistema de soporte del DPT.

Como la zona de medición está formada por paredes que tienen a ambos lados presión, éstas no se deforman y no son necesarias correcciones a la altura del agua por este concepto.

El DPT está ubicado fuera de la célula triaxial conectado mediante tubos de poliamida que tienen un diámetro interior de 5 mm y uno exterior de 8 mm, (estos tubos son capaces de resistir presiones de hasta 3.9 MPa sin romperse). El DPT tiene dos entradas de presión, la que soporta la presión mayor se conecta al agua por la base (presión neumática y altura de agua) y la otra al aire por la tapa.

Una columna de acero que se atornilla a la plataforma del triaxial, y sostiene al DPT (ver Figura 3.3). Así la referencia inicial del nivel de agua no cambia cuando la célula triaxial es elevada por el pistón de carga. Esta columna tiene una pequeña plataforma en su parte más alta. Aquí reposa el DPT, fijado en una base giratoria que permite regular su altura en el caso de que se decida mover la referencia inicial del nivel de agua. La base giratoria permite variar la altura hasta 100 mm.

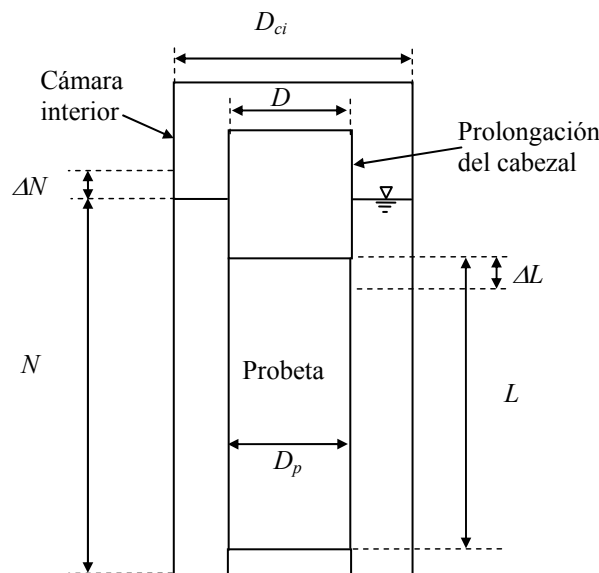


Figura 3.4 Esquema para la deducción de la relación entre el cambio de volumen de la probeta y el cambio de nivel detectado por el DPT.

La ecuación que relaciona el cambio de volumen de la probeta, con el cambio del nivel de agua, se deduce del esquema en la Figura 3.4. El cilindro hueco que se forma con la

prolongación de cabezal, penetra a medida que se deforma axialmente la probeta (el volumen que penetra está dado por $V_p = \Delta L D^2 \pi / 4$). Si no existiera cambio de volumen en la probeta, el volumen expulsado ($V_e = \Delta N (D_{ci}^2 - D^2) \pi / 4$) es igual al volumen que penetra V_p . Cuando el volumen expulsado es menor al que penetra se detecta una disminución del volumen en la probeta, y en caso contrario una dilatación. Siguiendo el razonamiento anterior la deformación volumétrica se obtiene como:

$$\varepsilon_p = \frac{\text{volumen que penetra} - \text{volumen que expulsa}}{\text{volumen inicial de la probeta}} = \frac{\Delta V}{V_0} \quad (3.1)$$

Si ΔV es positivo existe una compresión del material y en caso contrario una dilatación.

Por último, la membrana (g) que se utiliza está hecha de neopreno (policloropreno), con una dureza media. Se utilizan espesores de 3 y 4 mm para muestras húmedas y secas, respectivamente. Inicialmente se utilizaban espesores de 3 mm para todos los ensayos, pero cuando se empezó a ensayar el material seco la membrana se perforó, y se decidió utilizar membranas con espesores de 4 mm para este tipo de ensayo. El neopreno tiene un módulo de elasticidad de 5.68 MPa a 300 % de deformación, según el fabricante. La fabricación de la membrana se realiza mediante el vulcanizado de una lámina de neopreno, con un ancho suficiente para formar una circunferencia con un diámetro de 249 mm. Se eligió este material en base de ensayos realizados en una cámara triaxial con diámetro de muestras de 150 mm. El material utilizado fue el mismo que se utilizaría para los ensayos triaxiales, pero no se compactó para provocar grandes deformaciones y producir aprisionamientos de la membrana entre las partículas. Los materiales ensayados fueron: látex, polibutadieno y neopreno. El neopreno fue el único material que no se perforó con la aplicación de presiones de confinamiento de 1.5 MPa.

3.1.2 Equipos auxiliares

En esta sección se describen los equipos complementarios a la célula triaxial, que son el sistema de adquisición de datos; el panel de alimentación y control; la bomba de aire, para transportar el vapor de agua a través de la probeta; la prensa para la aplicación de la carga

y la grúa para facilitar el montaje del equipo. En la Figura 3.5 se muestra un esquema general del equipo triaxial.

Para registrar y almacenar los datos se cuenta con un ordenador Pentium, con una tarjeta de adquisición de datos instalada en el ordenador. La tarjeta es de marca National Instruments de 16 bits y es capaz de registrar 16 canales, cuando se le configura como “single ended”. Se habilitaron un total de 14 canales, que se distribuyen de la manera siguiente: 3 para los LVDT internos y 1 para el externo, 3 para las CMD, 2 para los LDT, 2 para el higrómetro (temperatura y humedad relativa), 1 para el transductor de presión, 1 para el DPT y 1 para la célula de carga. Para poder captar de una manera controlada la respuesta de los transductores, se hizo un programa de adquisición de datos en Visual Basic. El programa calcula el promedio de los datos obtenidos en cada canal cada mil lecturas, y después despliega la información en pantalla. Se pueden almacenar las lecturas con tiempo constante o de manera incremental. La visualización de los resultados en forma grafica durante el ensayo, da la opción de comparar las principales variables geotécnicas como p , q , ε_p , ε_q , ε_l , tiempo, número de lecturas, etc. La grabación de los datos en el archivo, se hace cada vez que se cumple el tiempo establecido como intervalo de lectura.

En el panel de control se ubican, los transformadores de corriente y acondicionadores de señal que utilizan los transductores, dos reguladores de presión de aire con capacidad de regular hasta 2.8 MPa, el transductor de presión, y la unidad de salida del higrómetro.

Para formar un circuito capaz de variar la humedad relativa, es necesaria una bomba de aire. La que se utiliza está construida con dos bombas de diafragma, cada una con caudal de 0.233 l/s, que se pueden conectar en paralelo y lograr un caudal de 0.467 l/s. La bomba está instalada en una pequeña plataforma de madera fijada a las columnas de la prensa.

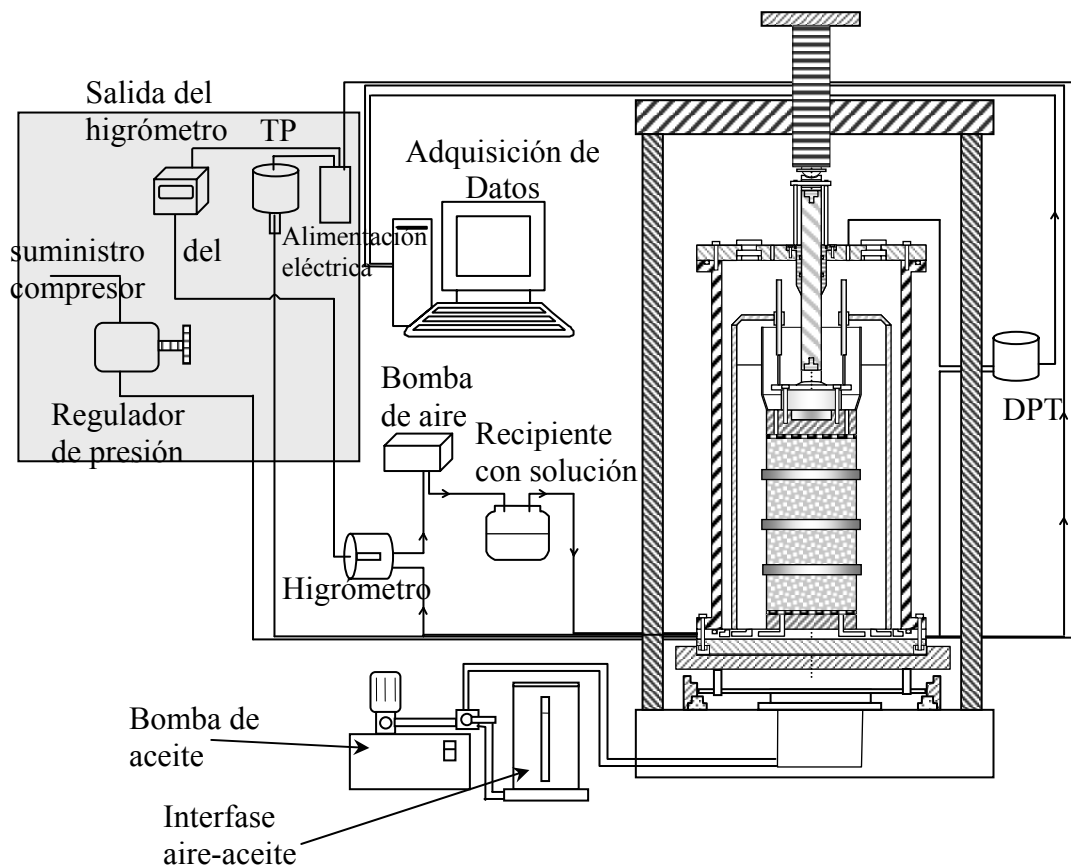


Figura 3.5 Esquema general del equipo triaxial de escolleras.

El marco de carga tiene en su parte inferior un pistón hidráulico de 285 mm de diámetro efectivo, que es accionado por medio de una bomba de aceite o por una interfase aire-aceite. La bomba de aceite es capaz de generar una presión de 15.69 MPa, con lo que se logra aplicar 1 MN. El caudal máximo de la bomba es de 51.67 ml/s, que equivale a una velocidad de desplazamiento del pistón de 20 mm/s, el caudal puede ser restringido por un regulador de caudal. La bomba se utiliza para realizar pruebas con deformación controlada. En la interfase, la presión es suministrada por el sistema de compresión de aire del laboratorio, máximo 2.5 MPa, con lo que se logra aplicar una carga de 147 kN. La interfase aire-aceite se utiliza cuando se quiere hacer un ensayo con tensión controlada.



Figura 3.6 Molde de compactación colocado sobre la base del triaxial.

La prensa tiene un carro donde se coloca la célula triaxial, se desplaza sobre unos raíles que se prolongan 0.7 m fuera del marco, ubicados en la parte inferior de la prensa. La célula triaxial se puede mover hacia dentro, para realizar un ensayo; o hacia fuera del marco de carga, para desmontarla. En la parte superior del marco de carga, hay un vástago móvil que en su punta inferior tienen una rotula ajustable, que sirve de tope al eje de carga de la célula triaxial, cuando el pistón hidráulico la levanta.

Se utilizó una grúa tipo pescante giratorio de columna y mono-riel, con un polipasto manual con capacidad de soportar 9.8 kN en su parte más alejada, para mover las piezas durante el montaje del equipo.

Para compactar la muestra se construyó un molde de acero seccionado en tres partes. Dos secciones se unen con bisagras y la última cierra el molde con un sistema agarre-apriete. Al compactar, se coloca la membrana en la base de la probeta, después de coloca el molde y se procede a compactar (ver foto de la Figura 3.6).

3.2 Instrumentación

En el presente apartado se describen los transductores que se utilizan para medir los estados tensión-deformación de la probeta en la célula triaxial. En la primera parte se explica el diseño de los transductores de medida local. Después se exponen las características de los transductores comerciales utilizados, y por último, se presentan las calibraciones y la estabilidad de los transductores.

3.2.1 Desarrollo de sistemas de medida local

3.2.1.1 Células de Medición Diametral (CMD)

Las características elegidas para el transductor de medición del diámetro de la probeta son las siguientes: sumergible en el agua, que resistiera y fuera poco sensible a la presión de confinamiento, y que ocupara poco espacio. Entre los sensores comerciales no se encontraron opciones, debido a lo poco usual de las dimensiones de la probeta. Fue entonces, cuando se pensó en diseñar un transductor que cumpliera los requisitos planteados.

Después de varios bosquejos y pruebas, se llegó con la ayuda del personal del Laboratorio de Geotecnia de la UPC, a la idea final del equipo que se muestra en la Figura 3.7a. El transductor está compuesto de dos piezas diferentes: la primera es un muelle con forma de semi-círculo hecho de fleje y la segunda es un soporte que une dos muelles mediante una bisagra. La forma del muelle sin deformar es circular con un diámetro inicial de 160 mm. Después de construir cada muelle se les aplicó ciclos de deformación con una magnitud tal que la distancia entre los extremos fuera aproximadamente 300 mm, abertura similar a la que estaría sujeto cuando trabajase; para asegurar que el material estaría en el rango elástico. El muelle tuvo una pequeña recuperación para quedar con un diámetro inicial aproximado a 207 mm y una abertura entre extremos de 100 mm, aproximadamente. Este es un elemento que sufre deformaciones geométricas grandes; por esta razón se construyó de fleje templado, material ideal para trabajar como muelle. El material de los muelles es fleje de acero inoxidable AISI 301 $\frac{3}{4}$ duro (tensión de fluencia 930.9 MPa), con dimensiones de 1 mm de espesor por 30 mm de ancho. Los soportes tienen una forma ligeramente curvada, para ajustarse a la forma de la probeta, además de cuatro pequeñas

patas rugosas en las esquinas que evitan el deslizamiento del transductor. Una vez que el transductor se coloca en la probeta, se auto-sustenta con la fuerza ejercida por los dos muelles.

Para captar las deformaciones del fleje cuando se separan los dos soportes, se colocó un puente de Wheatstone completo (dos galgas extensométricas por cada lado del fleje); en el centro de uno de los muelles. Con esta disposición se logró una respuesta totalmente lineal, ya que las deformaciones en la zona de compresión son iguales a las de la zona de tracción, y se tiene una sensibilidad cuádruple de la obtenida con una sola galga (Pallás 1998). El muelle sin puente de Wheatstone sirve de contrapeso e incrementa la fuerza de auto-sostenimiento del transductor.

Para obtener un transductor sumergible en el agua y resistente a la presión de confinamiento, se utilizaron galgas sumergibles tipo KFW fabricadas por Kyowa (ver foto en Figura 3.7b). Este tipo de galga es fácil de colocar y no necesita ningún tratamiento especial, debido a que está provista de un recubrimiento de resina que protege la galga y su conexión. El cable tiene un forro de vinilo para aislarlo del agua. Las conexiones para formar el puente de Wheatstone se hacen fuera del agua.

Las características principales de las galgas son las siguientes: factor de galga 2.12 ± 1.0 %, la resistencia de la galga es de 120Ω , puede resistir presiones hasta de 10 MPa durante 100 horas, la longitud de la galga es 5 mm, la máxima deformación admisible es 2.8 % (28 000 $\mu\varepsilon$) y las deformaciones de la galga ocasionadas por los cambios de temperatura se auto-compensan cuando se instalan en acero inoxidable en un rango de temperaturas de 10 a 80 °C. La resina epóxica utilizado fue EP-18 adecuado para grandes deformaciones.

La vida útil de las galgas está limitada por las condiciones del recubrimiento de resina. Se espera que su vida útil sea mayor de 100 horas, debido a que las presiones que se utilizan son menores de 1 MPa.

La configuración del transductor ocupa poco espacio, y a medida que el diámetro de la probeta crece, el espacio que ocupan los muelles se reduce. Con esta configuración se

puede llegar a medir un diámetro máximo de 300 mm, una deformación radial de 20% en dilatación y prácticamente cualquier porcentaje en compresión.

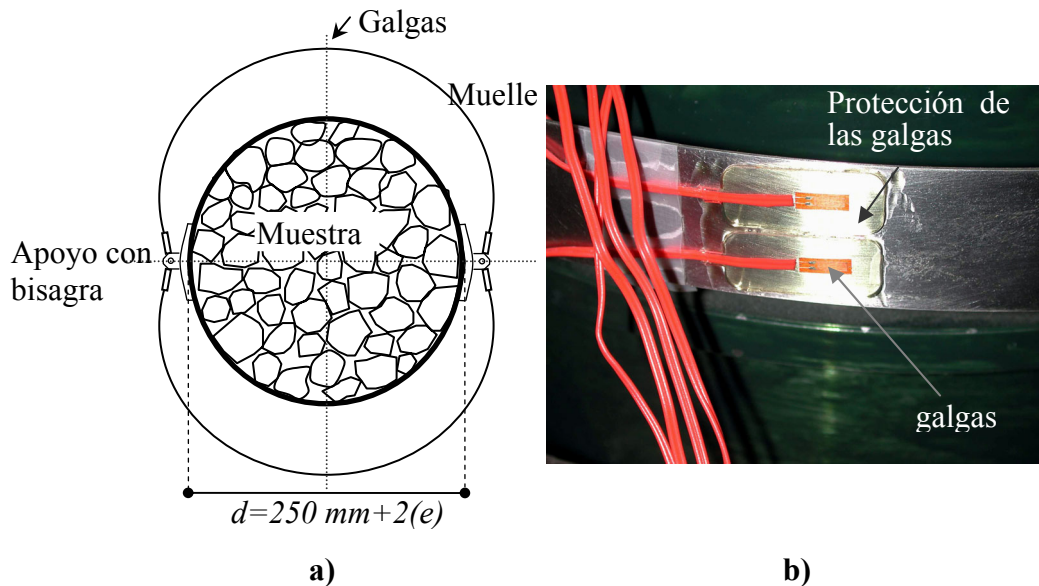


Figura 3.7 a) Esquema en planta de la célula de medición diametral (CMD), b) foto de las galgas colocadas sobre el fleje.

Se hizo un análisis de las deformaciones que se producen en la fibra externa del fleje en relación con la abertura d (Figura 3.7a). Se utilizó el método de la carga unitaria para el cálculo de los desplazamientos basado en método de los trabajos virtuales. Este método no proporciona la elástica de todo el fleje, pero sí los desplazamientos en los extremos, lo que es suficiente para el presente análisis.

El método de los trabajos virtuales dice:

“Si se considera una pequeña deformación virtual en una estructura deformable en equilibrio originada por la acción de un sistema de cargas, entonces el trabajo virtual realizado por las fuerzas externas (o cargas) es igual al trabajo virtual realizado por las fuerzas internas (o resultantes de esfuerzo)”. (Gere y Timoshenko 1986).

Expresándolo en forma matemática tenemos que:

$$W_{ext} = W_{inter} \quad (3.2)$$

La evaluación del trabajo virtual externo W_{ext} , es la debida a la aplicación de cargas sobre las estructura, cuando se aplica un desplazamiento virtual. En el caso de una carga concentrada será el producto de la fuerza por el desplazamiento virtual. El trabajo interno es el realizado por las resultantes de tensión que actúan sobre un elemento diferencial, cuando es sometido a una deformación virtual. Para las resultantes N , M , V , y T debidas a carga reales (carga normal, momento flector, fuerza cortante y torsión) y las deformaciones virtuales $d\delta$, $d\theta$, $d\lambda$ y $d\phi$, asociadas a un desplazamiento virtual de la estructura. El trabajo interno se puede entonces obtener integrando a lo largo del elemento, de las resultantes por el diferencial del desplazamiento, es decir:

$$W_{inter} = \int N d\delta + \int M d\theta + \int V d\lambda + \int T d\phi \quad (3.3)$$

Ahora se aplica el método de la carga unitaria que considera dos sistemas de carga (Gere y Timoshenko 1986). El primero consiste en que la estructura es sometida a cargas reales que producen el desplazamiento a calcular. El segundo es una carga unitaria que actúa sobre el sistema. La clave del método es una selección adecuada los desplazamientos. Se considera que las deformaciones reales producidas por las cargas reales (primer sistema, que produce un desplazamiento externo Δ), se imponen a la estructura que se encuentra sometida a una carga unitaria (segundo sistema). Así el trabajo exterior tendrá el valor de:

$$W_{ext} = 1 \cdot \Delta \quad (3.4)$$

La carga unitaria ficticia debe corresponder con la dirección del desplazamiento que se desea calcular y puede ser una fuerza o un momento. Se ubica en el punto de aplicación de carga donde se quiere obtener el desplazamiento y su dirección positiva corresponde con la del desplazamiento.

El trabajo virtual interno es el resultado del producto de las fuerzas resultantes internas virtuales (N_u , M_u , V_u , y T_u , producidas por la carga unitaria externa), por las deformaciones reales que ocurren en la estructura. Entonces el trabajo virtual interno se calcula con:

$$W_{inter} = \int N_u d\delta + \int M_u d\theta + \int V_u d\lambda + \int T_u d\phi \quad (3.5)$$

Por último aplicando la ecuación (3.2) de los trabajos virtuales se obtiene la ecuación general de la carga unitaria:

$$\Delta = \int N_U d\delta + \int M_U d\theta + \int V_U d\lambda + \int T_U d\phi \quad (3.6)$$

Donde Δ es el desplazamiento buscado. N_U , M_U , V_U , y T_U las resultantes de las tensiones producidas por la carga unitaria aplicada, que representan: la fuerza axial, el momento flexionante, la fuerza cortante y el momento torsionante. $d\delta$, $d\theta$, $d\lambda$ y $d\phi$ son las deformaciones provocadas por las cargas reales. Si el material de que está hecho la estructura se comporta de manera elástica, es decir es válida la ley de Hooke, las deformaciones debidas a cargas reales puede calcularse como:

$$d\delta = \frac{N_L dx}{EA}, \quad d\theta = \frac{M_L dx}{EI}, \quad d\lambda = \frac{V_L dx}{GA}, \quad d\phi = \frac{T_L dx}{GI_p} \quad (3.7)$$

Donde el subíndice L se denota a las cargas reales aplicadas. Sustituyendo las ecuaciones (3.7) en la (3.6), se obtiene:

$$\Delta = \int \frac{N_U N_L}{EA} dx + \int \frac{M_U M_L}{EI} dx + \int \frac{V_U V_L}{GA} dx + \int \frac{T_U T_L}{GI_p} dx \quad (3.8)$$

Donde Δ , es un desplazamiento debido a la carga axial (N), flexión (M), cortante (V), torsión (T), o una combinación de varias. El subíndice (L) indica la condición de carga real y el subíndice (U) es una condición de carga virtual, en la dirección del desplazamiento que se desea encontrar. E es el módulo de elasticidad, I momento de inercia, A el área de la sección, G el módulo de corte y I_p el momento polar de inercia.

Volviendo al caso del análisis de los desplazamientos en el fleje, se comienza dibujando el diagrama simplificado de cuerpo libre (Figura 3.8a). Se considera solamente la mitad del fleje sin deformar (que es una circunferencia), debido a la simetría que existe. Por lo que tenemos un semicírculo empotrado en uno de sus extremos (A), que corresponde al punto donde se instalan las galgas, y, en el B, una fuerza horizontal P aplicada que corresponde uno de los soportes de donde se unen los dos muelles. La justificación para utilizar el método de la carga unitaria, originalmente desarrollada para flexión en barra recta, en

nuestro caso; es que el espesor es muy pequeño en comparación con el radio (Gere y Timoshenko 1986). Esta condición garantiza que las deformaciones producidas son muy pequeñas. En nuestro caso se analiza solamente los desplazamientos ocasionados por flexión, ya que la deformación debida a la fuerza cortante se considera despreciable. La ecuación (3.8) aplicada a nuestras condiciones queda como:

$$\Delta = \int \frac{M_U M_L}{EI} ds \quad (3.9)$$

Donde $ds = R d\theta$ es la longitud de un arco con un ángulo $d\theta$.

El momento por flexión M_L causado por la fuerza P , es $M_L = PR(1 + \cos\theta)$. El momento es positivo en el sentido contrario a las manecillas del reloj. Existen dos casos de desplazamiento que nos interesan: el horizontal δ_h y vertical δ_v , por lo que tenemos que aplicar un carga unitaria en la dirección positiva del desplazamiento, para obtener M_U para cada condición.

En el caso horizontal (Figura 3.8(b)), tenemos que $M_U = (1) R (1 + \cos\theta)$. Sustituyendo en la ecuación (3.9) los valores de M_U , M_L y ds tenemos:

$$\begin{aligned} \delta_h &= \frac{PR^3}{EI} \int_0^\pi (1 + \cos\theta)^2 d\theta \quad \text{Integrando obtenemos:} \\ \delta_h &= \frac{3\pi PR^3}{2EI} \end{aligned} \quad (3.10)$$

Para el caso de carga vertical (Figura 3.8(c)) $M_U = (1)R \sen\theta$, sustituyendo en la ecuación (3.9) de manera similar que la anterior, nos queda:

$$\begin{aligned} \delta_v &= \frac{PR^3}{EI} \int_0^\pi \sen\theta(1 + \cos\theta) d\theta \quad \text{Integrando obtenemos:} \\ \delta_v &= \frac{2PR^3}{EI} \end{aligned} \quad (3.11)$$

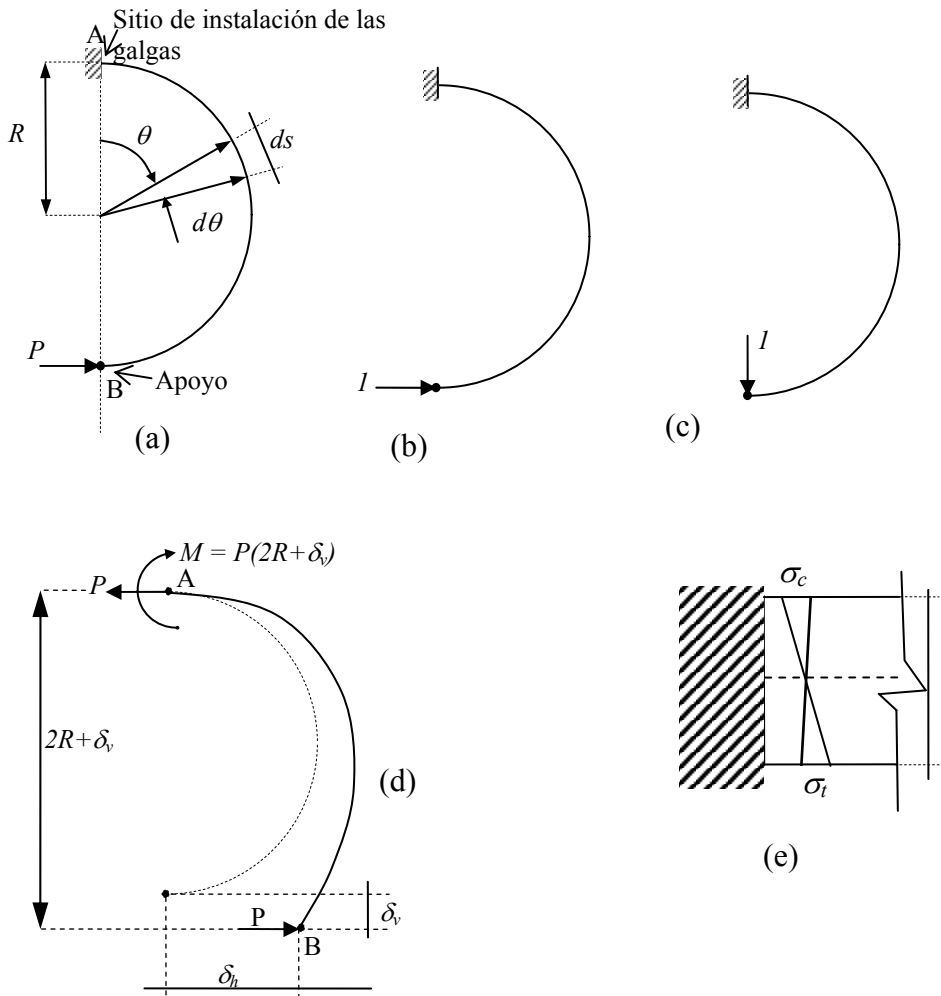


Figura 3.8 Esquema para el análisis de las deformaciones del fleje. a) Esquema simplificado del fleje, b) Aplicación de carga unitaria horizontal, c) Aplicación de carga unitaria vertical, d) Desplazamientos finales del fleje, e) Distribución de tensiones en el apoyo A del fleje.

Para obtener las tensiones de compresión (σ_c) o tracción (σ_i) en la última fibra del fleje producidas por el momento, $M = P (2R + \delta_v)$, en el apoyo A, se utilizamos la fórmula de flexión, $\sigma = My/I$. Las deformaciones en la fibra extrema las obtenemos con ayuda del modulo de elasticidad del acero inoxidable AISI 301 ($E = 19,300 \text{ kg/mm}^2$), $\varepsilon = \sigma/E$. Por último sustituyendo P en términos de δ_h , obtenemos la expresión que relaciona la semiabertura entre los apoyos B y las deformaciones en la parte central:

$$\varepsilon_{CMD} = \frac{2t\delta_h (3\pi R + 2\delta_h)}{9\pi^2 R^3} \quad (3.12)$$

donde ε_{CMD} es la deformación unitaria en la fibra extrema, t el espesor del fleje, R el radio del la circunferencia inicial.

Para poder analizar las deformaciones que tiene los CMD, tomamos el diámetro inicial del muelle como 207 mm. Debido a la recuperación de los muelles cuando se le aplicó los ciclos de deformación, las CMD tienen una abertura en reposo inicial de 100 mm. Si analizamos los casos en donde se tiene un diámetro igual al original de la probeta (250 mm), y el máximo permitido por el dispositivo (300 mm), tenemos:

a) Radio inicial de 103.5 mm, espesor de 1 mm, $\delta_h = 125-50 = 75$ mm, aplicando la ecuación (3.12) la deformación es 1714 $\mu\varepsilon$, que corresponde a una tensión en la fibra de 324.22 MPa.

b) Radio inicial de 103.5 mm, espesor de 1 mm, $\delta_h = 150-50 = 100$ mm, obtenemos 2387 $\mu\varepsilon$, que corresponde a una tensión en la fibra de 551.5 MPa.

Las deformaciones calculadas no superan la deformación máxima de las galgas extensométricas, que es de 28000 $\mu\varepsilon$ como ya se mencionó. Las tensiones calculas que se obtienen no superan el límite de fluencia del material (930.9 MPa).

Las galgas extensométricas son adecuadas para detectar deformaciones de hasta del 10 $\mu\varepsilon$, e incluso inferiores (Pallás 1998). Siendo un poco conservadores supondremos que la galga tiene una resolución de 10 $\mu\varepsilon$. Traduciendo las 10 $\mu\varepsilon$ en el cambio de diámetro requerido para producirlas, obtendremos la resolución del transductor. Las condiciones iniciales son un radio inicial de 103.7 mm y con un $\delta_h = 75$ mm se calcula una deformación de 1714 $\mu\varepsilon$. Aplicamos 10 $\mu\varepsilon$ y con la ecuación (3.12) obtenemos un $\delta_h = 75.385$ mm que nos da una resolución de 0.385 mm es decir una resolución de 0.21 % FS.

Con la finalidad de verificar los resultados de los cálculos y de la teoría aplicada, se realizaron mediciones con una sola galga en uno de los muelles. El punto de partida fue una abertura del transductor de 200 mm y una final de 290 mm. En el movimiento de 200 a 290 mm se obtuvo un incremento de 2060 $\mu\varepsilon$ en la fibra extrema. Los datos para del

análisis serían $\delta h_{ini}=0$, $\delta h_{final} = 95$ mm, aplicando la ecuación (3.12) se obtienen 2248 $\mu\epsilon$. La aproximación es buena, no del todo exacta, pero se obtiene una estimación adecuada de las deformaciones en el muelle.

3.2.1.2 LDT (Local Deformation Transducers) acoplados a las CMD

Las deformaciones axiales medidas sobre el cabezal pueden tener errores debidos a la falta de un buen contacto entre el cabezal y la probeta (Baldi *et al.* 1988, Scholey *et al.* 1995). Para salvar estos errores es común realizar mediciones axiales locales en la probeta. La técnica más común es posicionar LVDT soportados por las bases a los lados de la probeta. Si en el interior de la célula triaxial existe agua se utilizan transductores sumergibles. En nuestro caso se prefirió aprovechar la experiencia obtenida con las galgas extensométricas sumergibles KFW, para construir LDT. Aunque los LDT se desarrollaron para obtener la rigidez de los suelos bajo pequeñas deformaciones 10^{-6} a 10^{-2} (Goto *et al.* 1991, Hoque *et al.* 1997) aquí se utilizan para medir deformaciones de hasta 20 %.

Para lograr que se midieran deformaciones mayores, se redujo el espesor del fleje a partir de las recomendaciones dadas por Hoque *et al.* (1997), para evitar que la fibra extrema del fleje llegara al límite de fluencia. Hoque *et al.* (1997) recomiendan que para probetas con un diámetro de 300 mm por una altura de 600 mm, se utilicen LDT con dimensiones de 6 mm de ancho por 500 mm de largo y 1 mm de espesor. Se redujo también la longitud del transductor, para que no se deformase con el peso propio y aprovechar las CMD como apoyos de los LDT.

Los LDT se construyeron con fleje de acero inoxidable AISI 301 con dimensiones de 40 mm de ancho, 300 mm de largo y 0.3 mm de espesor. Se colocó un puente de Wheatstone completo con galgas sumergibles en la parte central del fleje, dos en lado de compresión y dos en lado de tracción. Los soportes que sostienen el transductor son pequeños cilindros ranurados, atornillados en un semicírculo que a su vez se atornilla a los soportes de las células de medición diametral (ver Figura 3.9). Existe espacio suficiente para que no interfieran entre sí los LDT y Las CMD. Además, cuando la probeta se deforma axialmente la parte media del LDT tiende a aproximarse a las CMD, pero como ocurren un incremento

de diámetro los muelles de las CMD se acercan más a la probeta y evita que toquen entre si (ver fotos en Figura 3.9(b)).

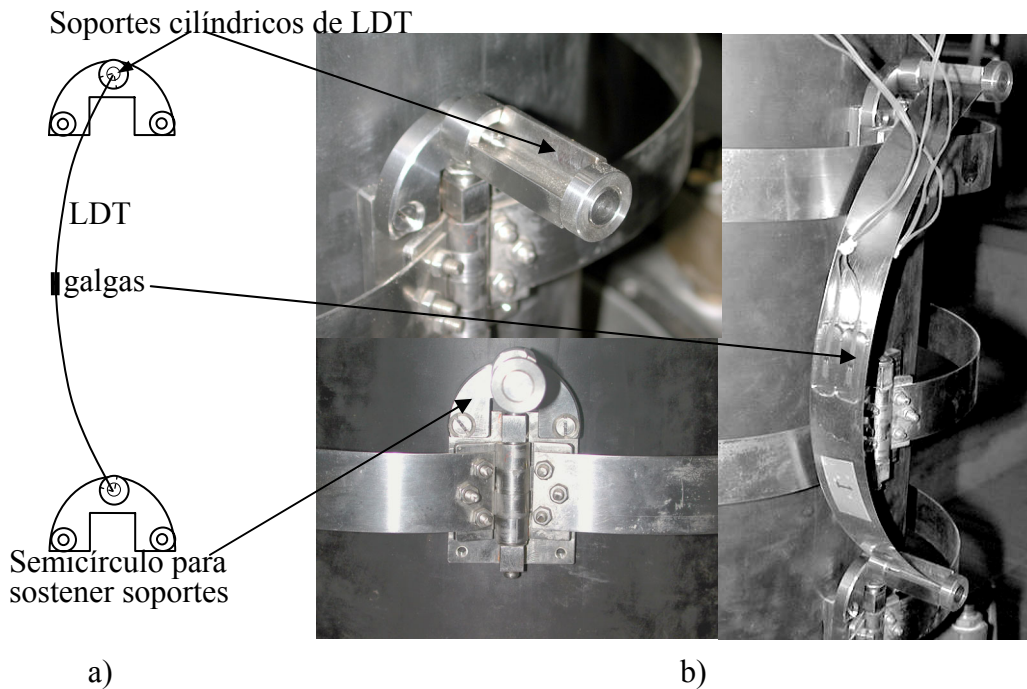


Figura 3.9 a) Esquema del dispositivo para colocar los LDT b) Fotos de soporte y disposición general de los LDT

Goto *et al.* 1991 obtuvo una ecuación que relaciona la deformación en la fibra extrema del transductor con la deformación axial, Δ . La ecuación la dedujo a partir el momento flexionante en una columna:

$$M = -EI \left(\frac{d^2 y}{dx^2} \right) \quad (3.13)$$

Supuso que LDT se deformaba como la función seno, $y(x) = a \text{ sen } (\pi x / l)$. Así que:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = -a(\pi / l)^2 \text{ sen}(\pi x / l) \quad (3.14)$$

Para pequeñas deformaciones, la deformación axial del LDT, Δ es igual a:

$$\Delta = L - l = \int \sqrt{1 + (dy / dx)^2} dx - l \approx \int (1 + (dy / dx)^2) dx - l = 1/2 \int (dy / dx)^2 dx \quad (3.15)$$

Sustituyendo la primera derivada de la función seno en la ecuación anterior se obtiene que la amplitud está dada por:

$$a = 2 \frac{\sqrt{\Delta l}}{\pi} \quad (3.16)$$

Calculando el momento en el centro de LDT con la ecuaciones (3.13), (3.14), (3.16), y, aplicando la fórmula de flexión, $\sigma = My/I$ y la ley de Hooke $\varepsilon = \sigma/E$, se obtiene la ecuación siguiente:

$$\varepsilon_{ldt} = \frac{\pi t}{l} \sqrt{\frac{\Delta}{l}} \quad (3.17)$$

donde $l = L - \Delta$, L es la longitud original del transductor sin deformarse.

En la posición inicial del transductor mostrada en la Figura 3.9, $l = 250$ mm, y $\Delta = 51$ mm, aplicando la ecuación (3.17) obtenemos una deformación de $1703 \mu\varepsilon$, y una tensión de 322 MPa. Si aplicamos una deformación del 20%, $l = 200$ mm y $\Delta = 101$ mm, y obtenemos una deformación de $3349 \mu\varepsilon$ y una tensión de 633 MPa. Se observa que el fleje no pasa la tensión de fluencia (930.9 MPa) por lo que trabaja siempre en el rango elástico. Se realizaron mediciones con galgas extensométricas y las deformaciones medidas en las condiciones uno y dos respectivamente, correspondieron a 1231 y $2160 \mu\varepsilon$. Hay una gran diferencia entre las mediciones experimentales y los cálculos. La razón es que el fleje en reposo no es recto, sino que está ligeramente curvado con una cuerda de 10 mm aproximadamente. Además la suposición de que el LDT se deforma como la función seno es más aproximada para pequeñas deformaciones. Para grandes deformaciones conduce a una sobreestimación de las micro-deformaciones en la zona central debido a geometría de la función.

La galga tiene una resolución de $10 \mu\varepsilon$ igual que en el transductor anterior. Las condiciones iniciales son $l = 250$ mm, $\Delta = 51$ mm y $\varepsilon_{ldt} = 1714 \mu\varepsilon$. Aplicamos $10 \mu\varepsilon$ obtenemos $\Delta = 51.6$ mm, una resolución de 0.6 mm y una resolución de 0.3% FS.

3.2.2 Calibración de los sensores

La calibración, es la relación directa que hay entre la medición física y el voltaje de salida del transductor. La medición física en nuestro caso puede ser: temperatura, presión, distancia, carga y humedad relativa. La señal de salida directa del transductor normalmente tiene unidades de milivoltios. Para que la señal pueda ser procesada con más resolución, se

intercala un acondicionador de señal, que realiza las funciones de: filtrar, amplificar, posicionar el “offset” y adaptar las resistencias. La señal en voltios es recogida por la tarjeta de adquisición de datos. En esta fase es cuando se procede a la calibración del sensor.

A continuación se describe brevemente el procedimiento de calibración, con los resultados obtenidos, donde se valora el coeficiente de correlación de los datos y la precisión del transductor. La precisión se evalúa mediante la no linealidad e histéresis de los resultados. El error de no linealidad es la desviación de la señal de salida del transductor de una línea que se obtiene de la regresión lineal de los datos de la calibración real. La histéresis es la diferencia en la señal de salida del transductor, a una carga específica, entre el sector de aumento y disminución de un ciclo de carga de breve duración a una temperatura constante. Como la no linealidad y la histéresis se cubren en una banda de error que incluye los dos errores máximos; se presenta solo el error combinado de no linealidad y histéresis que se expresa como \pm % del factor de escala.

3.2.2.1 Resultados de las calibraciones de los sensores

Las principales características de los transductores se resumen en la tabla 3.1. En este apartado se explica el procedimiento utilizado para las calibraciones.

Los LVDT son los sensores electro-mecánicos de uso más frecuente, y producen una salida eléctrica proporcional al movimiento del vástago no ferromagnético. Tienen resolución infinita, responden a cualquier movimiento por mínimo que éste sea. El bajo rozamiento de su vástago le da una vida mecánica ilimitada.

El modelo utilizado es el B-50 de Solartron, con un recorrido de ± 50 mm, fabricado en acero inoxidable y el vástago en aleación acero-níquel. Las temperaturas de trabajo están entre -55 y 150 °C, su no-linealidad e histéresis se encuentra entre ± 0.05 y ± 0.3 % del fondo de escala.

La calibración de los LVDT se realiza con el transductor sujeto en un soporte especial (ver Figura 3.10), las variaciones de longitud se miden con un comparador (resolución $3 \mu\text{m}$) colocado entre el LVDT y una base de altura regulable. El proceso de calibración consiste

en variar la altura de la base regulable para registrar el voltaje de salida del transductor y la lectura del comparador. Ya que el recorrido del comparador y la base de altura regulable son mucho menores que el recorrido del LVDT, estos dispositivos se reposicionan. El comparador se mueve, reajustando el dispositivo de sujeción adosado al soporte. La base de altura regulable se levanta con bloqueos de hierro mecanizados con altura conocida. Los resultados de las calibraciones de los 4 LVDT se muestran en la Figura 3.11.

Tabla 3.1 Características principales de los transductores.

Transductor	Fenómeno de medida	Resolución % FS	Sensibilidad operativa	No linealidad más histéresis en la calibración % FS	Estabilidad en el tiempo
LVDT 1 int.	Variación de inductancia mutua	0.05	5.88 mm/V	±0.3	buena
LVDT 2 int.		0.05	5.29 mm/V	±0.3	buena
LVDT 3 int.		0.05	5.31 mm/V	±0.3	buena
LVDT 4 ext.		0.05	11.15 mm/V	±0.3	buena
CMD	Puente de Wheatstone. Medias por deflexión	0.21	61.08 mm/V	±0.75	regular*
		0.21	53.99 mm/V	±0.75	regular
		0.21	62 mm/V	±0.75	regular
LDT		0.3	27.26 mm/V	±0.7	regular*
		0.3	95.75 mm/V	±0.7	regular
PT	Diafragma más la medida defor. del trasductor capacitivo y piezoresistivo	0.13	0.5 MPa/V	±0.34	regular
DPT		0.25	10.3 mm/V	±0.42	buena
Célula de carga	P. Wheatstone medida por deflexión	0.1	89.39 kN/V	±0.35	regular

* A mejorar

Las células de medición diametral se calibraron en el equipo mostrado en la Figura 3.12, este sistema tiene dos bases, donde se apoyan los soportes las CMD. Con el giro de un tornillo sinfín, las bases se separan o juntan. Se utiliza un pie de rey atornillado en las bases para medir la separación (la resolución del pie de rey es de 10 µm). Las calibraciones fueron realizadas en un periodo de 20 minutos. El transductor tiene problemas de fluencia cuando se deja mucho tiempo bajo presión, debido principalmente al adhesivo utilizado

para pegar las galgas. Los resultados de la calibración se encuentran en la Figura 3.13. El índice de correlación fue bastante bueno.

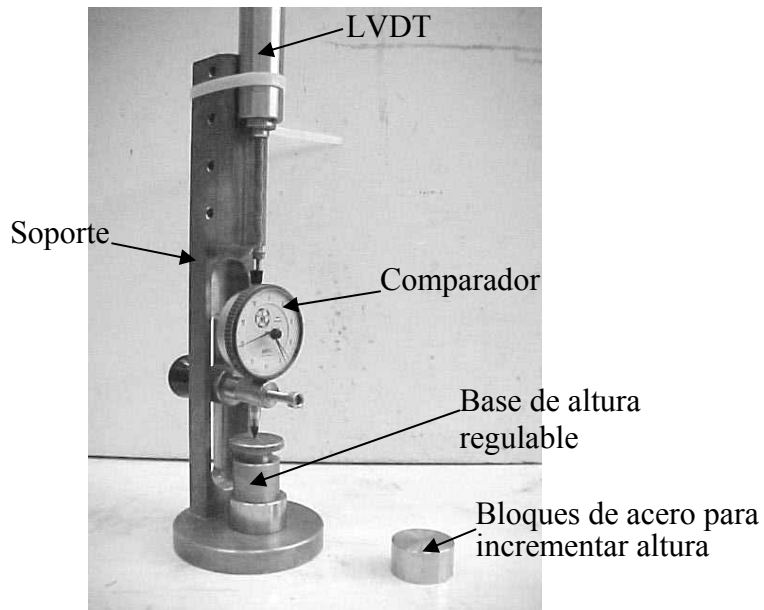


Figura 3.10 Dispositivo de calibración del los LVDT.

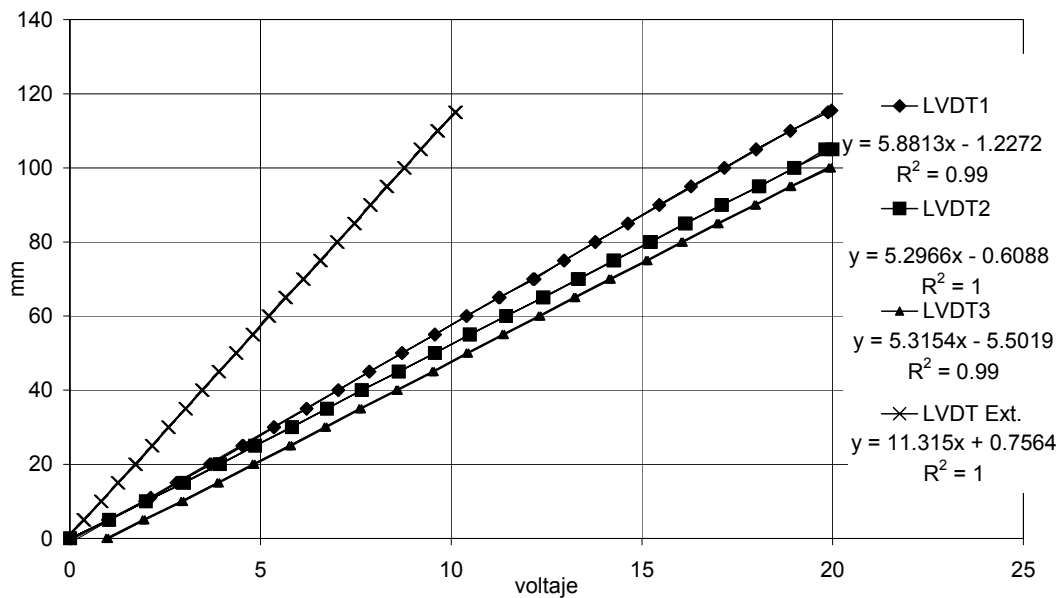


Figura 3.11 Resultados de las calibraciones de los LVDT.

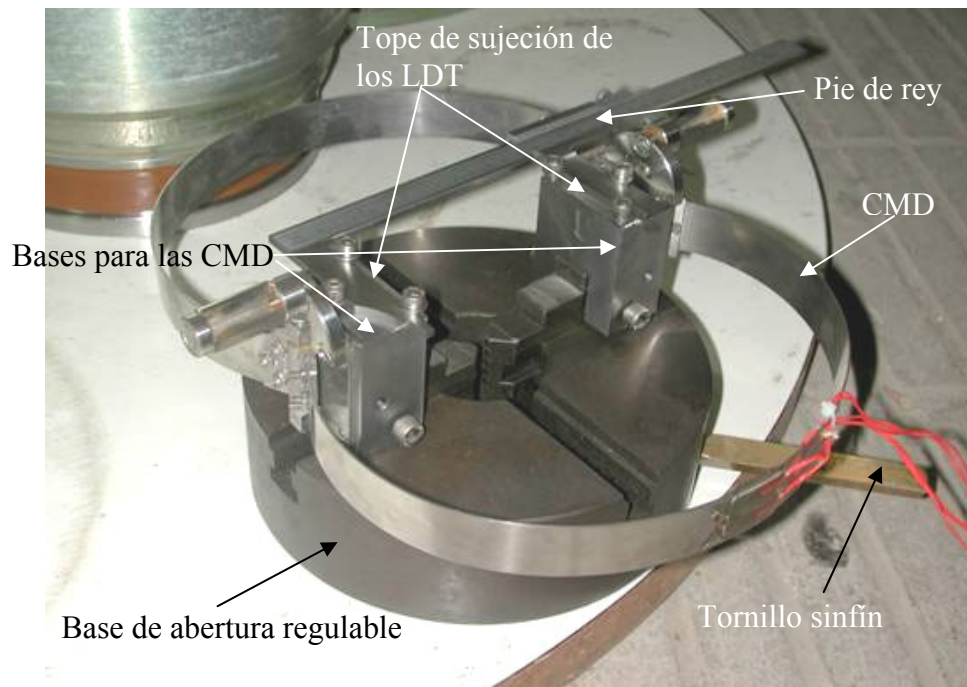


Figura 3.12 Equipo para la calibración de las células de medición diametral.

Los LDT se calibraron con el mismo equipo utilizado para calibrar las CMD, sólo que los topes de sujeción de los LDT están formados por la intersección del pie de rey y las bases (ver Figura 3.12). La calibración se muestra en la Figura 3.14. Como se ha observado en general con este tipo de transductores, la relación entre el cambio de la longitud y su respuesta en voltios, es no lineal; así que la calibración se ajustó a una curva de segundo grado. En los dos transductores se obtuvo un buen coeficiente de correlación.

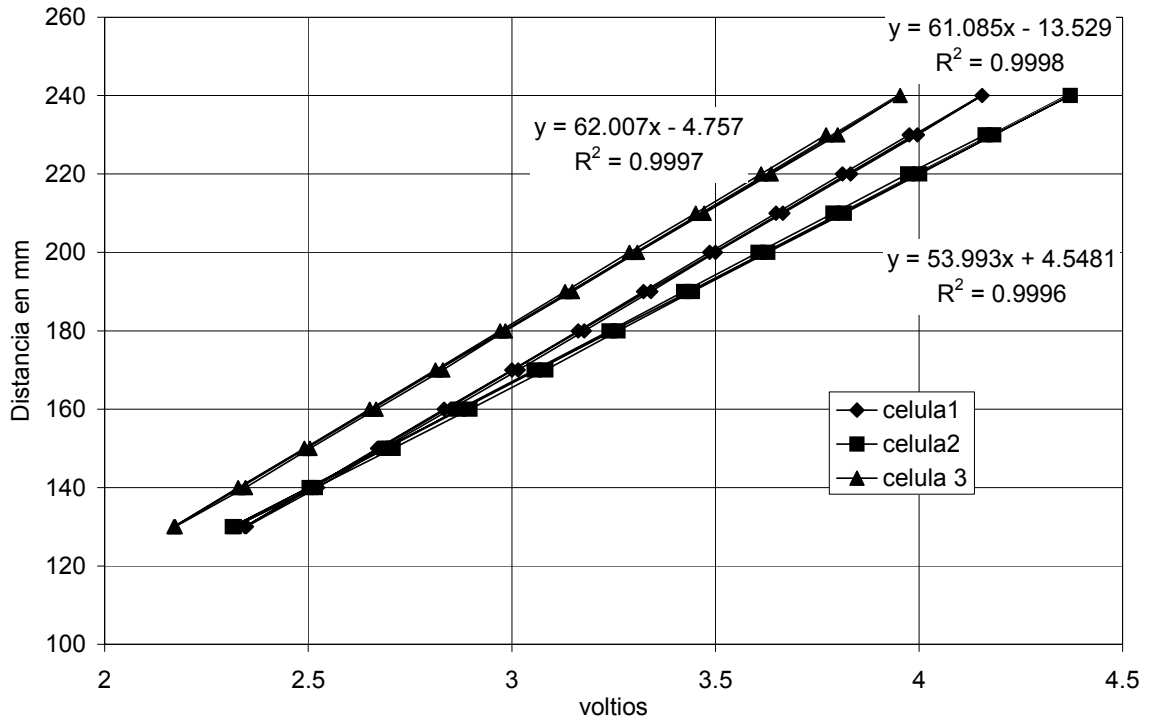


Figura 3.13 Resultados de las calibraciones de las CMD.

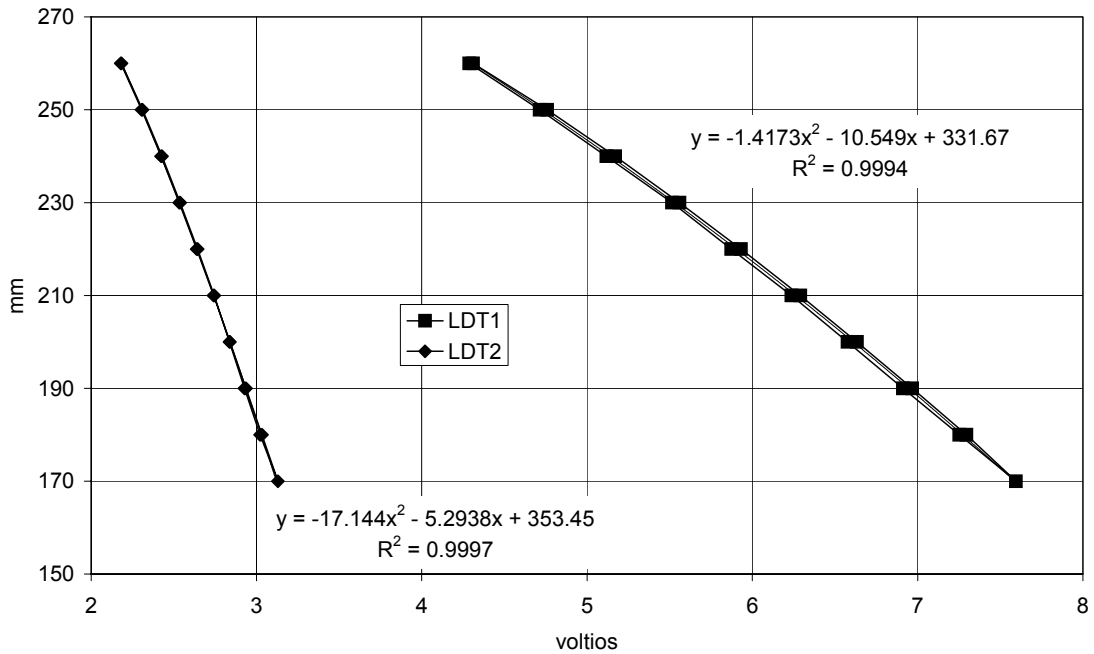


Figura 3.14 Resultados de calibraciones de los LDT.

El transductor de presión utilizado es de la marca Setra modelo 206, con un rango de 0 a 2.5 MPa. La precisión nominal a temperatura constante es de $\pm 0.13\%$ FS, el rango de

temperatura de trabajo es de -20 a 80 °C; el transductor se puede utilizar con líquidos o gases. Su calibración se realizó variando la presión en una cámara, a la que se conectaron el transductor de presión que se deseaba calibrar, y otro transductor de referencia del laboratorio con una resolución de 1 kPa. El transductor de referencia se calibró con un sistema de masas actuando sobre un pistón. La no linealidad e histéresis del patrón es de 0.1 % FS. Los resultados se muestran en la Figura 3.15.

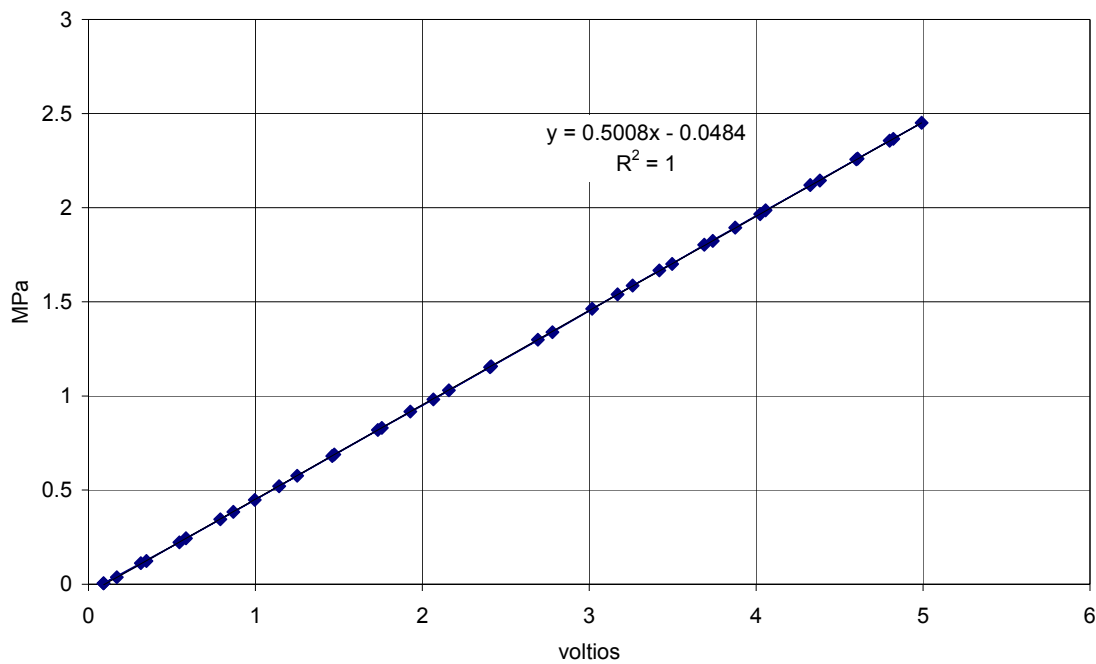


Figura 3.15 Resultados de calibración de transductor de presión.

El transductor diferencial de presión utilizado es de la marca Druck, modelo LPM 5480, con un rango de 0 a 0.98 kPa (100 mm columna de agua). Tiene una precisión nominal de ± 0.25 % FS, una estabilidad en el tiempo de ± 0.3 % FS en 12 meses, y el tiempo de respuesta es ajustable desde 2 ms hasta 2 s. A la célula triaxial se le instaló un tubo de poliamida transparente conectado al agua y aire de la cámara, que sirve como testigo exterior del nivel del agua. Esta tubería permitió la calibración del DPT, colocando una regla con resolución de 0.5 mm al lado de la tubería. El nivel se varió introduciendo o sacando agua de la célula. La calibración se muestra en la Figura 3.16.

La célula de carga es de la marca Sensotec, modelo 43/0829-02, soporta hasta 890 kN a compresión. La calibración se realizó con una prensa de capacidad de 4.9 MN. Los resultados se muestran en la Figura 3.17.

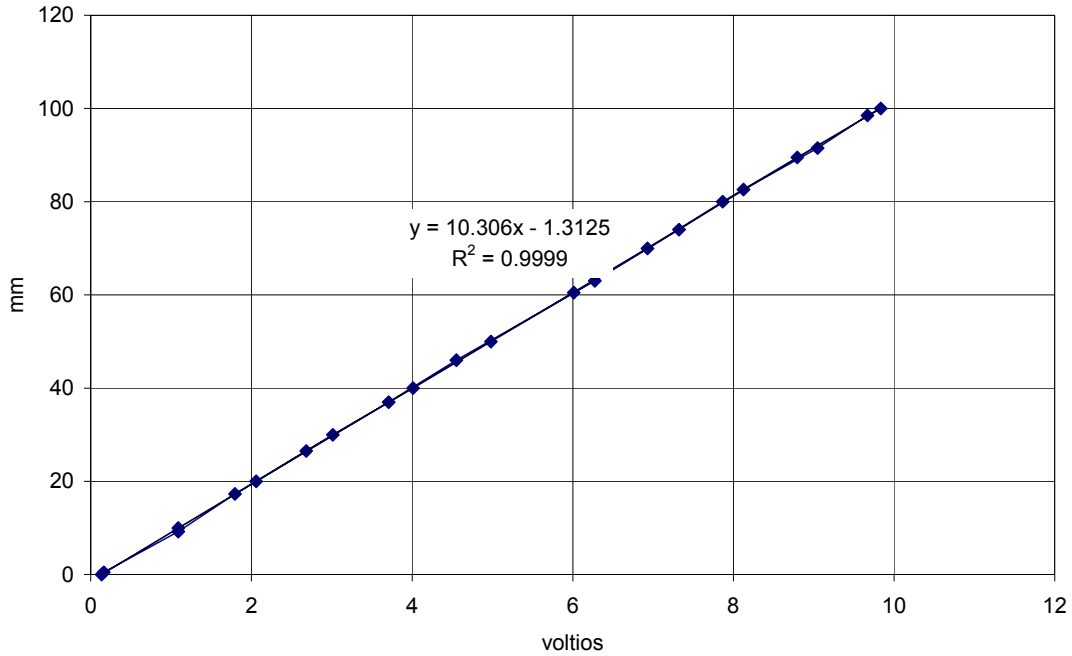


Figura 3.16 Resultados de la calibración del DPT.

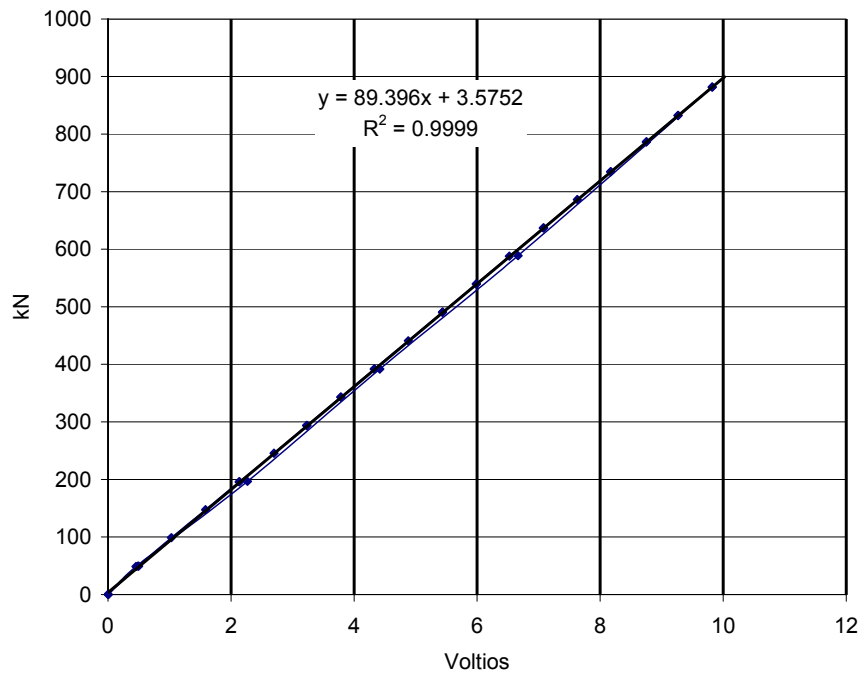


Figura 3.17 Calibración de la célula de carga.

3.2.3 Comportamiento de los transductores bajo presión de confinamiento

Como la mayoría de los transductores se encuentran en el interior de la célula triaxial, se necesita verificar su funcionamiento cuando están sometidos a la presión de confinamiento. Se colocó como probeta falsa, un tubo de acero con un espesor de 50 mm, prácticamente indeformable para los niveles de presión aplicada (hasta 1.76 MPa). La probeta falsa se cubrió con una membrana de neopreno, tal como una probeta de material. Posteriormente, se aplicó la presión de confinamiento y se registraron las salidas de los transductores. Los datos se muestran en las Figuras 3.18, 3.19 y 3.20. La respuesta a la variación de la presión de confinamiento de los LVDT, la célula de carga y las CMD (Figura 3.18) se consideró despreciable. En los transductores donde se detectó un error apreciable, se realizaron correcciones con la ecuación de correlación obtenida a los datos en cada ensayo.

La influencia en las lecturas de DPT es más pronunciada (ver Figura 3.19), debido principalmente a la deformación de las tuberías que conectan el DPT y de la membrana de neopreno. En las zonas de sujeción de la membrana siempre quedan arrugas por las sujeciones de las abrazaderas. Estas zonas se comprimen cuando aumenta la presión de confinamiento y provoca se detecte una compresión errónea de la probeta. En el principio de la curva de la Figura 3.19 se observa una inestabilidad en las lecturas, que se atribuye a la existencia del aire en el sistema, y que no se pudo eliminar del todo.

En los LDT la influencia es también significativa (un 1.5 % para el LDT1 y un 0.5 % para el LDT2 del fondo de escala), sólo la tiene en un sentido (ver Figura 3.20). La forma del error de los LDT se atribuye a la influencia que tiene la acumulación de pequeñas arrugas en sentido vertical, y que permanecen después del montaje. Provocan un acomodo en sentido vertical de la membrana

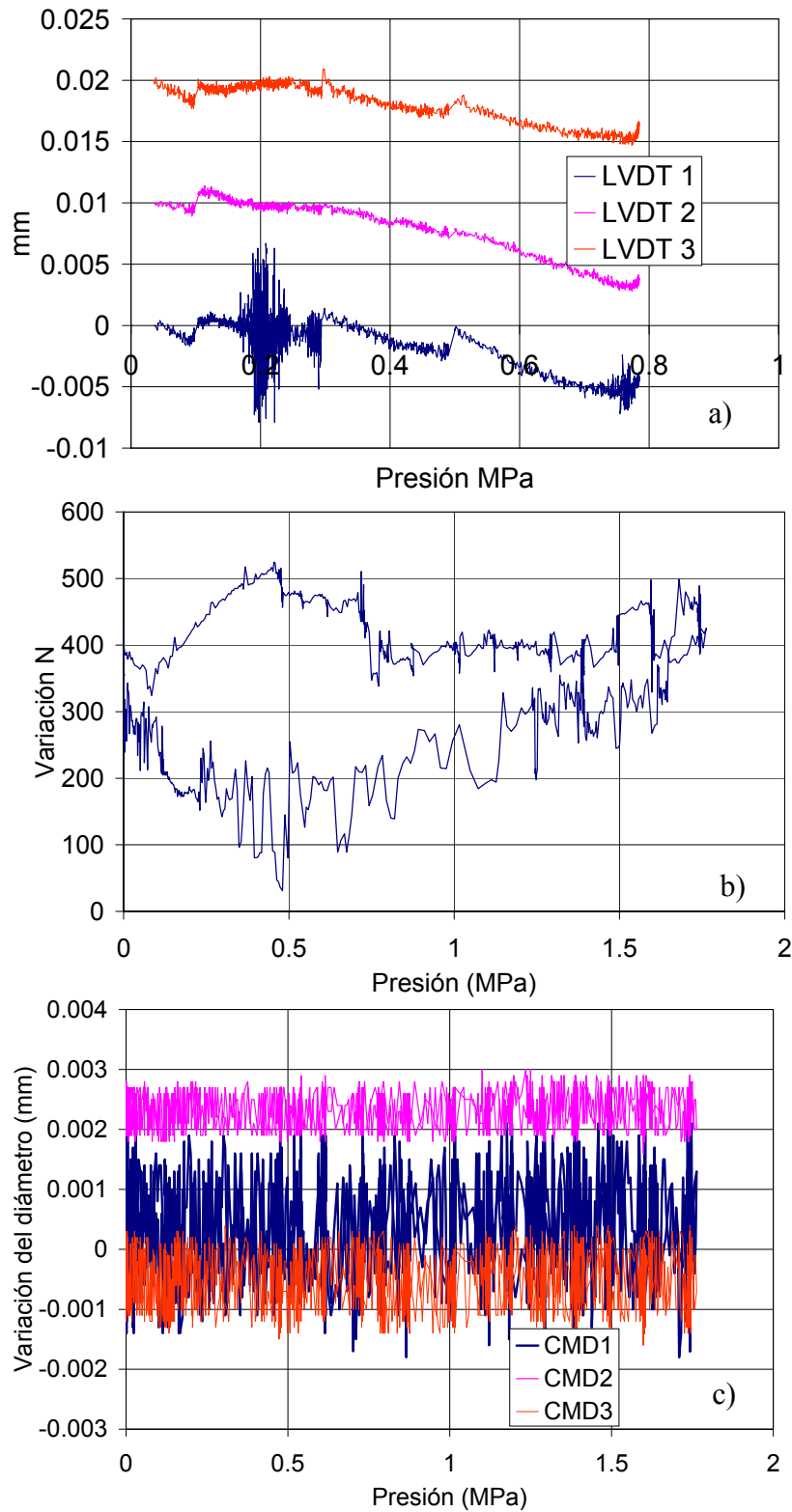


Figura 3.18 Respuesta ante la aplicación de la presión de confinamiento de los LVDT, célula de carga y CMD.

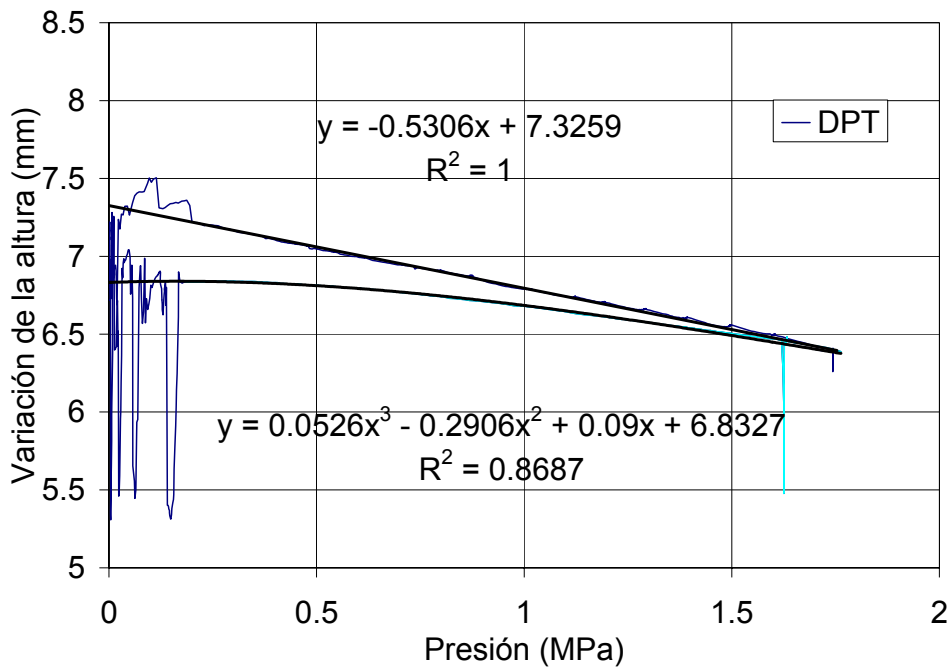


Figura 3.19 Variación de la lectura del DPT cuando se varía la presión de confinamiento aplicada.

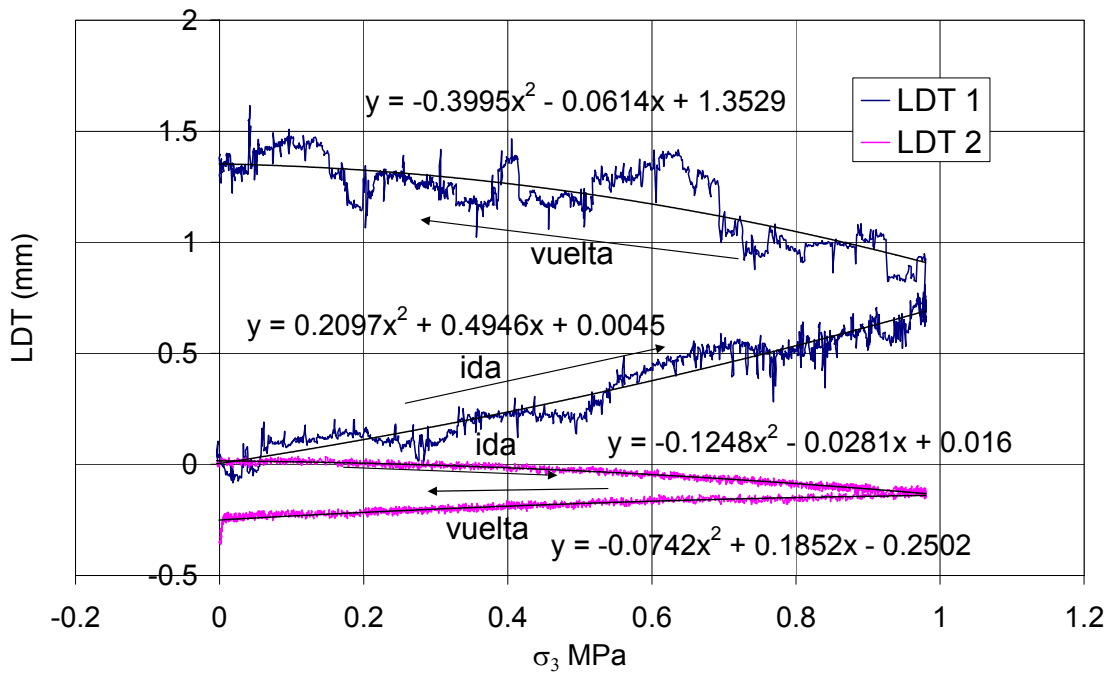


Figura 3.20 Variación de la respuesta de los LDT con la presión de confinamiento.

3.3 Detalles en la aplicación de la succión

Un término genérico para nombrar la energía del agua en los suelos es la succión ($\psi = s + \pi$). Tiene dos componentes: matricial y osmótica. A la diferencia entre la presión del agua (P_l), y la presión del aire en los poros (P_g), se le llama succión matricial (s). La succión osmótica π , es la parte de la succión total producida por la presencia de sales disueltas en el agua. Se ha demostrado que la succión matricial es una variable de estado fundamental a controlar para entender el comportamiento de los suelos (Fredlund y Morgensten 1977). Por ello se ha incluido como parámetro esencial en los modelos que reproducen el comportamiento de suelos no saturados (Alonso *et al.* 1990).

Más recientemente se ha mostrado la importancia de la succión total en el comportamiento de escolleras (Oldecop 2000, Oldecop y Alonso 2001). En este tipo de materiales se habla de la succión en las partículas de la roca, y no del agua interconectada en los vacíos del material como en el caso de los suelos. Por tanto la técnica de equilibrio de vapor es la más adecuada para su utilización en escolleras. Oldecop 2000 utilizó una técnica de aplicación de succión en materiales de escollera, que se basa en la imposición de una succión total mediante el control de la humedad relativa; controlada por una solución salina. La humedad relativa se define como la concentración de vapor de agua en el aire, es decir:

$$HR = p_v / p_v^0 \quad (3.18)$$

Donde: p_v = presión parcial del vapor de agua en el aire,
 p_v^0 = presión de saturación del vapor de agua a la misma temperatura

La técnica de equilibrio de vapor en un ambiente cerrado funciona de la siguiente manera. Cuando un material se encuentra en una atmósfera cerrada a temperatura constante, donde hay un recipiente con una solución salina (que impone una cierta humedad relativa), al cabo de un tiempo el material será impregnado con esta humedad mediante el proceso de difusión molecular del vapor de agua a través del aire. En este momento se dice que el material está en equilibrio termodinámico con el ambiente en el que se encuentra. Este punto se identifica pesando el material a medida que pasa el tiempo. Cuando su peso deja

de cambiar, el material posee la humedad del ambiente. La humedad relativa está relacionada con la succión total mediante la ley psicrométrica (Coussy 1995):

$$\psi = -(RT\rho_w/M_w)\ln(p_v/p_v^0) \quad (3.19)$$

donde: R = constante universal de los gases,
 T = temperatura absoluta,
 M_w = masa del agua,
 ρ_w = densidad del agua a la temperatura de referencia.

Oldecop (2000) aplicó la técnica de equilibrio de vapor de agua, acelerando el transporte por advección hacia la probeta con una bomba de aire de diafragma; que movía un caudal de 0.183 litros/s. El vapor de agua llega, después de pasar por el recipiente que contiene la solución de control, a los poros del material por difusión molecular y la humedad se condensa en los poros de las partículas. Para saber qué humedad relativa tienen los vacíos del material, Oldecop colocó un higrómetro capacitivo próximo a la salida del aire de la probeta, disminuyendo así el grado de incertidumbre de la técnica de equilibrio de vapor. Después se cierra el circuito con el regreso del aire a la bomba. La humedad relativa que se mide con el higrómetro se considera prácticamente igual a la de los poros de la roca. Oldecop mostró que la diferencia entre la HR medida en la probeta y la impuesta por la solución (el gradiente efectivo) en un momento dado es pequeña. Se considera que el equilibrio se da en el instante que circula el aire por los vacíos del material.

Para explicar el fenómeno que ocurría con la incorporación de una bomba en el circuito, Oldecop (2000) desarrolló un modelo analítico de transporte de vapor con control de humedad relativa para ensayos en escolleras. Llegó a la siguiente expresión:

$$I = \frac{M_a p_v^0}{RT} Q (HR^{sol} - HR^{roca}) \quad (3.20)$$

$$\text{donde: } Q = \frac{ad}{a+d}; \quad a = \frac{2qE}{2-E}; \quad d = \frac{A_{ef}D}{L_{eq}}$$

donde I es la masa de vapor de agua transportada por unidad de tiempo, M_a es la masa molecular del agua, p_v^0 es la presión de saturación del vapor de agua a la temperatura T , R es la constante de los gases, HR^{sol} es la humedad relativa impuesta por la solución, HR^{roca}

es el valor medio de la humedad relativa en equilibrio con la succión del agua líquida contenida en los poros de la roca, q es el caudal de la bomba que mueve el aire, E es la eficiencia del transporte de la humedad relativa (varia entre 0 y 1), A_{ef} área efectiva de difusión, D coeficiente de difusión molecular del vapor de agua en el aire y L_{eq} es la longitud equivalente de difusión.

Analizando la ecuación (3.20) se deduce que el transporte de vapor es directamente proporcional al gradiente de humedad relativa que existe en el circuito. Q mide el peso que tiene el transporte advectivo respecto al difusivo, y es función del caudal que produce la bomba de aire. Es adecuado pensar que el transporte de vapor de agua está gobernado por el proceso advectivo debido a flujo de aire que se provoca con la bomba y la gran porosidad de la escollera. En este caso, la difusión sólo se presenta cuando el vapor de agua se transporta de los poros del material hacia los poros de las partículas de la roca; el trayecto de difusión es corto y poco tortuoso.

Las sales utilizadas se listan en la tabla 3.2. Las soluciones siempre se utilizaron saturadas, para evitar complicaciones adicionales en el procedimiento de prueba. Debido a que la pérdida de agua en el proceso de equilibrado es muy grande y las concentraciones pueden ser afectadas fácilmente. Además, se utilizaron en la mayoría de los casos para imponer gradientes de humedad relativa, en el secado o humedecimiento del material. La HR que impone cada una de ellas se puede calcular con la siguiente expresión:

$$HR = A \exp(B/T) \tag{3.21}$$

donde A y B son constantes cuyos valores se muestran en la tabla 3.2 para las soluciones utilizadas, T es la temperatura absoluta.

Tabla 3.2 Humedad Relativa de equilibrio, para soluciones saturadas de las sales utilizadas según CRC(1997).

Sal	HR a 20 °C	A	B	Rango de validez °C
NaOH	6.0	5.48	27	15-60
MgCl ₂	32.9	29.26	34	5-45
NaCl	75.4	69.2	25	10-40
BaCl ₂	90.4	69.99	75	5-25

Con este sistema Oldecop (2000) consiguió imponer satisfactoriamente humedades relativas al material de escollera. Por esta razón se utilizó para su implementación en el equipo triaxial de escolleras (ver Figura 3.5).

3.3.1 Equipo utilizado en el sistema de imposición de humedad relativa

Como la humedad relativa depende de la temperatura del ambiente, se instaló un sistema de aire acondicionado en el laboratorio, para mantener la temperatura constante, de forma que la humedad relativa impuesta sólo dependiese de la solución salina utilizada. La temperatura se fijó en 21°C. En los registros obtenidos durante los ensayos se obtuvo una media de 20.6°C con una variación de $\pm 1^\circ\text{C}$ (ver Figura 3.21). El control de la temperatura se consideró el adecuado dadas las dimensiones del laboratorio.

Se utilizó un higrómetro capacitivo marca Vaisala, modelo HMP-233. Posee una sonda para medir la humedad relativa y la temperatura en el punto deseado. La precisión en la medición de la humedad relativa es de $\pm 1\%$ en el rango de 0 a 90% y de $\pm 2\%$ en el rango de 90 a 100%. El higrómetro cuenta con salidas analógicas para conectarse directamente a la tarjeta de adquisición de datos.

En apartado anterior en la ecuación (3.20) se observa que Q es función del factor que caracteriza el transporte advectivo que domina sobre la difusión; en el caso de escolleras. Si se incrementa el caudal de la bomba de aire el factor, a , se incrementa y por tanto la masa de vapor de agua transportada por unidad de tiempo. Como el volumen de la probeta del triaxial es 1.73 veces mayor que el del edómetro empleado por Oldecop, es necesario utilizar una bomba de mayor caudal, para que al menos, se tenga la misma eficiencia que se tuvo en los estudios experimentales de Oldecop (2000). La bomba que se utilizó al final tiene un caudal (0.467 l/s), 2.54 veces mayor que la utilizada por Oldecop. Aunque el volumen de la probeta triaxial es mayor que el del edómetro, no llega a ser el doble, por lo que se aumenta la efectividad en el transporte de vapor de agua, disminuyendo el tiempo de imposición de la humedad relativa en las partículas de escollera.

En la Figura 3.21, se muestra el registro de la humedad relativa durante un ensayo, donde se impuso un 92% con una solución saturada de hidróxido de potasio diluida en agua. Se observa que en 1.5 días alcanzó un promedio de 87%. En el segundo día se observa una disminución de la HR, que corresponde con el llenado de la cámara interior de agua; sistema que se utiliza para la medición indirecta del cambio de volumen. Tal técnica implica que el agua cubra exteriormente la probeta, y cambie la temperatura del interior de la probeta. El cambio repentino en HR se desvanece a lo largo del segundo día cuando la temperatura del agua se adapta a las condiciones existentes en el medio, o la HR reequilibra con las nuevas condiciones de temperatura. Hasta el tercer día se pasa la humedad relativa de 90% y comienza una variación de la HR que corresponde con la temperatura. Se registró un promedio de 92% de HR, con una variación cíclica regular ± 2 % de HR; estos datos demuestran que se logró una buena aproximación de la HR deseada. Las oscilaciones de la HR son debidas a que las tuberías exteriores que conducen el aire, de la salida de la célula triaxial al higrómetro, están sometidas a las fluctuaciones de temperatura del aire acondicionado. Una vez que se alcanza la HR deseada, se retira la solución y se disminuye el caudal de la bomba a la mitad, para equilibrar y mantener la humedad en el valor deseado.

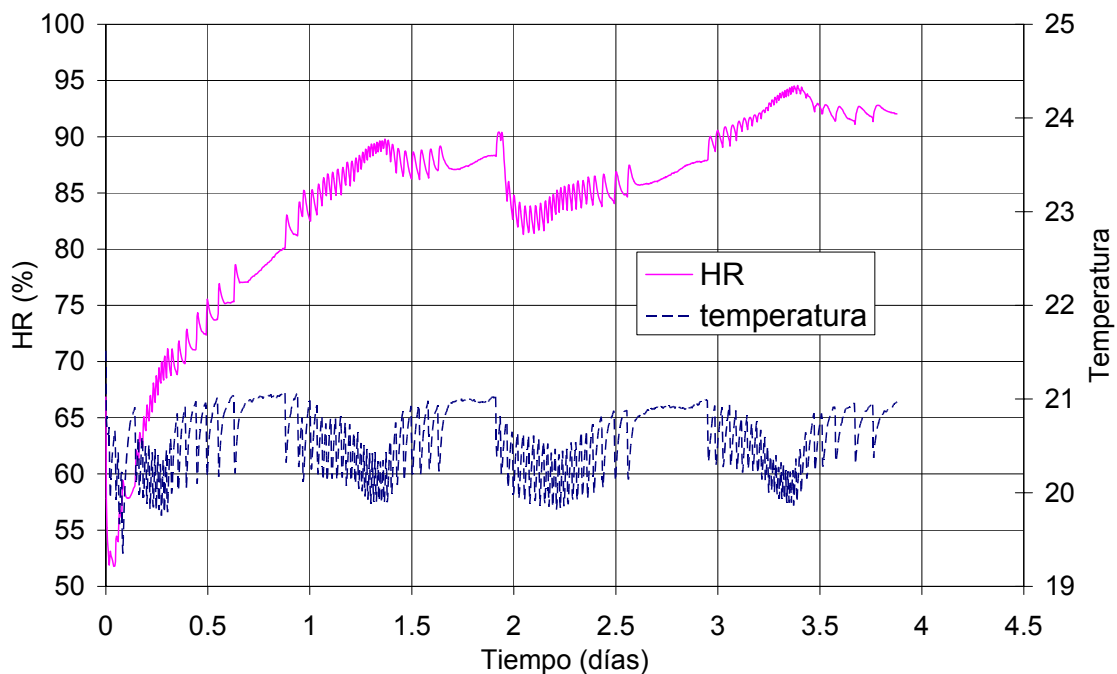


Figura 3.21 Registro de la humedad relativa y de la temperatura durante un ensayo, donde se logró una humedad relativa del 92 ± 2 %.

