

# EQUIPOS DE LABORATORIO PARA MEDIR EL CAMBIO DE VOLUMEN DEL SUELO

Jorge E. Alva Hurtado, PhD.  
Profesor Principal, Facultad de Ingeniería Civil  
Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú

## RESUMEN

Se presentan aparatos basados en el flujo de agua para medir cambios volumétricos del suelo en ensayos de laboratorio. Se ha concentrado un mayor énfasis en aquellos equipos adecuados para la adquisición automática de datos de cambio de volumen en ensayos triaxiales. Los equipos se clasifican por tipos y se presentan las ventajas y limitaciones de cada uno de ellos. Las características de los instrumentos descritas son aquellas dadas por los fabricantes, estando disponibles en las referencias. Se ha indicado la disponibilidad de algunos instrumentos en el mercado, hasta donde ha sido posible conocerla.

El objetivo principal de este artículo es describir los conceptos de medición de volumen que han sido propuestos y proporcionar suficiente información al usuario para guiarlo en la selección del equipo más apropiado para su aplicación particular. Desde que la mejor elección depende de la aplicación específica y desde que las capacidades de cada concepto dependen de los detalles de diseño, no se ha considerado presentar una categorización de los equipos. Este artículo es una actualización de aquel presentado por Alva Hurtado y Selig (1981).

## INTRODUCCIÓN

Un resumen del equipo disponible para medir el cambio volumétrico en ensayos triaxiales estáticos de laboratorio, ha sido presentado por Bishop y Henkel (1962). Estos métodos fueron agrupados en tres categorías. La primera mide el volumen de fluido que entra o sale de la celda de presión confinante para compensar el cambio de volumen de la muestra. Este método se utiliza con suelos parcialmente saturados. Se requieren correcciones apropiadas para la expansión de la celda y tuberías y la penetración del pistón de carga en la cámara durante el corte. La segunda mide el volumen de fluido que entra o sale de la muestra de suelo. Este

método se utiliza solamente con muestras saturadas durante el corte drenado. La tercera permite el cálculo del cambio volumétrico de la medición directa del cambio en longitud y diámetro de la muestra. Este método puede utilizarse en muestras saturadas o parcialmente saturadas.

Las mediciones de cambio volumétrico no se han limitado a los ensayos triaxiales. Aparatos para medir el cambio volumétrico en ensayos de fractura hidráulica y de permeabilidad de campo han sido presentados por Bjerrum et al (1972). También se han utilizado equipos para medir cambios volumétricos en función del tiempo (velocidad de flujo) en ensayos de permeabilidad de laboratorio (Wissa y Martin, 1972).

Los primeros dos métodos de laboratorio indicados anteriormente son los más comunes, aunque han utilizado principalmente el sistema de buretas con lectura manual. Este sistema será descrito brevemente, ya que el objetivo principal de este artículo es proporcionar una encuesta de los equipos para medir el cambio volumétrico que son apropiados para registrar automáticamente los datos. Se excluyen los equipos para medir el cambio volumétrico que se basan en la medición de las deformaciones radial y axial de muestras de suelo en el laboratorio.

El tipo de equipo más adecuado depende de factores específicos al caso en estudio, tales como: capacidad y volumen requeridos, precisión, taller e instrumentación disponibles y presupuesto designado. Las capacidades de los tipos de equipo pueden variar con los detalles de diseño, por lo que en este artículo no se establece una categorización de los equipos disponibles.

Con suelos de grano grueso, la medida del cambio volumétrico en el ensayo triaxial puede no ser exacta, debido a que la membrana de jebe penetra los vacíos entre partículas. El volumen de la penetración de la membrana debe restarse del cambio volumétrico total para obtener el cambio volumétrico correcto. Los factores principales que influyen esta corrección de membrana son: (1) tamaño promedio de partículas, (2) cambio en la presión efectiva de confinamiento, (3) relación de vacíos, granulometría y forma de partículas, (4) espesor y módulo de extensión de membrana de jebe y (5) área superficial cubierta. En este artículo no se presentan los métodos propuestos para corregir la penetración de la membrana en los ensayos triaxiales. Esta información se presenta en: Newland y Allely (1959), Kolbuszewski y Frederick (1963), Roscoe et al (1964), Steinbach (1967), Frydman et al (1973), Raju y Sadasivan (1974), Lade y Hernández (1977) y Kiekbusch y Schuppener (1971).

## SISTEMA DE BURETAS

Un sistema de buretas es un tubo calibrado que contiene un menisco formado por dos fluidos inmiscibles. Un fluido es el agua. El otro fluido es un aceite ligero: parafina, kerosene o silicón cuando existe contrapresión y aire cuando no existe contrapresión. Ya que el menisco se mueve como respuesta al flujo a través del tubo, los cambios volumétricos que ocurren en la muestra de suelo se leen anotando la localización de menisco en una escala de longitud graduada, montada junto a la bureta.

Existen diversos tipos de buretas. Un sistema relativamente barato fue desarrollado por Chan y Duncan (1967). Este sistema tiene una válvula esférica tipo no-desplazamiento, de cuatro entradas, que proporciona una capacidad infinita al permitir que la dirección de flujo del fluido en la bureta pueda invertirse (Fig. 1). Una bureta graduada de vidrio encerrada en una cámara acrílica (Fig. 2) fue presentada por Bishop y Donald (1961). Con este sistema no se sujeta a la bureta de vidrio a una diferencia de presión, de modo que la calibración no depende de la presión y la bureta de vidrio no está en peligro de romperse.

Un equipo de buretas dobles de vidrio con válvulas para invertir el flujo, basado en el concepto de la Fig. 2 existe disponible comercialmente de Wykeham Farrance, Inc. y Engineering Laboratory Equipment, Inc. El rango de capacidad de estas buretas varía de 5 a 100 cm<sup>3</sup>.

De acuerdo a Davis (1972), las desventajas de utilizar un sistema de buretas para medir el cambio volumétrico son:

- 1.- La resolución y el rango tienen efectos opuestos. Un sistema de buretas de gran rango tiene resolución inadecuada para medir cambios volumétricos pequeños. Un sistema de buretas muy sensible, de pequeño diámetro, debe ser muy largo para proporcionar un rango adecuado, creando pérdidas de carga excesivas para todo el recorrido.
- 2.- La contaminación crea problemas. Aún para sistemas de buretas de gran diámetro, una pequeña contaminación en la pared causa que el menisco se comporte pobremente, haciendo difícil las lecturas exactas.
- 3.- Las lecturas de los sistemas de buretas se realizan visualmente. El sistema de buretas no es adecuado para la adquisición automática de datos de cambio volumétrico.

## **MEDICIÓN DEL NIVEL DEL MENISCO**

Los sistemas que proporcionan una medición del nivel del menisco son una extensión del sistema de buretas, que incorporan un medio de generación de salida eléctrica del movimiento del menisco de la bureta y que puede ser registrado. Se han desarrollado cuatro métodos: (1) medición de la presión diferencial, (2) medición de la capacitancia, (3) medición del flotador y (4) medición del volumen de electrólito. Aparentemente no existen equipos disponibles comercialmente que estén basados en estos métodos de medición.

### **Medición de la Presión Diferencial.-**

El método de medición de la presión diferencial consiste de un transductor de presión diferencial muy sensible conectado a través de los extremos de un sistema de buretas que contiene dos fluidos de densidades diferentes. Campanella y Vaid (1972) presentaron la medida del cambio volumétrico de agua en una bureta con el uso de un transductor de presión diferencial tipo strain-gage y Saada (1970) con un transmisor de carga diferencial. Tatsuoka (1981) presentó el equipo de la Fig. 3, que utiliza un transductor de presión diferencial extremadamente sensible del tipo de capacitancia con un amplificador. Con este equipo pueden utilizarse contrapresiones de hasta 3000 kN/m<sup>2</sup>. El registro de cambio volumétrico se realiza con un voltímetro digital. La sensibilidad de este equipo es de 0.006 ml/mV para un rango de 25 ml ó de 0.0013 ml/mV para un rango de 5 ml.

De acuerdo a Davis (1972), las inconveniencias del sistema de buretas están todavía presentes. A menos que se permitan grandes pérdidas de carga a través del equipo, se debería utilizar un transductor de presión diferencial muy sensible. Este tipo de transductor es muy delicado y caro.

### **Medición de la Capacitancia.-**

El método de medición de la capacitancia consiste en introducir un alambre aislado en un sistema de buretas que contiene un menisco formado entre un fluido eléctricamente conductor y un fluido eléctricamente aislante. Una medición de capacitancia entre el alambre introducido y un alambre no-aislado inmerso en el fluido conductor, producirá una salida proporcional a la longitud del alambre no-aislado humedecido por el fluido conductor.

Las desventajas de este método son (Davis, 1972):

- 1.- La estabilidad con el tiempo es discutible, ya que se producen cambios en las propiedades de aislamiento del cable con el tiempo.
- 2.- El humedecimiento del alambre aislado por el fluido conducente puede llevar a resultados erráticos y
- 3.- El rango lineal utilizable es extremadamente estrecho.

### **Medición del Flotador.-**

El método del flotador que mide el nivel del menisco ha sido presentado por Mitchell y Burn (1971). Este equipo (Fig. 4) consiste de una bureta en donde el sistema de medición está compuesto de un transductor transformador diferencial de corriente directa (DCDT) con su núcleo apoyado en un flotador de vidrio. El flotador está sumergido en aceite silicón con aire por encima. El aceite proporciona un menisco estable aire-fluido y una reducción de los efectos a largo plazo de la evaporación y la difusión. El flotador está conectado al núcleo del DCDT y proporcionará una salida que es proporcional al movimiento del nivel del menisco. El instrumento necesita ser montado verticalmente para lograr una fricción mínima. Mayores detalles del equipo se presentan en Mitchell y Burn (1971). Los autores sostienen que una precisión de  $\pm 0.02 \text{ cm}^3$  se logra si el fluido de poros se mueve en una sola dirección y una precisión inferior de  $\pm 0.05 \text{ cm}^3$  si el fluido de poros cambia de dirección, debido a la fricción del núcleo. El instrumento fue diseñado para una presión máxima de trabajo (contrapresión) de 490 kPa y una capacidad de  $20 \text{ cm}^3$ . Los autores también indicaron que las lecturas del transductor fueron independientes de la contrapresión aplicada y que la calibración fue lineal.

### **Medición del Volumen de Electrólito.-**

El método de medición de volumen de electrólito ha sido presentado por Sharpe (1978). El método mide directamente el volumen de electrólito en una bureta y tiene una precisión de  $\pm 0.01 \text{ cm}^3$  sobre un rango de  $25 \text{ cm}^3$ . Una vista esquemática del aparato se presenta en la Fig. 5. El agua de la muestra se coloca en un reservorio que tiene una interfase agua-kerosene. El reservorio está conectado a la Bureta A que contiene kerosene y un electrólito (solución de cloruro de sodio, 320 gr/lit). El kerosene aísla el agua de los poros del electrólito y proporciona un medio visual de observación de los cambios volumétricos. El electrólito fluye hacia una segunda Bureta B, que está envuelta en papel aluminio y actúa como un capacitor variable. La Bureta B está encerrada en un tubo metálico que tiene placas de acrílico para aislar el electrodo de papel de aluminio y prevenir la interferencia externa. El contacto eléctrico con el

electrólito se realiza al introducir un tubo de bronce de 25 mm de longitud en la conexión entre las Buretas A y B. La superficie libre del electrólito en la Bureta B se cubre con una capa de aceite ligero con propósitos de sellado. Un circuito electrónico fue diseñado por Sharpe (1978) para producir una relación lineal entre el voltaje de salida en corriente directa y el cambio de volumen. Sharpe (1978) indica que el instrumento es ligeramente sensible a la variación de temperatura. No se indicaba la utilización de contrapresiones con este equipo.

## **SISTEMA GRAVIMÉTRICO**

Como alternativa al sistema de buretas, el sistema gravimétrico se diseña para pesar el fluido a ser medido. Esto proporciona una determinación exacta del cambio de volumen, que con el uso de transductores de fuerza generará señales eléctricas con propósitos de registro automático. Se han encontrado en la literatura dos sistemas gravimétricos: aparato de pesado directo y aparato de balanza de brazos. Aparentemente, equipos del sistema gravimétrico no existen comercialmente.

### **Aparato de Pesado Directo.-**

Mitchell y Burn (1971) describen el equipo de pesado directo mostrado en la Fig. 6. El instrumento consiste de una taza acrílica de pesado suspendida de un transductor de fuerza, hacia donde se permite fluir el fluido de poros a ser medido. Debido a que la taza es físicamente independiente, la precisión está limitada solamente por el transductor de fuerza. Una capa de aceite silicón está flotando en la superficie del fluido de poros para reducir el efecto de la evaporación a largo plazo. Una puerta de acceso a la presión de aire está disponible para aplicar presiones de aire de igualación a través del instrumento y al interior del transductor. La precisión de la medición sin contrapresión fue de  $\pm 0.05 \text{ cm}^3$  (en base a las características del transductor). La aplicación de la presión causó un cambio casi lineal de las lecturas del transductor bajo carga constante, requiriendo por eso una corrección por contrapresión. El prototipo tuvo una capacidad de  $30 \text{ cm}^3$  y fue utilizado por Mitchell y Burn (1971) en ensayos sin contrapresión.

De acuerdo a Davis (1972), los inconvenientes de este tipo de equipo son:

- 1.- El transductor de fuerza no se utiliza eficientemente, ya que parte de su rango potencial se utiliza en sostener la taza de pesado.
- 2.- El equipo no puede ser invertido para extender su rango. Cuando la taza se llena, ésta deber ser vaciada.

3.-El equipo no puede utilizarse como un equipo de flujo de salida, ya que no ocurre flujo a través del mismo sino sólo hacia él.

### **Aparato de Balanza de Brazos.-**

Davis (1972) describió el equipo de balanza de brazos que se muestra en la Fig. 7. Este equipo permite que el transductor de fuerza sea utilizado eficientemente, midiendo el cambio volumétrico en todo su rango. Se permite la inversión del flujo y la medición del flujo de entrada y del flujo de salida.

El equipo consiste de dos recipientes de acrílico para fluido sostenidos de los extremos de una balanza de brazos de aluminio, apoyada por cojinetes de bolas en una columna vertical que está conectada a una placa de base. Cada recipiente está lleno, la mitad con agua y la mitad con aceite silicón de menor densidad que el agua. Una conexión del flujo de entrada se realiza al fondo de un recipiente, una conexión de cruce existe a lo largo de los brazos de la balanza entre las partes superiores de los recipientes y una conexión del flujo de salida se realiza al fondo del otro recipiente. Un transductor de fuerza de 100 gr (precisión 0.1% FS) se coloca a una localización conveniente bajo uno de los brazos de la balanza y se le utiliza para medir los cambios en el peso relativo de los dos recipientes.

Al ocurrir el flujo a través del aparato, el agua entra a un recipiente y empuja al aceite silicón de este recipiente a través de la conexión de cruce al segundo recipiente. Debido a la diferencia de densidad entre el agua y el aceite silicón, ocurre un cambio de peso entre los recipientes. Este cambio de peso es proporcional al volumen de flujo que ha ocurrido y cuando se mide con un transductor de fuerza, proporciona una salida eléctrica que puede ser registrada en un sistema automático de adquisición de datos. El equipo construido por Davis (1972) tuvo un rango de 0 a 120 cm<sup>3</sup>, pero era capaz de tener inversión de flujo para extender su rango indefinidamente. La curva de calibración fue lineal y tuvo un error esperado de 0.21 % FS (0.25 cm<sup>3</sup>).

Davis (1972) sostiene que al usar recipientes de mayor diámetro, se puede mantener pequeño el cambio en el nivel del fluido para cambios de volumen grandes, limitando a un valor pequeño el cambio de carga a través del instrumento. Adicionalmente, Davis (1972) indica que el equipo no está sujeto a problemas de contaminación.

Kiekbush (1977) ha descrito un aparato gravimétrico de medición de cambio de volumen que es adecuado para el registro automático de datos. La precisión de este instrumento es de  $\pm 0.01$  cm<sup>3</sup> con un rango de medición de 25 cm<sup>3</sup> y  $\pm 0.001$  cm<sup>3</sup> con un rango de 3 cm<sup>3</sup>.

## SISTEMA CON SERVOMECANISMOS

En el pasado se han utilizado servomecanismos para el registro automático de alturas de los líquidos en columnas de manómetros, por ejemplo en Henry (1975), Farquharson y Kermicle (1957) y Robertson (1956). Se utiliza un elemento sensor para determinar la altura del líquido en la columna, de tal modo que en el punto de balance o nulo, no existe salida. Cuando cambia la altura del líquido, se produce y amplifica una señal de "error" que acciona un servomotor. El servomotor entonces reposiciona el sensor de altura del líquido de tal modo que el punto nulo se reestablece. La rotación angular del servomotor puede utilizarse para registrar los cambios en la altura del líquido. El mismo principio se ha aplicado a los aparatos de cambio de volumen.

Un equipo con servomecanismo para medir cambios volumétricos en ingeniería geotécnica ha sido descrito por Lewin (1971) y se presenta en la Fig. 8. El fluido de poros de la muestra está conectado a una bureta cubierta con acrílico. La bureta está llena de agua y kerosene y está conectada a una fuente de contrapresión por medio de un cilindro de control. Los extremos del cilindro de control están conectados a una unidad de desplazamiento nulo llena de mercurio (tubo en U). También existe una válvula de derivación que normalmente está cerrada.

Cualquier cambio de volumen en la celda resulta en movimiento del mercurio en el tubo en U. Este movimiento se detecta eléctricamente por los contactos en el mercurio y éstos se utilizan para encender el servomotor. El motor, a través de un engranaje de cremallera y piñón, empuja al pistón a desplazar líquido para compensar el movimiento del mercurio por una cantidad suficiente para hacer retornar al mercurio a su posición inicial. Cuando esto ocurre, los contactos eléctricos se interrumpen de modo que el servomotor se detiene. Así, el cambio volumétrico en la bureta se convierte en un movimiento axial servo-accionado del pistón de control y este movimiento axial puede ser utilizado para operar un deformómetro o un transductor electrónico de desplazamiento. Si se conoce el diámetro interior del cilindro de control, se pueden determinar los cambios volumétricos.

El aparato presentado por Lewin (1971) tuvo un rango de  $5 \text{ cm}^3$  con una precisión de  $0.005 \text{ cm}^3$ , operando a  $0.5 \text{ cm}^3/\text{min}$ . Este equipo está disponible comercialmente de Wykehan Farrance, Inc, con una capacidad de  $10 \text{ cm}^3$ .

Un aparato similar fue reportado por Irwin (1972) para la medición de la permeabilidad in-situ, que es capaz de registrar automáticamente los resultados. Un tren de engranaje se utilizó para transformar el empuje del motor en movimiento lineal del pistón. Un ensamblaje de imán e interruptor de caña se utiliza para determinar el número de revoluciones de un engranaje seleccionado. El registro automático del



cambio volumétrico se logró con una impresora que acumulaba el número de revoluciones del engranaje.

Watts (1980) presentó un aparato que tiene un sistema de servomecanismo basado en una fuente de luz y un sensor. El aparato tiene un rango de  $800 \text{ cm}^3$  con una sensibilidad mejor que  $0.5 \text{ cm}^3$ . La presión de trabajo del sistema fue 700 kPa. Este aparato se utilizó para registrar automáticamente el cambio volumétrico de muestras de enrocado de 230 mm. de diámetro.

El aparato de cambio volumétrico consiste de dos recipientes concéntricos (Fig. 9). Una cámara graduada interior de vidrio con tapas de aluminio y sellos "o-ring" está montada dentro y está hidráulicamente aislada de una cámara exterior hecha de acrílico con tapas de aluminio y sellos "o-ring". La cámara exterior también tiene varillas de tensión. La cámara interior contiene una interfase agua/parafina que se mueve con el flujo de agua. Un flotador opaco de polietileno se coloca en la interfase. Los fluidos en las cámaras interior y exterior se mantienen a la misma presión.

La posición del flotador en la cámara interior se registra continuamente. Un haz de luz se transmite de una fuente a un lado de la cámara, a un sensor de luz montado diametralmente opuesto a la fuente. La fuente y el sensor están montados en un asiento, a través del cual pasa un engranaje de rueda y tornillo sin fin accionado por un motor eléctrico montado en la parte superior del equipo. El cambio en la posición del flotador se registra por un transformador diferencial variable lineal (LVDT). Se disponen de válvulas solenoides que pueden invertir automáticamente el flujo. Los detalles electrónicos del sistema servo están presentados en Watts (1980). Este equipo aparentemente no está disponible comercialmente.

## **SISTEMA DE POTES DE MERCURIO**

Un método simple y confiable para medir automáticamente el cambio volumétrico fue desarrollado por Rowlands (1972). Este método (Fig. 10) utiliza la unidad de presión constante de mercurio auto-compensante de Bishop (Bishop y Henkel, 1962). La extensión del resorte en esta unidad es directamente proporcional al volumen de fluido que sale de la muestra del suelo y puede ser medido por un deformómetro o registrado automáticamente con un transductor de desplazamiento.

El drenaje de la celda triaxial está conectado a una bureta simple para propósitos de calibración, mientras que el otro extremo del aparato está conectado al sistema de contrapresión. Dos potes de acrílico están llenos de mercurio y agua, como en el aparato de Bishop. Los potes están suspendidos de resortes, uno de los cuales tiene adicionalmente un transductor de desplazamiento. Conforme el agua drena de la

muestra, el mercurio fluiría de un pote al otro, pero su nivel permanecerá constante en ambos pots debido a las deflexiones de los resortes de compensación. El transductor de desplazamiento fijado a uno de los resortes registrará su deflexión. Una calibración de la salida del transductor se obtiene con la bureta. Para un pote de mercurio de Bishop de tamaño regular (6.4 cm de diámetro interior) y un resorte de rigidez de 216 N/m, una deflexión de 0.001 mm representa un cambio volumétrico de 0.0016 cm<sup>3</sup>. Algunos problemas de medición pueden desarrollarse con la vibración.

Darley (1973) desarrolló un aparato similar, que se muestra en la Fig. 11. De acuerdo al autor, este instrumento tiene la ventaja de utilizar un solo resorte con el doble de sensibilidad. Uno de los dos pots está fijo, mientras que el otro está suspendido del resorte por el núcleo de un LVDT. Las calibraciones de este equipo con una bureta indicaron precisiones de  $\pm 0.05$  cm<sup>3</sup> sin cambio significativo en la calibración con la velocidad de flujo. La capacidad de este aparato fue 24 cm<sup>3</sup>, pero si se requieren mayores volúmenes, se puede invertir la dirección del flujo. Se encontraron algunas dificultades en el proceso de deaireado de este aparato.

Marchant y Schofield (1978) presentaron un aparato para proporcionar presiones constantes y cambios volumétricos a presiones bajas. Debido a la presión baja, la no-linealidad o histéresis, podrían producirse errores que no son aceptables. El resorte se sustituye por una balanza eléctrica que tiene un resorte muy preciso y constante. La resolución de este equipo fue de  $\pm 0.08$  cm<sup>3</sup>.

Klementev (1974) desarrolló el aparato tipo palanca que se presenta en la Fig. 12. El flujo de la celda triaxial se conecta a un cilindro de acrílico A, mientras que la salida del otro cilindro, el B, se conecta a una unidad de presión constante. Conforme el agua fluye de la muestra al cilindro A, el mercurio fluye del cilindro A al cilindro B, pero el nivel del mercurio permanece constante en ambos cilindros debido a la deflexión de la palanca, que causa flexión en el resorte plano. En la superficie del resorte se colocan indicadores de deformación formando un puente Wheatstone. La señal de salida del puente es proporcional al cambio volumétrico del fluido drenado de la muestra. Un amortiguador de aceite se utiliza para atenuar vibraciones pequeñas. Para medir volúmenes mayores se utilizan, para invertir el flujo, dos válvulas solenoides de tres entradas operadas automáticamente. Klementev reporta una sensibilidad de  $\pm 0.001$  cm<sup>3</sup> para este aparato utilizando indicadores alámbricos de deformación.

## **SISTEMA DE DIAFRAGMA RODANTE Y TRANSDUCTOR DE DESPLAZAMIENTO**

Menzies (1975) presentó un aparato de cambio volumétrico similar al de Lewin (1971), pero sin la necesidad de utilizar un servomecanismo. Una vista esquemática

de este aparato se presenta en la Fig. 13. El aparato consiste de dos cámaras acrílicas verticales concéntricas con placas horizontales superior e inferior. La cámara interior está separada en parte superior y parte inferior por un pistón de bronce que incorpora un diafragma rodante. El peso del pistón aplica una pequeña presión diferencial a través del diafragma enrollado, por lo que se obtiene la acción rodante de fricción baja. La parte inferior se comunica a través de un ducto a una válvula en la placa inferior. Un transductor de desplazamiento sumergible en agua del tipo de inductancia se fija dentro de la parte superior de la cámara interior; el cable del transductor pasa a través de un sello "o-ring" en la placa superior. El núcleo del transductor de desplazamiento está conectado al pistón. Un pequeño orificio a través de la cámara interior cerca a la parte superior, hace posible la comunicación con el espacio existente entre las cámaras interior y exterior, que también tiene un ducto a una válvula en la placa inferior.

Al conectar una válvula a la fuente de contrapresión y la otra a la celda triaxial, cualquier desplazamiento de agua en una u otra dirección del ducto de fluido de poros causa movimiento al pistón y por lo tanto al núcleo del transductor. Una válvula esférica sin desplazamiento, de cuatro entradas, puede utilizarse para invertir el flujo cuando el pistón se aproxima al final de su carrera, y por lo tanto extender el rango del aparato.

El aparato tipo Menzies se encuentra disponible comercialmente de Wykeham Farrance, Inc. Este aparato tiene una capacidad de  $85 \text{ cm}^3$ , pero fácilmente se puede expandir a una capacidad mayor. La precisión está en el orden de  $0.05 \text{ cm}^3$ . Engineering Laboratory Equipment, Inc. proporciona un aparato similar, con un rango de  $80 \text{ cm}^3$  y una precisión de  $0.1 \text{ cm}^3$ . La máxima presión de trabajo es de 1700 kPa. Structural Behavior Engineering Laboratories, Inc. también fabrica el aparato de cambio volumétrico tipo Menzies. Existen dos modelos. Uno de ellos está construido con paredes de cámara de acero inoxidable, de modo que puede trabajar con una contrapresión de 2450 kPa. El otro modelo tiene cámaras de acrílico y una presión de trabajo de 980 kPa. La capacidad de este aparato es de  $40 \text{ cm}^3$  y determinará cambios volumétricos tan bajos como  $0.001 \text{ cm}^3$ .

Hodgson (1976) presentó un aparato similar al de Menzies. Este aparato tiene una capacidad de  $33 \text{ cm}^3$ , con una precisión en el orden de  $0.0033 \text{ cm}^3$  y una presión de trabajo de 3450 kPa. Existen varias diferencias con el aparato de Menzies. El desplazamiento del pistón se mide externamente, del desplazamiento de una barra conectada al pistón y pasando a través de un collarín en el recipiente a presión. Para que se mueva el pistón, la presión diferencial a través del mismo debe ser lo suficiente para superar la fricción del collarín. La presión diferencial es suficiente para causar alargamiento de los diafragmas rodantes, requiriéndose un ajuste de la referencia de medición después de cada cambio importante en la presión.

Un aparato eléctrico de cambio volumétrico que usa un multiplicador de presión aire/agua sin fricción, ha sido desarrollado por R.T. Martin en el Instituto Tecnológico de Massachusetts. Este aparato se encuentra disponible comercialmente de Geotechniques International, Inc. Este aparato, descrito por Hadge (1979), se muestra en la Fig. 14. El cambio de volumen de agua en un reservorio de acrílico en la parte inferior del aparato, se mide al registrar el movimiento del pistón con un DCDT montado externamente. El aparato incorpora diafragmas rodantes en los reservorios de aire y de agua, para reducir la fricción. El reservorio de aire superior es un cilindro de aire Bellofram y contiene una abertura enroscada para aplicar la contrapresión. Es importante que la presión de aire en el reservorio de aire sea igual que la presión de poros o la presión de cámara en el reservorio acrílico inferior. En estas condiciones el pistón en el aparato tiene una carga balanceada, y se moverá hacia atrás o hacia adelante conforme la cantidad de agua en el reservorio varía.

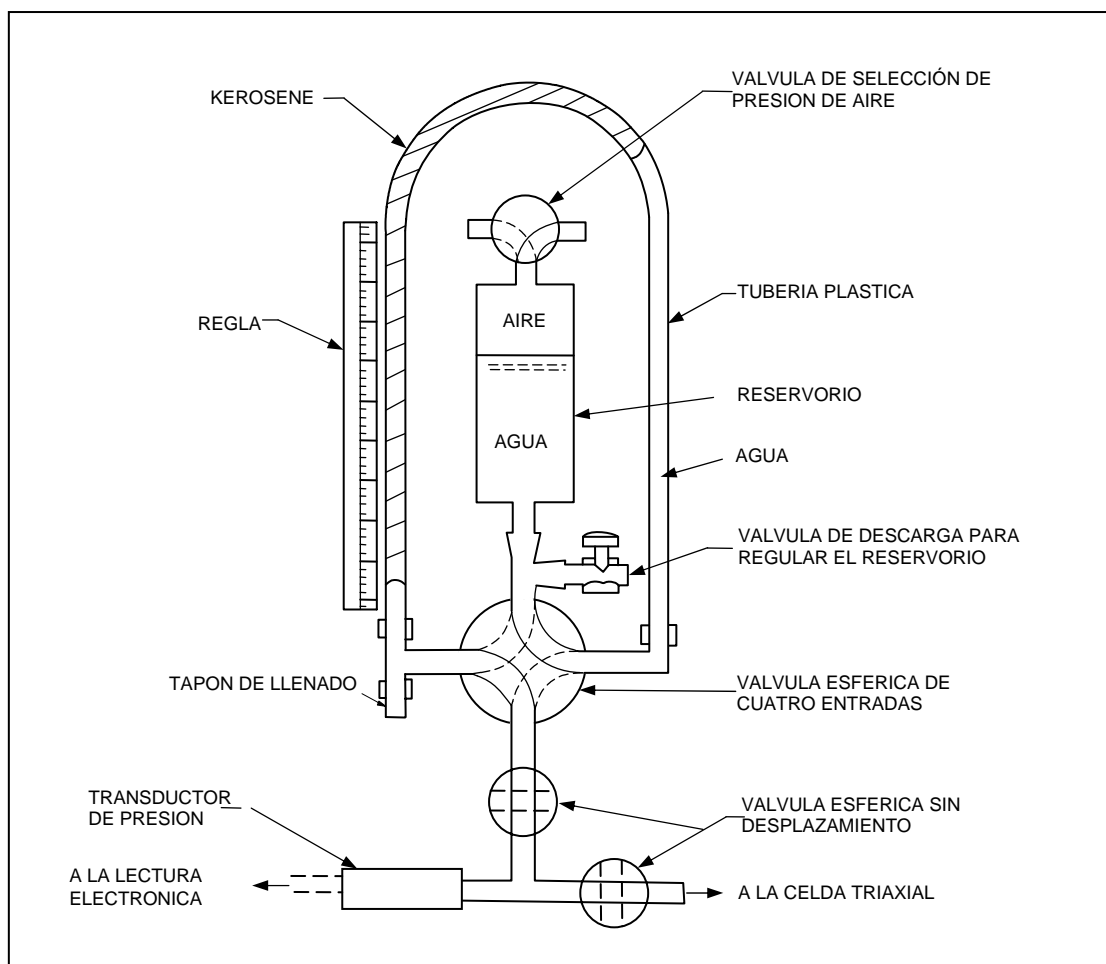
Se han utilizado volúmenes de reservorios de 8 y 160 cm<sup>3</sup>. Para el aparato de 160 cm<sup>3</sup> de capacidad, la precisión de medición de cambio volumétrico es de 0.1 cm<sup>3</sup>. El cambio a un DCDT de carrera más corta reduce el rango del cambio volumétrico para cualquier postura a 12 cm<sup>3</sup>, pero aumenta la precisión a 0.02 cm<sup>3</sup> y la sensibilidad a 0.002 cm<sup>3</sup>. De acuerdo a Martin, el coeficiente de temperatura medido del aparato es 0.02 cm<sup>3</sup>/°C. Existe una pequeña fuga a través de la membrana, que a 1380 kPa es igual a 7.5 x 10<sup>-3</sup> cm<sup>3</sup>/día. El cambio de presión da un cambio volumétrico aparente de 0.17 cm<sup>3</sup>/690 kPa, que es muy reproducible. El aparato ha sido operado a presiones de 69 a 1720 kPa. El factor del multiplicador de presión es ligeramente dependiente de la presión, pero puede ser confiablemente corregido a través de una calibración.

## REFERENCIAS

- 1) Alva Hurtado J.E. y E.T. Selig (1981), "Survey of Laboratory Devices for Measuring Soil Volume Change", Geotechnical Testing Journal, ASTM, Vol 4, N°1, pp. 11-18.
- 2) Bishop, A.W. e I.B. Donald (1961), "The Experimental Study of Partly Saturated Soils in the Triaxial Apparatus", Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1, Paris, France, pp. 13-21.
- 3) Bishop, A.W. y D.J. Henkel (1962), The Measurements of Soil Properties in the Triaxial Test, St. Martin's Press, New York.
- 4) Bjerrum, L., J.K.T.L. Nash, R.M. Kennard y R.E. Gibson (1972), "Hydraulic Fracturing in Field Permeability Testing", Geotechnique, Vol. 22, N°2, pp. 319-332.
- 5) Campanella, R.G. y Y.P. Vaid (1972), "A Simple Ko Triaxial Cell", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 9, pp. 249-260.
- 6) Chan, C.K. y J.M. Duncan (1967), "A New Device for Measuring Volume Change and Pressures in Triaxial Tests on Soils", Technical Note, Materials Research and Standards, ASTM, Vol 7, N°7, pp. 312-314.
- 7) Darley, P. (1973), Discusión de "Apparatus for Measuring Volume Change Suitable for Automatic Logging", Geotechnique, Vol. 23, N°1, pp. 140-141.
- 8) Davis, S.C. (1972), "Electronic Volume Change and Flow Rate Devices", M.Sc. Thesis, Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.
- 9) Farquharson, J. y H.A. Kermicle (1957), "Precise Automatic Manometer Reader", The Review of Scientific Instruments, Vol. 28, N°5, pp. 324-325.
- 10) Frydman, S., J.G. Zeitlen e I. Alpan (1973), "The Membrane Effect in Triaxial Testing of Granular Soils", Journal of Testing and Evaluation, ASTM, Vol. 1, N°1, pp. 37-41.
- 11) Hadge, W.E. (1979), "A Relationship between the Drained and Undrained Cyclic Behavior of Sand", M.Sc. Thesis, Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.

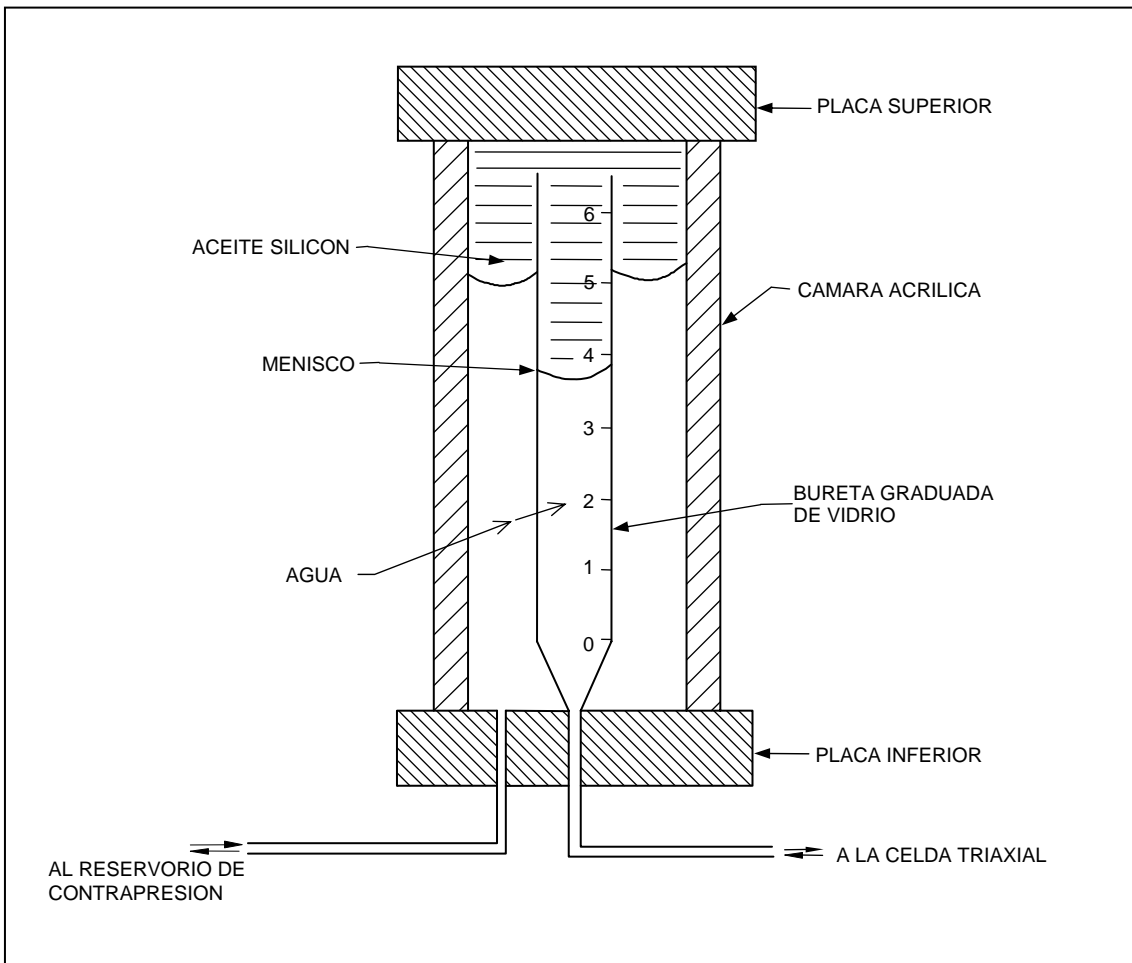
- 12) Henry, A.Z. (1975), Editor de "Instrumentation for Environmental Sciences", American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, Michigan.
- 13) Hodgson, J.D. (1976), Discusión de "A Device for Measuring Volume Change", Geotechnique, Vol. 26, N°1, pp. 243-244.
- 14) Irwin, M.J. (1972), Discusión de "Use of Servo Mechanisms for Volume Change Measurement and Ko Consolidation", Geotechnique, Vol. 22, N°1, pp. 186-187.
- 15) Kiekbusch, M. (1977), "Electrical Measurement of Volume Changes during the Triaxial Tests", (en alemán), Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau, H. 41, pp. 111-119.
- 16) Kiekbusch, M. y B. Schuppener (1977), "Membrane Penetration and Its Effect on Pore Pressures", Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 103, N° GT 11, pp. 1267-1279.
- 17) Klementev, I. (1974), "Lever-type Apparatus for Electrically Measuring Volume Change", Technical Notes, Geotechnique, Vol. 24, N°4, pp. 670-671.
- 18) Kolbuszewski, J. y M.R. Frederick (1963), "The Measurement of Volume Change in the Triaxial Cell", Proceedings of the European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Wiesbaden, Germany, pp. 27-32.
- 19) Lade, P.V. y S.B. Hernández (1977), "Membrane Penetration Effects in Undrained Tests", Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 103, N°GT2, pp. 109-125.
- 20) Lewin, P.I. (1971), "Use of Servo Mechanisms for Volume Change Measurement and Ko Consolidation", Technical Notes, Geotechnique, Vol. 21, N°3, pp. 259-262.
- 21) Marchant, J.A. y C.P. Schofield (1978), "A Combined Constant Pressure and Volume Change Apparatus for Triaxial Test at Low Pressures", Technical Notes, Geotechnique, Vol. 28, N°3, pp. 351-353.
- 22) Menzies, B.K. (1975), "A Device for Measuring Volume Change", Technical Notes, Geotechnique, Vol. 25, N°1, pp. 133-134.
- 23) Mitchell, R.J. y K.N. Burn (1971), "Electronic Measurement of Changes in the Volume of Pore Water During Testing of Soil Samples", Technical Note, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 8, N°2, pp. 341-345.

- 24) Newland, P.L. y B.H. Allely (1959), "Volume Changes During Undrained Triaxial Tests on Saturated Dilatant Granular Materials", *Geotechnique*, Vol. 9, N°4, pp. 174-182.
- 25) Raju, V.S. y S.K. Sadasivan, (1974), "Membrane Penetration in Triaxial Tests on Sands", *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol. 100, N°GT4, pp. 482-489.
- 26) Robertson, G.W.E. (1956), "A Micromanometer Designed for Recording", *Journal of Scientific Instruments*, Vol. 33, pp. 402-404.
- 27) Roscoe, K.H., A.N. Schofield y A. Thurairajah, (1963), "An Evaluation of Test Data for Selecting a Yield Criterion for Soils", *Proceedings of the Symposium on Laboratory Shear Testing of Soils, ASTM, STP 361*, pp. 111-128.
- 28) Rowlands G.O. (1972), "Apparatus for Measuring Volume Change Suitable for Automatic Logging", *Geotechnique*, Vol. 22, N°3, pp. 525-526.
- 29) Saada, A.S. (1970), "One-Dimensional Consolidation in Triaxial Cell", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol. 96, SM3, pp. 1085-1089.
- 30) Steinbach, J. (1967), "Volume Change Due to Membrane Penetration in Triaxial Tests on Granular Materials", M.Sc. Thesis, Cornell University, Ithaca, NY:
- 31) Sharpe, P. (1978), "A Device for Automatic Measurement of Volume Change", *Technical Notes, Geotechnique*, Vol. 28, N°3, pp. 348-350.
- 32) Tatsuoka, F. (1981), "A Simple Method for Automatic Measurement of Volume Change in Laboratory Tests", *Technical Note, Soils and Foundations*, Vol. 21, N°3, pp. 104-106.
- 33) Watts, K.S. (1980), "A Device for Automatic Logging of Volume Change in Large Scale Triaxial Test", *Geotechnical Testing Journal, ASTM*, Vol. 3, N°1, pp. 41-44.
- 34) Wissa, A.E.Z. y R.T. Martin (1972), "Operation Manual for Permeability System", Report R72-59, Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.

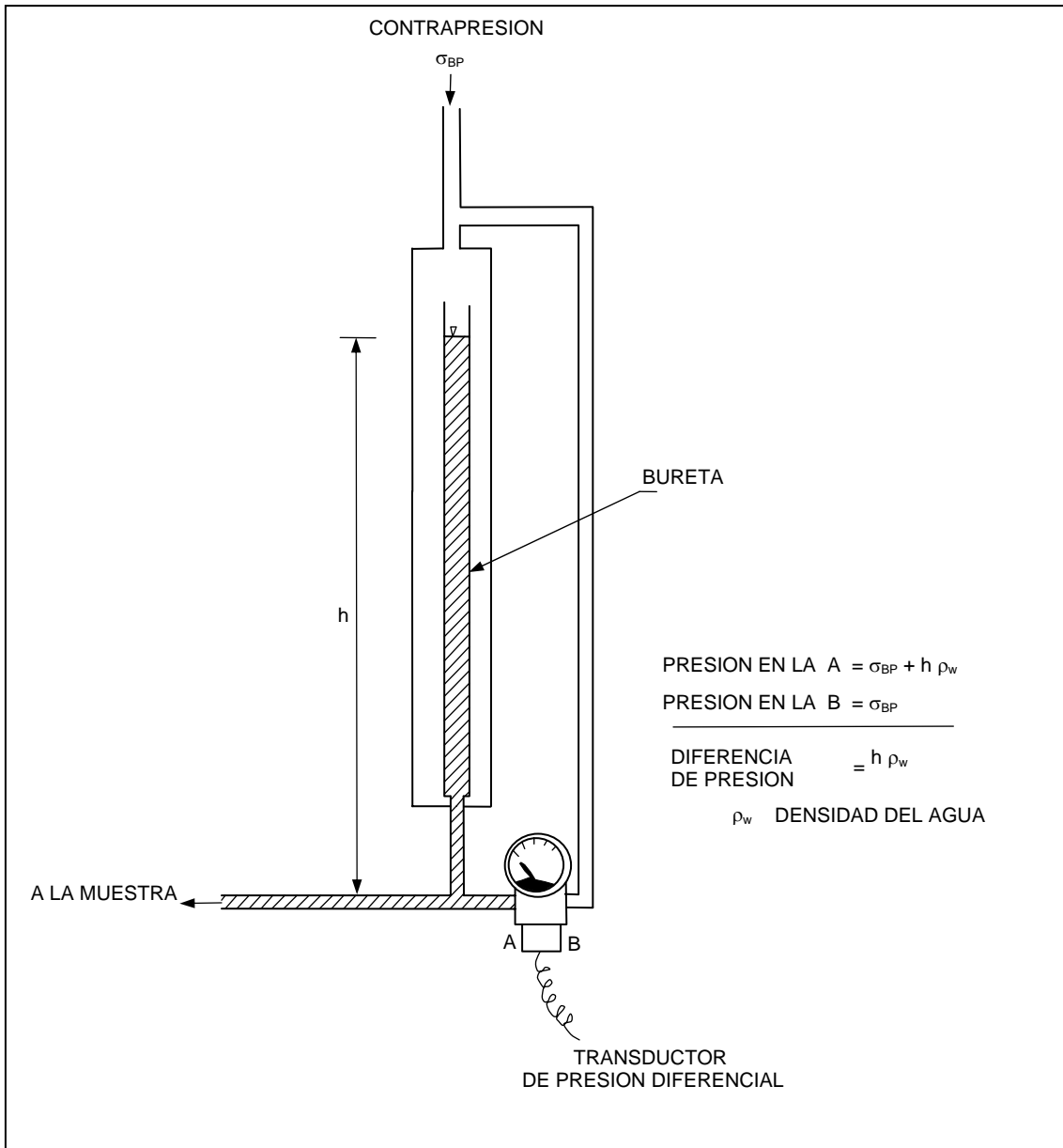


**Figura 1. Sistema de Bureta para la Medición del Cambio Volumétrico y la Presión (Chan y Duncan, 1967)**

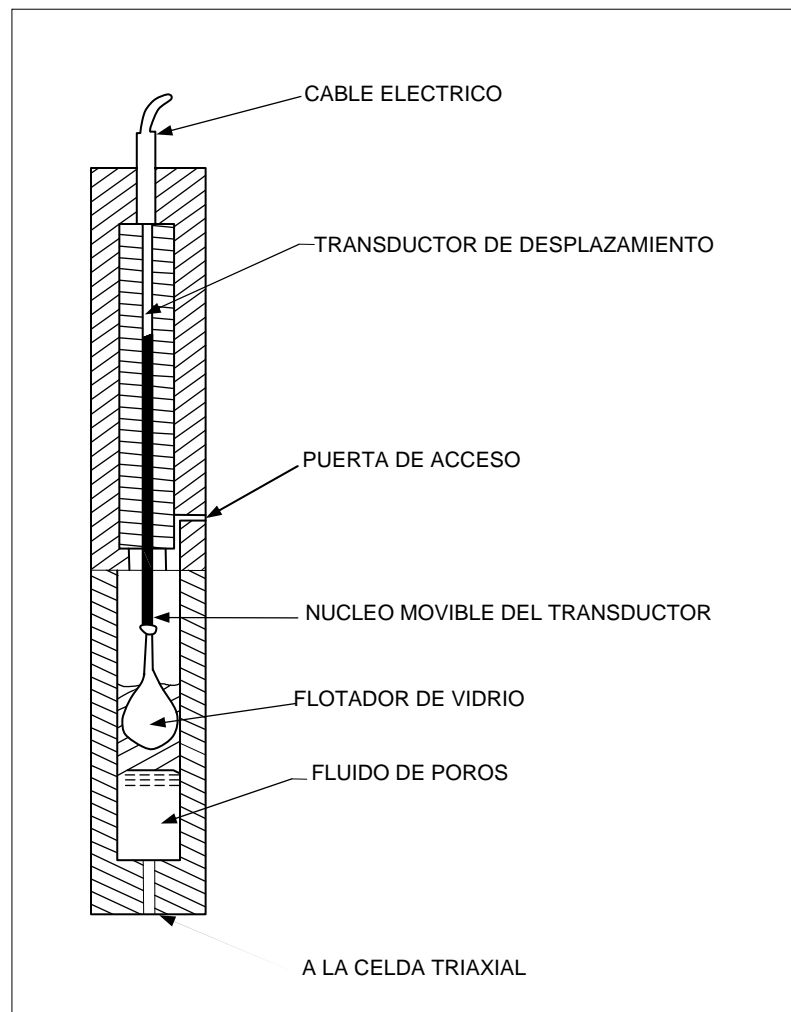




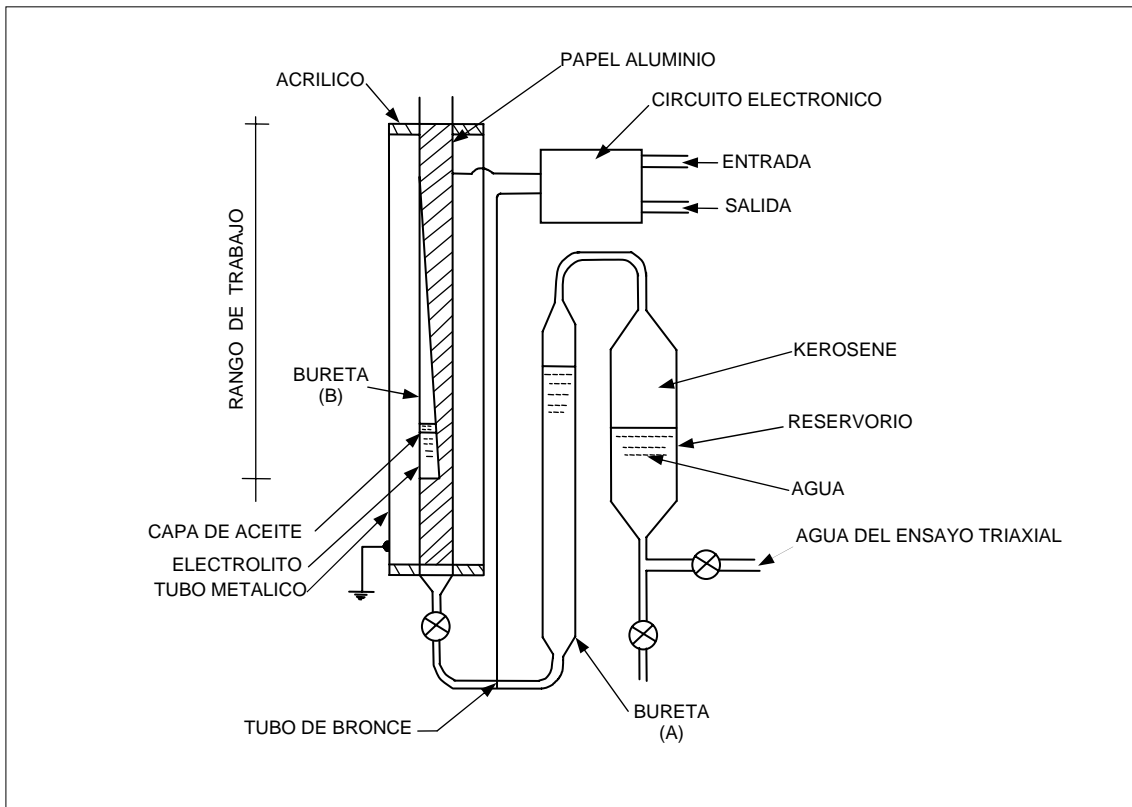
**Figura 2. Bureta Graduada de Vidrio Encerrada en una Cámara Acrilica  
(Bishop y Donald, 1961)**



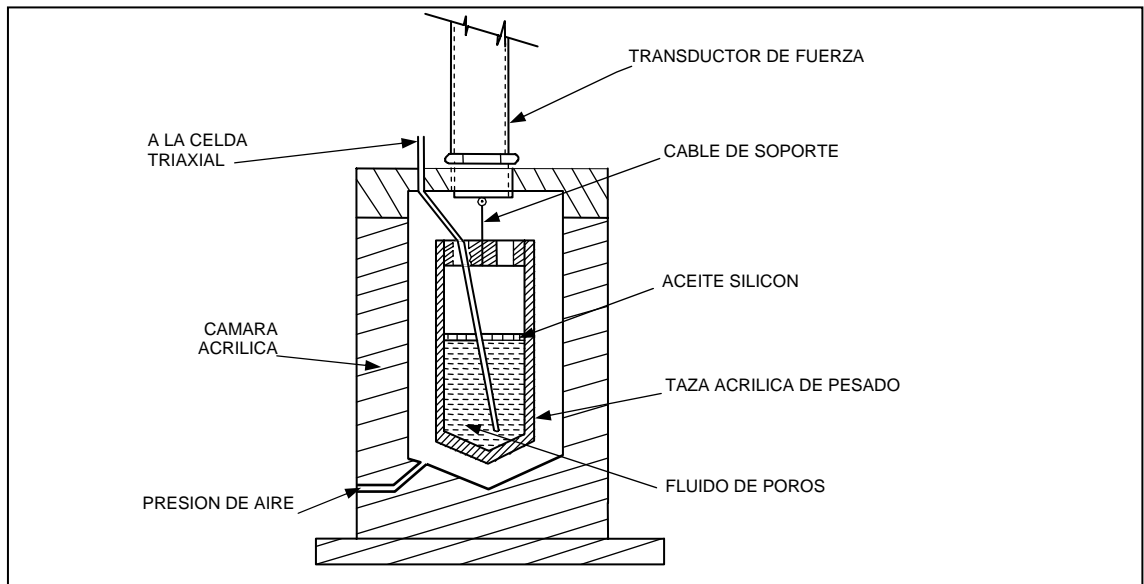
**Figura 3. Medición Automática del Cambio Volumétrico con Transductor de Presión Diferencial (Tatsuoka, 1981)**



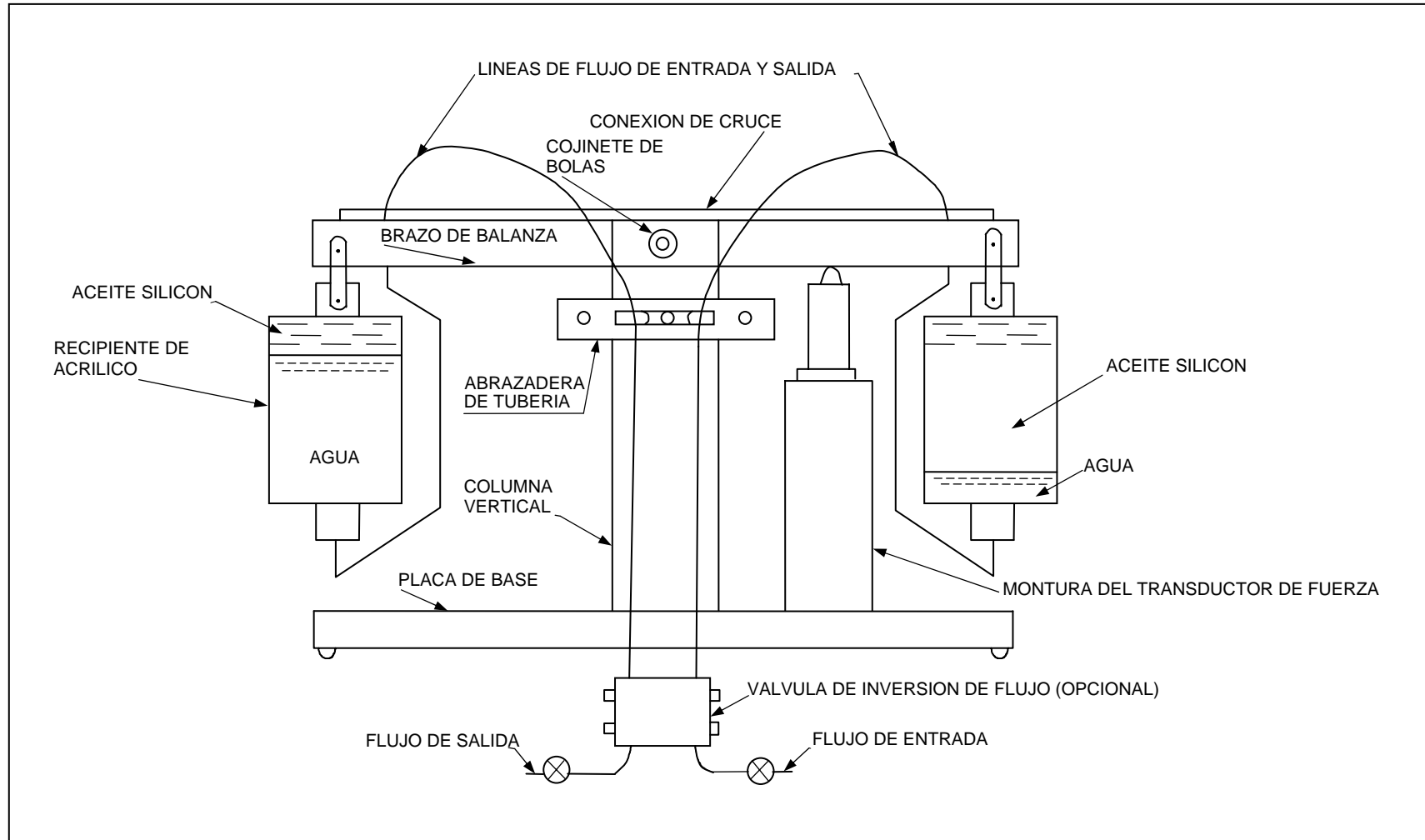
**Figura 4. Esquema del Equipo de Medición del Flotador  
(Michell y Burn, 1971)**



**Figura 5. Esquema del Equipo de Medición del Volumen de Electrólito (Sharpe, 1978)**

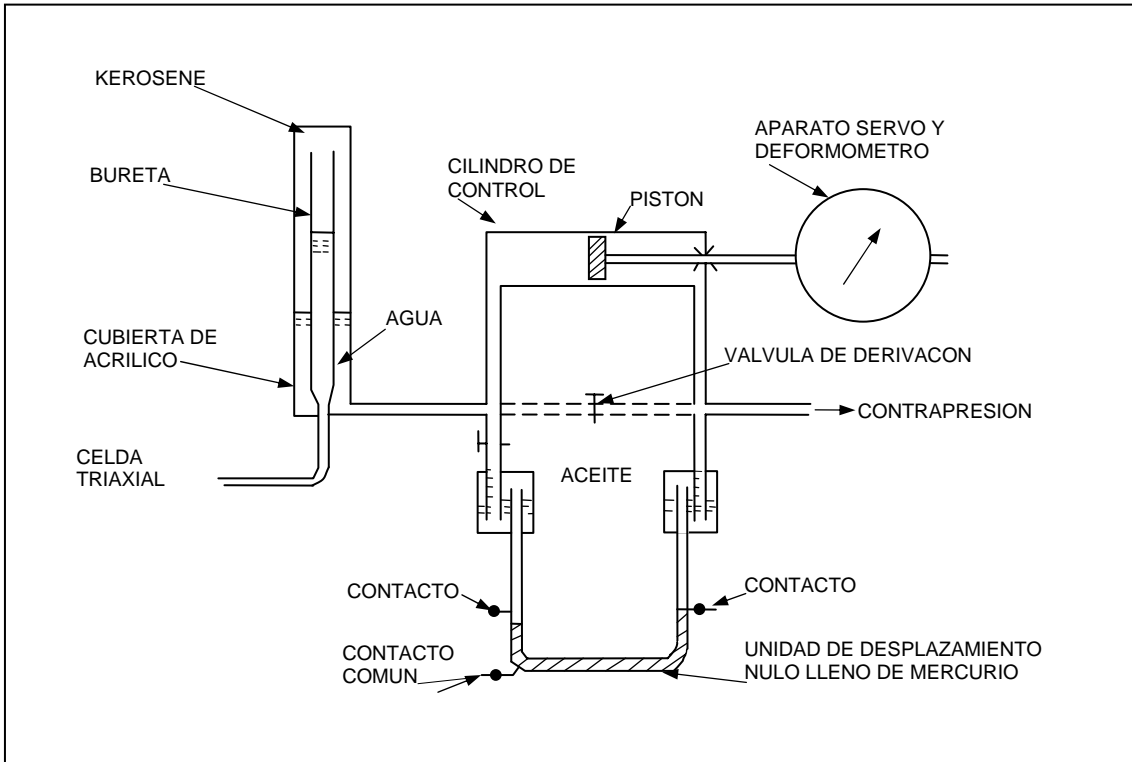


**Figura 6. Esquema del Equipo Gravimétrico de Pesado Directo  
(Mitchell y Burn, 1971)**

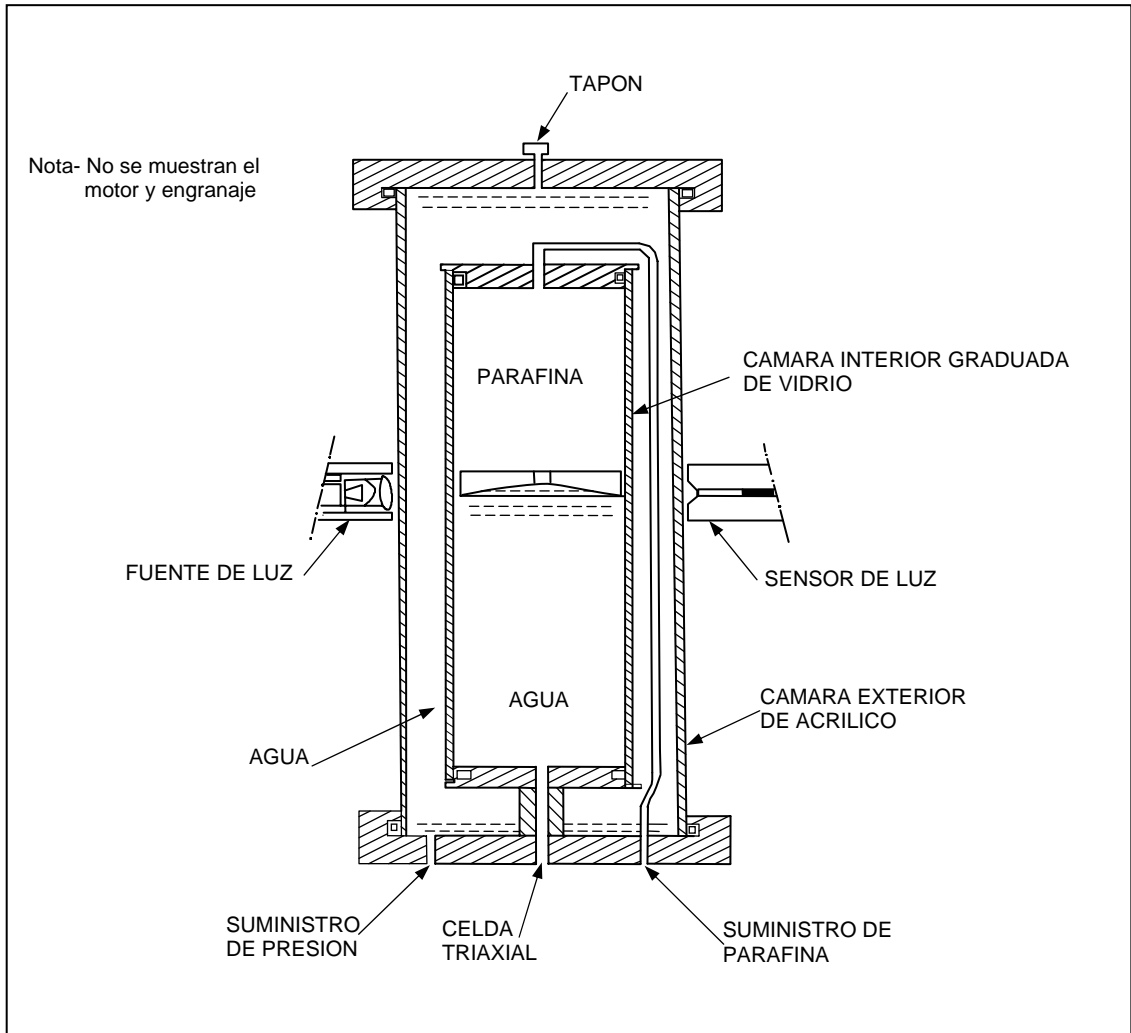


**Figura 7. Esquema del Equipo Gravimétrico de Balanza de Brazos**

**(Davis, 1972)**

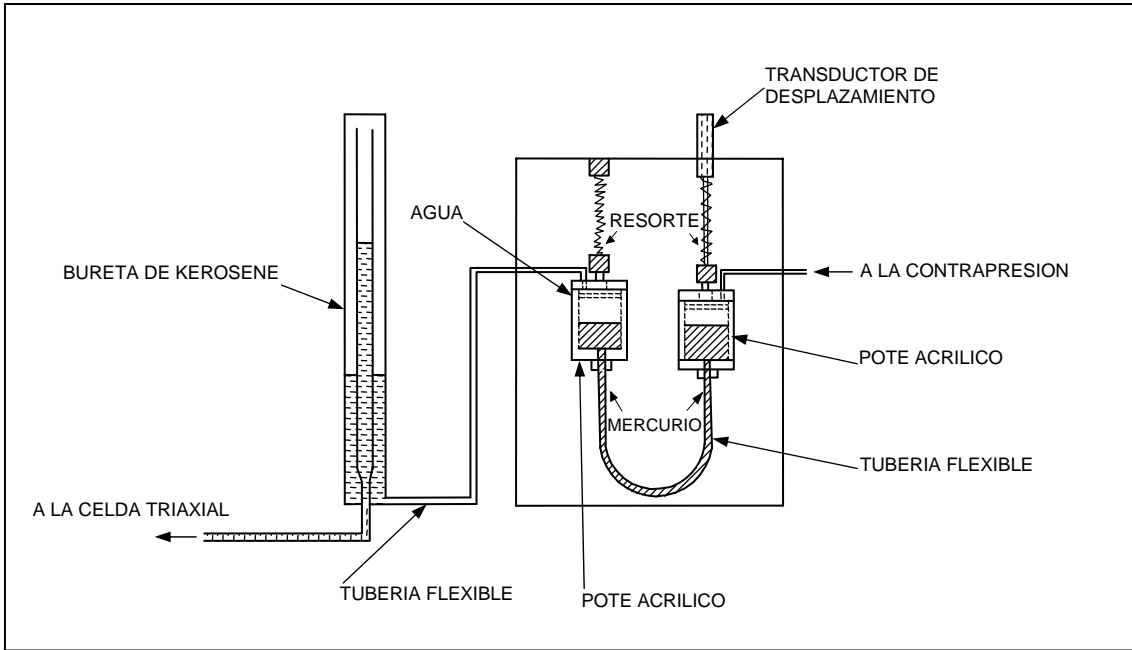


**Figura 8. Esquema de la Servobureta (Lewin, 1971)**

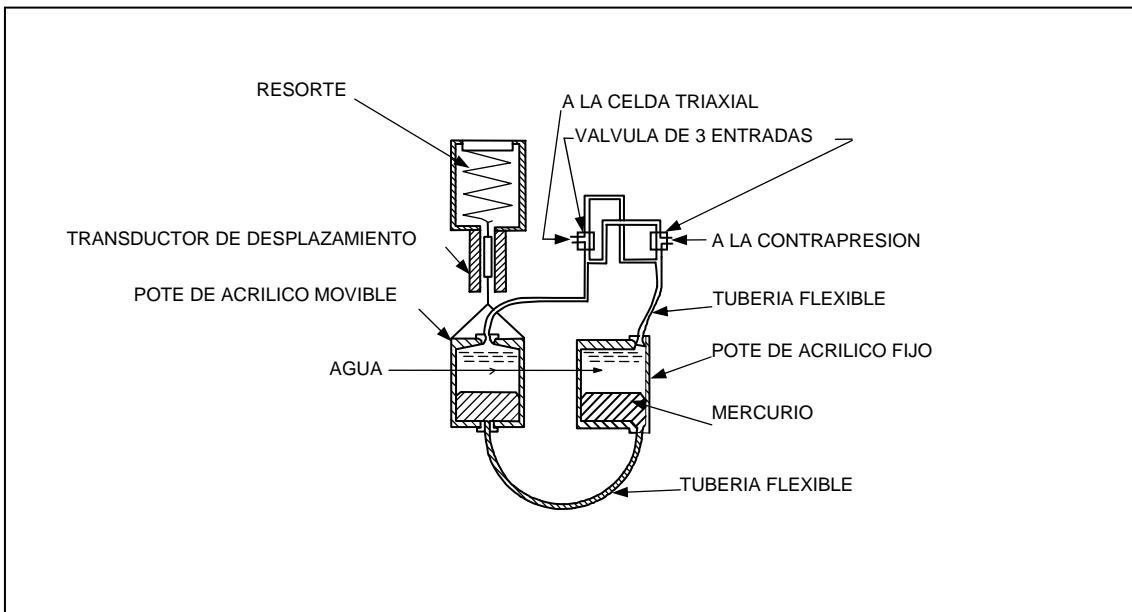


**Figura 9. Esquema del Servomecanismo Optico para la Medición del Cambio de Volumen (Watts, 1980)**

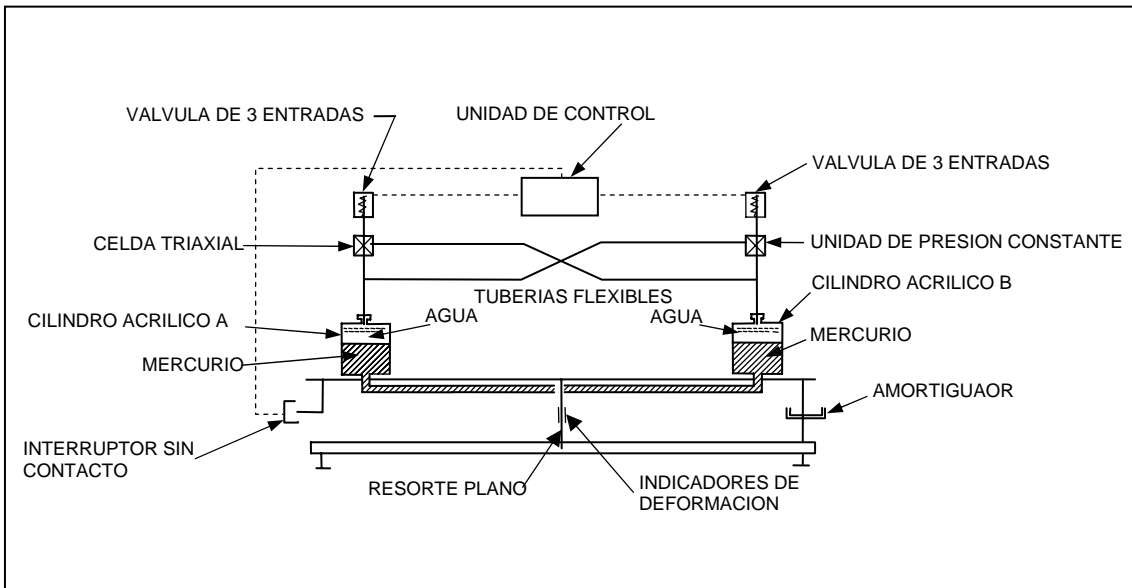




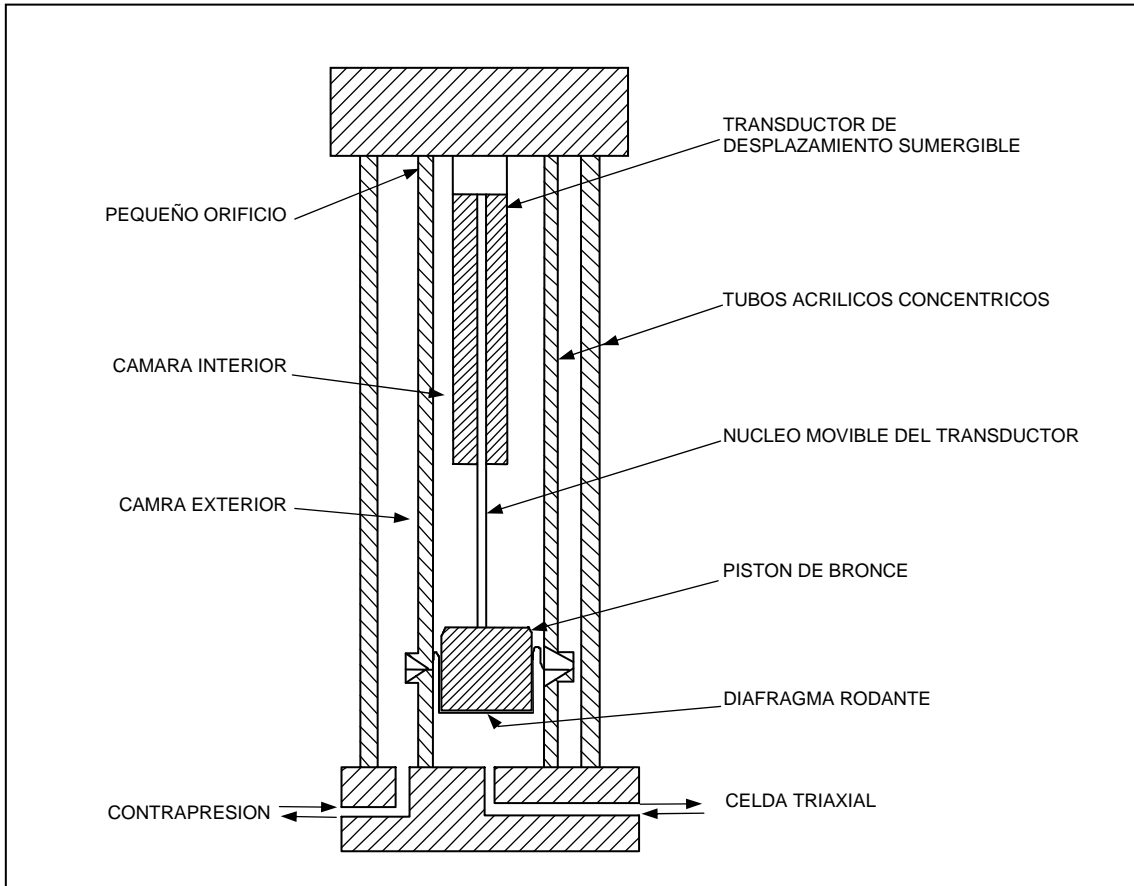
**Figura 10. Esquema del Sistema de Potes de Mercurio (Rowlands, 1972)**



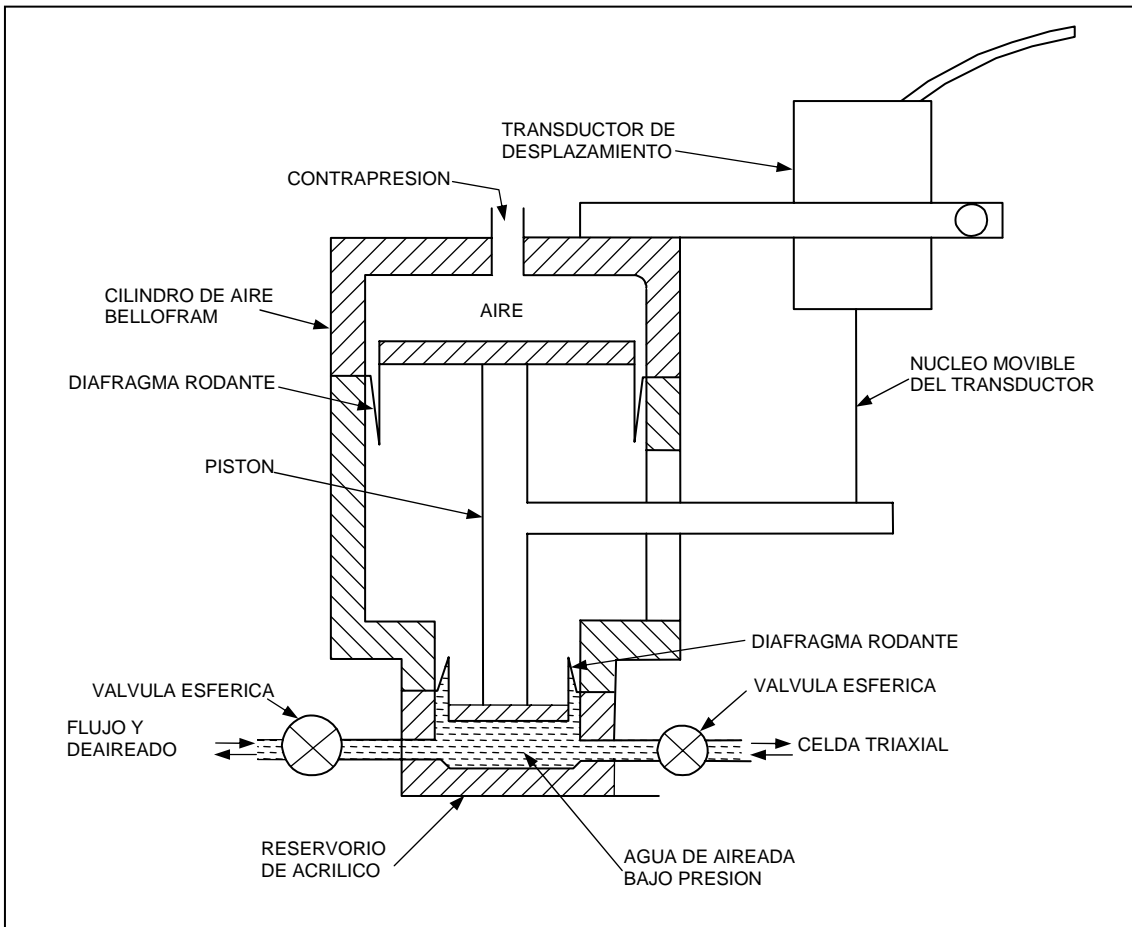
**Figura 11. Esquema del Sistema de Potes de Mercurio (Darley, 1973)**



**Figura 12. Esquema del Sistema de Potes de Mercurio Tipo Palanca  
 (Klementev, 1974)**



**Figura 13. Esquema del Aparato de Cambio Volumétrico Tipo Menzies  
(Menzies, 1975)**



**Figura 14. Esquema del Aparato de Cambio Volumétrico Tipo Martín  
(Hadge, 1979)**