

# MÉTODOS DE APLICACIÓN DE LA PRESIÓN DE CONFINAMIENTO

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

## **Presión Directa de Gas**

Cuando el fluido de la celda es gas, es posible presurizar la celda muy rápidamente, pudiendo mantenerse con exactitud durante cualquier período de tiempo deseado mediante válvulas reguladoras de aire. Las válvulas reguladoras mantienen la presión de celda deseada, independientemente de las fluctuaciones en la línea de presión, siempre y cuando el flujo a través del regulador no exceda algún límite conocido y la presión de la línea de entrada no caiga a valores muy bajos. Usualmente se obtienen presiones de hasta 100 libras/pulgada<sup>2</sup> (7 kg/cm<sup>2</sup>) de los compresores de aire industriales estándar. Presiones mayores se pueden obtener utilizando compresores de aire de alta presión, intensificadores neumáticos o aire comprimido en botellas. Existen reguladores de aire que para presiones por debajo de 125 lb/pulg<sup>2</sup> (8.75 kg/cm<sup>2</sup>) son capaces de mantener la presión constante dentro de  $\pm 0.1$  lb/pulg<sup>2</sup> (0.007 kg/cm<sup>2</sup>). Si existe disponible un regulador de aire en el laboratorio, el resto del aparato cuesta menos que cualquier otro método para aplicar la presión de confinamiento. Además, el buje puede ser un buje de bolas de baja fricción con un sello suelto "o-ring", que causará fricción despreciable. Se tolera la fuga de aire a través del sello, ya que no causa dificultades.

Desafortunadamente, el uso de presiones directas de gas tiene grandes problemas. En primer lugar, el gas se fuga rápidamente a través de las membranas de plástico. No existe manera de obtener datos de cambio volumétrico para ensayos UU (Q) en suelos parcialmente saturados. Adicionalmente, existe un peligro serio de explosión de la celda triaxial. Por lo anterior, la presión directa de gas raramente se utiliza.

## **Presión de Gas sobre Agua en la Celda**

Una variación relativamente simple de la técnica de la presión directa de gas, es llenar la celda de agua hasta aproximadamente 0.25 pulgadas (0.64 cm) del tope superior y después aplicar presión de gas en esta zona. Casi todas las ventajas de la presión directa de gas se mantienen. El peligro de daño serio resultante por explosión se reduce, debido a la mucha menor cantidad de aire en la celda. Una malla de alambre puede colocarse alrededor de la parte superior de la celda para protección

adicional, o la parte superior de la pared plástica de la celda puede ser cubierta con cinta de fibra de vidrio. Desde que el gas no está en contacto directo con la membrana, la fuga de gas debe ser por difusión, que requerirá normalmente para manifestarse por lo menos un día. Este método es ideal para ser utilizado en ensayos UU (Q) en arcillas saturadas, o cuando no se requieran mediciones de cambio de volumen.

Un esquema de este sistema se muestra en la Fig. 1. Se dispone de dos manómetros de presión tipo Bourdon y dos válvulas reguladoras de aire, para dos rangos de presiones diferentes. Uno de éstos, de gran utilización, tiene un rango bajo de 0-15 lb/pulg<sup>2</sup> (0-1 kg/cm<sup>2</sup>) y un rango alto de 0-125 lb/pulg<sup>2</sup> (0-8.75 kg/cm<sup>2</sup>). Si la fuente de presión es presión alta, por ejemplo botellas de nitrógeno, debería existir un regulador de bajada antes que la presión alcance el sistema mostrado en la Fig. 1. Cada manómetro de presión tiene una válvula de escape. Si se desea, cada manómetro puede ser provisto con una válvula de descarga que prevendría que el manómetro se sobrecargue. Es más simple igualar la capacidad del regulador con la capacidad del manómetro. Todas las válvulas de interrupción son del tipo estrangulamiento, por su comparativamente bajo costo y por el hecho que es más fácil saber de un vistazo si están abiertas o cerradas. Una válvula de tres direcciones conecta los dos sistemas de control de presión al tanque y a la celda triaxial. El tanque de almacenamiento puede ser de tubería plástica y placas superior e inferior de plástico, sin mucho temor de daños personales por explosión, porque el tanque puede montarse dentro de un recipiente cerrado, presentando solamente los manómetros y los manubrios de las válvulas. El tanque puede ser hecho de acero si el agua tiene un agente anticorrosivo. Las conexiones a la celda triaxial son tipo "conectores rápidos" por conveniencia.

### **Presión de Gas en Acumulador**

La presencia de aire en la celda triaxial puede eliminarse totalmente, mediante la presurización del agua en el tanque de la Fig. 1 hasta el valor deseado y no realizando la conexión aire-agua a la parte superior de la celda triaxial. Sin embargo, es más conveniente introducir un acumulador especial en el sistema.

El acumulador utilizado en la Universidad de California en Berkeley se muestra en la Fig. 2 (Seed, Mitchell y Chan, 1960). Cuando se utilice con el sistema de la Fig. 1, el acumulador debería ser introducido entre la válvula 7 y el conector rápido 8. Un sistema de desviación debe existir para el llenado y vaciado de la celda y para volver a llenar el acumulador si se agota su capacidad durante el ensayo. Cuando se utiliza en esta manera, pueden introducirse aparatos de cambio volumétrico en el sistema, entre el acumulador y la celda.

## **Método Geonor**

En el método Geonor (Andresen, Bjerrum, DiBiagio y Kjaernsli, 1957), la presión en la celda se desarrolla por la aplicación de pesos muertos a un pistón que entra a una celda de presión llena de aceite y agua (Fig. 3). Un aceite no-emulsificante flota en el agua de la celda y sirve para lubricar el pistón y reducir la fuga. El agua al fondo de la celda de presión está conectada a la celda triaxial a través de un sistema adecuado de válvulas y tuberías (Fig. 4). La celda de carga utiliza un pistón de aproximadamente  $2 \text{ cm}^2$  de sección transversal, por lo que se pueden desarrollar presiones de hasta  $8 \text{ kg/cm}^2$  con cargas de aproximadamente 16 kg.

La mayor ventaja del aparato Geonor sobre los otros tipos de aparatos es que utiliza muy poca altura del local de laboratorio (a diferencia del aparato de mercurio a ser discutido después) y no requiere la compra de un compresor de aire y la instalación de líneas de aire. Cuando la celda de carga está apropiadamente alineada en la dirección vertical, la fricción en el buje es muy pequeña y puede eliminarse al causar que el pistón se desplace ligeramente cada día. De este modo, la presión constante puede mantenerse por períodos de tiempo largos. Cuando se utilizan presiones específicas en los ensayos, los pesos se fabrican para producir precisamente dicha presión y cuando se colocan en el sistema colgante, se puede asegurar que se tiene la presión deseada.

El aparato también tiene desventajas. Si se tienen líneas de aire comprimido disponibles, será más barato utilizar un sistema de aire. Las celdas de carga tienen una capacidad volumétrica relativamente pequeña, de modo que es necesario bombear agua dentro del sistema periódicamente, para evitar que el pistón llegue al fondo de la celda. El aceite fuga lentamente del buje y se acumula en una cubeta especial. Si el área del laboratorio tiene polvo, el polvo se introducirá en el aceite. Si se utiliza aceite de lubricación normal, se emulsificará con el agua y formará una goma blanca que debe ser limpiada. Este aparato no puede operar tan rápido como el equipo operado con aire, en la preparación de un ensayo. Esta lentitud es una desventaja importante si se realiza un gran número de ensayos UU (Q) con tiempos de ensayo cortos, pero es insignificante en los ensayos CU y CD (R y S) que son más largos.

## **Método Imperial College**

En el Imperial College, Bishop y Henkel (1953) desarrollaron el “aparato de control de mercurio auto-compensante” (Fig. 5) para aplicar la presión de celda; ésta se aplica con la carga estática de una columna de mercurio. El mercurio se mantiene en “potes” que se cuelgan de resortes. La presión se desarrolla elevando los pots en la pared mediante una guía, hasta que se alcance la presión deseada. El mercurio del pote que

se eleva se transporta en tubería flexible hacia abajo, al piso, donde entra por la base de un pote similar que sirve como acumulador. En este pote el agua flota sobre el mercurio. El agua a presión pasa a través de otra tubería flexible a un panel de control que contiene las válvulas y manómetros necesarios, y de allí a la celda triaxial. Cuando una muestra se consolida, un volumen igual de mercurio sale del pote móvil. Esto causa que el pote pierda peso y que el resorte calibrado levante el pote de tal modo que la carga permanezca constante. Cuando todo el mercurio ha salido del pote móvil, éste se rellena invirtiendo la dirección del flujo y bombeando agua dentro del sistema mediante un cilindro hidráulico. Para presiones más altas de las que pueden lograrse con la carga de mercurio del piso al techo, se utilizan potes adicionales en serie. Con alturas de piso a techo de 3.5 a 4.0 metros, se pueden lograr presiones de 3.5 a 4.0 kg/cm<sup>2</sup> por cada columna de mercurio de piso a techo.

Las ventajas y desventajas del sistema de mercurio son similares a aquellas del sistema Geonor. El sistema de mercurio puede mantener presiones constantes por períodos largos y mantenimiento mínimo. Se puede utilizar cuando no existe aire comprimido. Es más lento que los sistemas de aire y es mucho más frágil, de modo que se considera más un sistema de investigación que un sistema comercial. Además, requiere alturas de carga considerables. Sin embargo, debe indicarse que este sistema ha sido utilizado con presiones tan altas como 70 kg/cm<sup>2</sup> (Bishop, Webb y Lewin, 1965).

### **Sistemas Hidráulicos**

Varios sistemas hidráulicos se utilizan para el desarrollo de presiones en el rango de 14 kg/cm<sup>2</sup> hasta 7000 kg/cm<sup>2</sup>. Los equipos utilizados en tales ensayos son comparativamente costosos; las muestras consolidadas a tales presiones son probablemente rocas (lutitas).

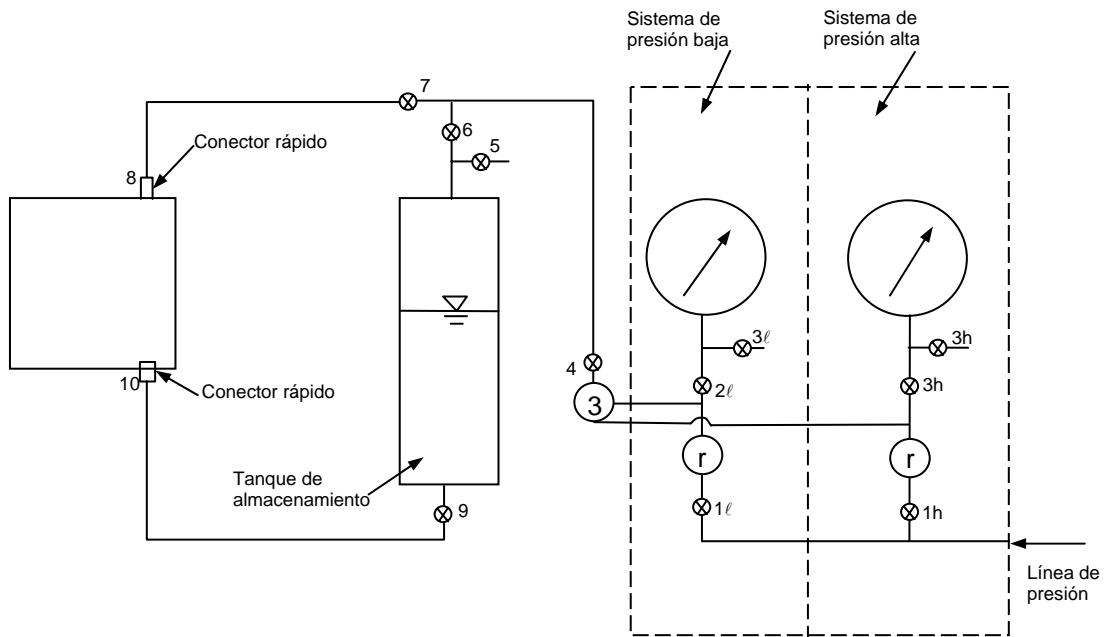
Con propósitos de ensayos en suelos, los sistemas que utilizan aire comprimido y acumulador son convenientes para presiones de hasta 70 kg/cm<sup>2</sup>. El único sistema hidráulico de uso común en ensayos de suelos consiste en una variación del calibrador hidráulico de manómetros tipo Bourdon. Este consiste de un pistón de acero de diámetro pequeño que se desliza en un buje recto. Se aplican pesos estáticos en la cima del pistón, para desarrollar la presión de aceite deseada por debajo. El aceite está conectado a un acumulador que usualmente es un cilindro de acero que contiene una membrana de goma que separa, por un lado el aceite y por el otro el agua. El agua va hacia la celda triaxial. El aceite también va a una bomba hidráulica. Cuando se aplica una fuerza al pistón, éste se asienta rápidamente (la capacidad volumétrica del aparato es pequeña) y una proyección en la parte superior del pistón golpea un interruptor límite que enciende la bomba hidráulica. El aceite es bombeado hacia el sistema hasta que el pistón se eleva hasta su límite superior de recorrido, donde

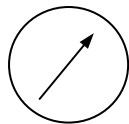




golpea otro interruptor límite que apaga la bomba. El aceite que fuga alrededor del pistón se recircula a la bomba. La bomba, la tubería y el pistón están diseñados de tal modo que son compatibles con las características de cambio de volumen de la muestra y la celda triaxial. Así, la celda puede ser bombeada a su capacidad en un período de tiempo razonable; sin embargo, la bomba no se enciende y apaga muchas veces durante el tiempo en que la presión de celda se mantiene constante.

Otros sistemas utilizan intensificadores neumáticos o hidráulicos, donde un pistón de gran diámetro está conectado mecánicamente a un pistón de diámetro menor. La aplicación de una presión en la cara del pistón grande, como con el aire comprimido o la presión hidráulica, produce una fuerza igual al producto de la presión y el área del pistón. Esta fuerza se transmite mecánicamente al pistón de menor diámetro. Para que ocurra equilibrio, la presión desarrollada en el fluido en contacto con el pistón de menor área debe ser mayor que la presión inicialmente aplicada al pistón más grande, es decir, la presión se ha intensificado. Con equipo adecuado con interruptores límites, válvulas solenoides y transductores de presión, se pueden fabricar aparatos para intensificar líneas de presión normal de  $7 \text{ kg/cm}^2$  a rangos de presiones altas.

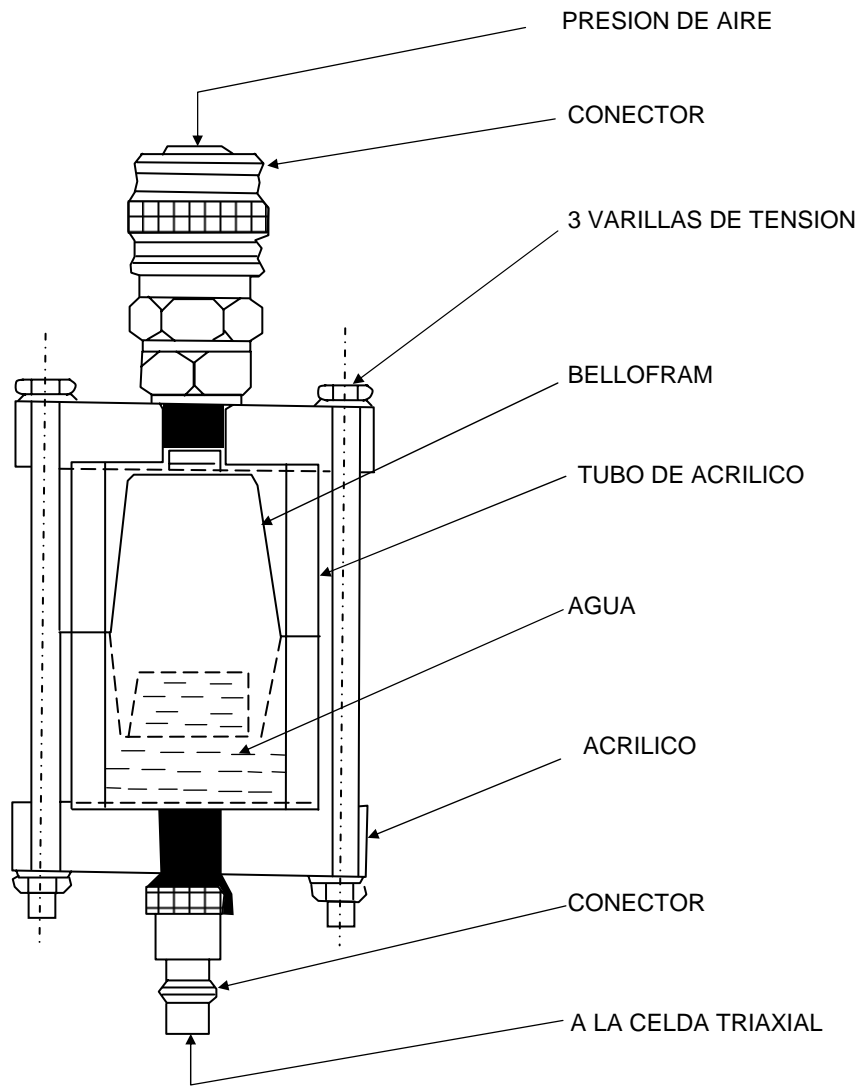
## REFERENCIAS

- 1) Andresen A., Bjerrum L., DiBiagio E. y Kjaernsli B. (1957), "Triaxial Equipment Developed at the Norwegian Geotechnical Institute", Oslo. Publication 21.
- 2) Bishop A.W. y Henkel D.J. (1953), "Pore Pressure Changes during Shear in Two Undisturbed Clays", Proc. 3<sup>rd</sup>. International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. I, pp. 94-99.
- 3) Bishop A.W., Webb D.L. y Lewin P.I. (1965), "Undisturbed Samples of London Clay from the Ashford Common Shaft: Strength – Effective Stress Relationships", Geotechnique, Vol. 15, pp. 1-31.
- 4) Seed H.B., Mitchell J.K. y Chan C.K. (1960), "The Strength of Compacted Cohesive Soils", ASCE Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils, University of Colorado, Boulder, pp. 877-964.



-  Manómetro de presión Bourdon
-  Válvula reguladora de aire
-  Válvula de tres direcciones
-  Válvula interruptora
-  Conector rápido

**Figura 1. Sistema Simple Operado con Aire para Aplicar Presión de Confinamiento**



**Figura 2. Acumulador con Sello Bellofram (Seed, Mitchell y Chan, 1960)**



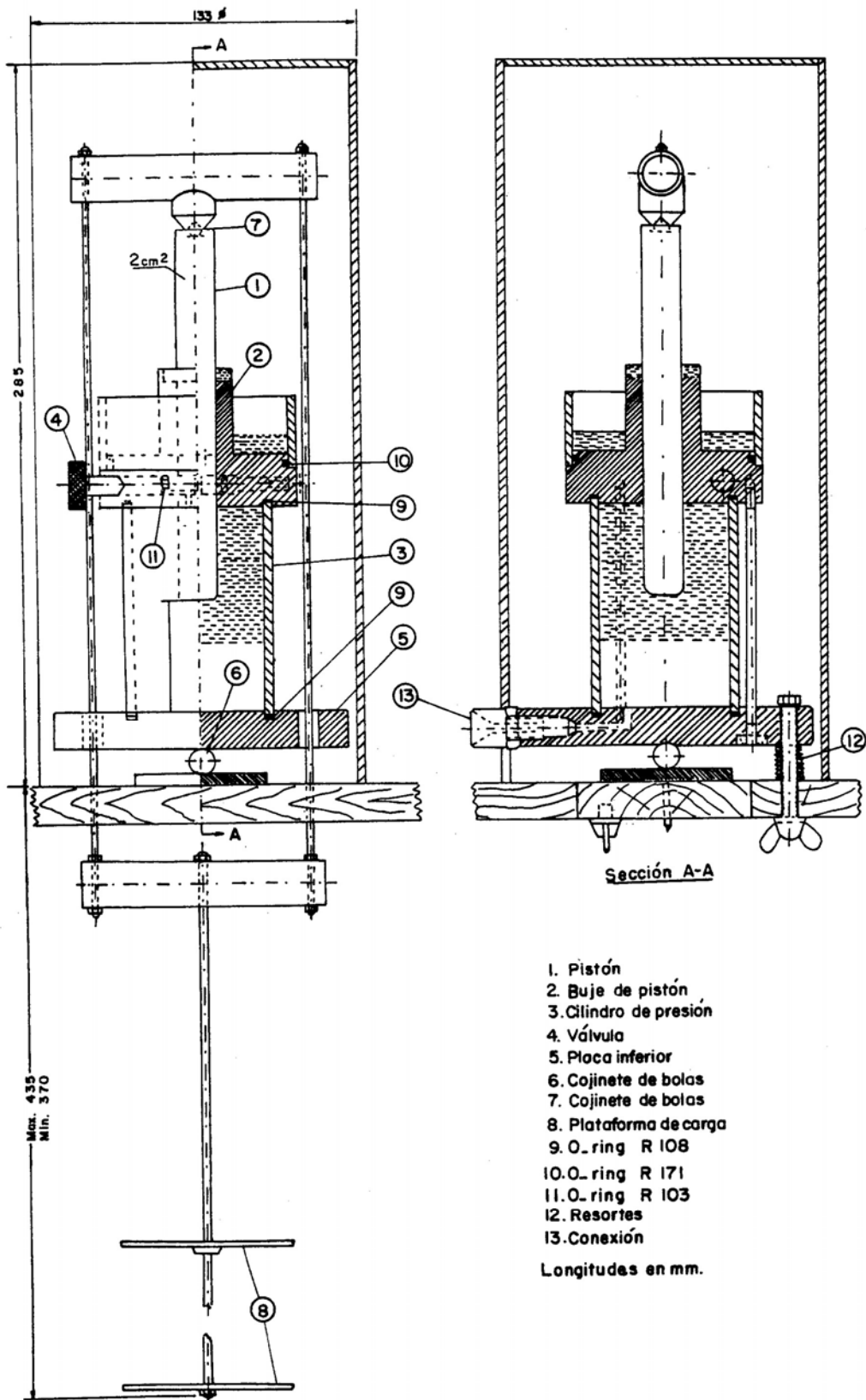


Figura 3. Celda de Presión Constante  
( Andresen, Bjerrum, DiBiagio y Kjaernsli, 1957)

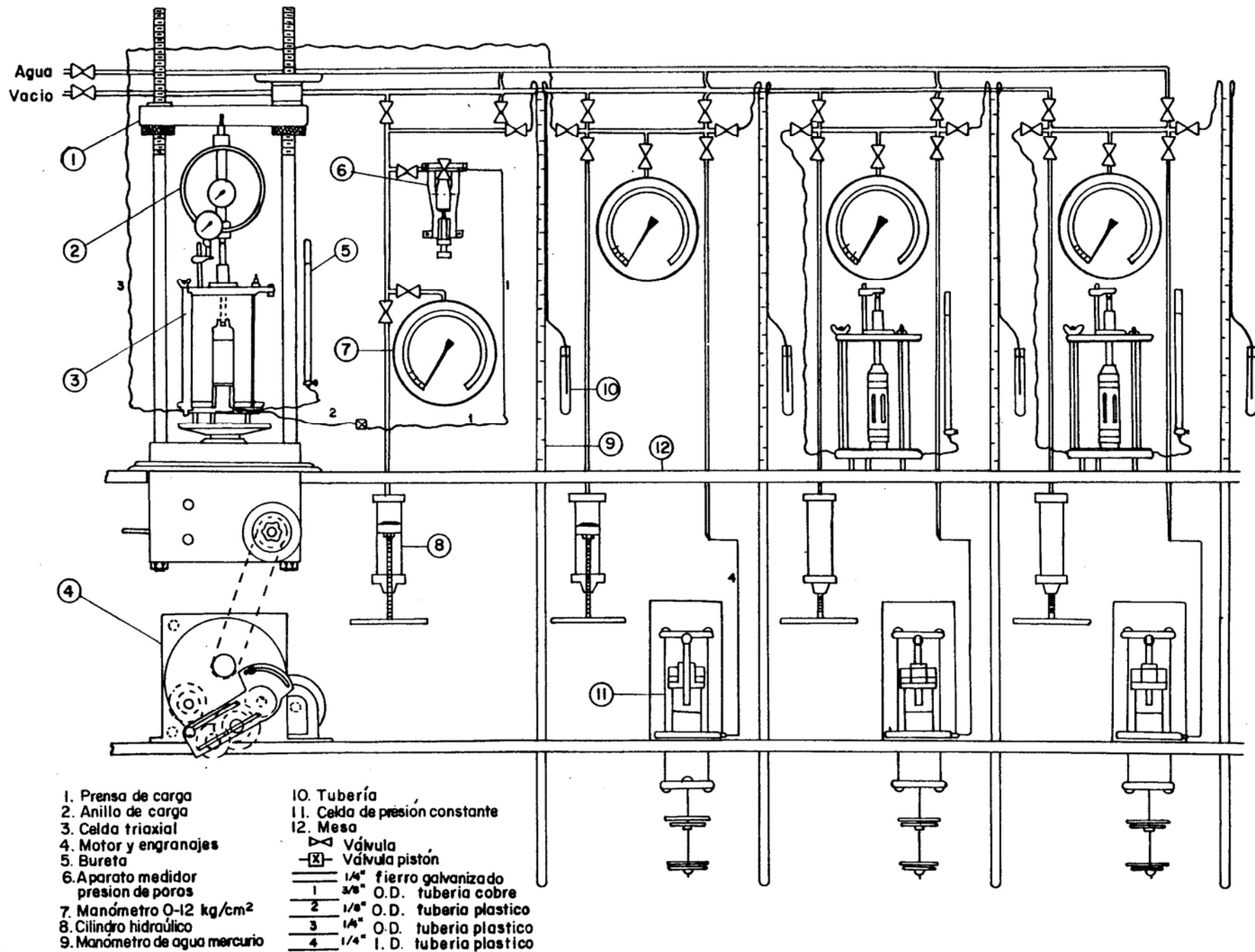


Figura 4. Aparato Triaxial con Celdas de Presión Constante (Andresen, Bjerrum, DiBiagio y Kjaernsli, 1957)

4

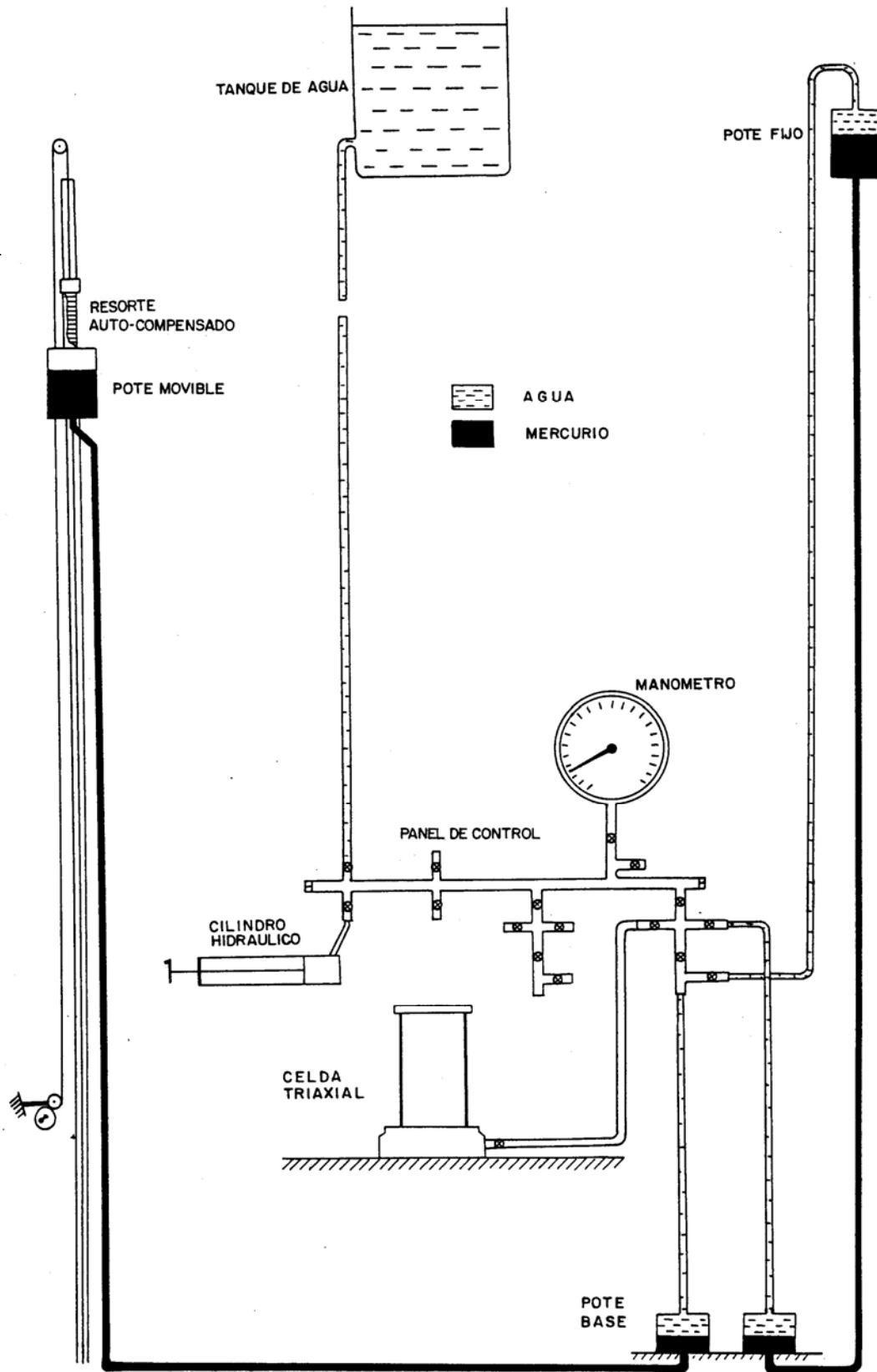


Figura 5- Sistema de Potes de Mercurio Auto-Compensantes