



Avances en el ensayo de suelos con succión bajo presión atmosférica

Fecha de entrega: 7 de Agosto 2008
Fecha de aceptación: 12 de Noviembre 2008
Pág. 5 - 12

Rafael Monroy¹, Apiniti Jotisankasa², Andrew Ridley³, Lidija Zdravkovic⁴ y Mathew Coop⁵

¹Ramboll Whitbybird, Londres, Reino Unido (anteriormente en Imperial College London)

²Kasetsart University, Bangkok, Tailandia (anteriormente en Imperial College, London)

³Geotechnical Observations, Londres, Reino Unido, andrew@geo-observations.com

⁴Imperial College London, Reino Unido, m.coop@imperial.ac.uk,

⁵Imperial College London, Reino Unido l.zdravkovic@imperial.ac.uk

En las dos últimas décadas se han realizado importantes avances en el estudio del comportamiento de suelos con succión. Normalmente, la succión se asocia a suelos no saturados, aunque es posible medir succiones en suelos saturados, sobre todo en arcillas. Dichos avances han venido dados en gran medida por la disponibilidad reciente de equipo de laboratorio que ha permitido la medición y control de la succión de un modo fiable. En este manuscrito se presentan una serie de innovaciones técnicas y desarrollo de equipo de laboratorio específicos para el ensayo de suelos con succión bajo presiones atmosféricas. Se describe el trabajo realizado en el Imperial College London en este campo, donde se han llevado a cabo estudios en el comportamiento mecánico de estos suelos desde la década de los sesenta. El progreso realizado en el campo de la experimentación abre las puertas a la posibilidad de realizar estudios detallados y sistemáticos aplicables a la solución de problemas prácticos dentro de la ingeniería geotécnica.

The past two decades have witnessed important developments in the study of the behaviour of soils having suction. Usually, suction is associated with soils in a state of partial saturation; however, this is not a limiting condition, since it is possible to measure suctions in fully saturated soils, particularly in clays. Such developments are primarily the consequence of the current availability of laboratory equipment which allows the reliable measurement and control of suction in a sample. This manuscript presents a number of technical innovations and laboratory equipment developed specifically for the testing of soils with suction under atmospheric pressures. The work herein presented has been carried out at Imperial College London, where studies on the subject date back to the sixties. The advances made in the field of soil testing open the possibility of carrying out detailed and systematic studies with direct application to the solution of practical geotechnical problems.

Palabras Claves: succión, suelos no saturados, tensiómetro, equipo de laboratorio, edómetro, celda triaxial, sistema osmótico.

Keywords: suction, unsaturated soils, tensiometer, laboratory equipment, oedometer, triaxial cell, osmotic system.

INTRODUCCIÓN

En un suelo saturado, la presión del agua de poro juega un papel determinante en el comportamiento mecánico. La respuesta de una agregación de partículas en un estado saturado, sometida a un esfuerzo externo σ y en la que el fluido que ocupa los poros presenta una presión hidrostática u viene dada por la diferencia $\sigma - u$, conocida como el esfuerzo efectivo. Según Terzaghi (1936), todo cambio de volumen, forma, o resistencia al corte que experimenta un suelo saturado viene dado exclusivamente por variaciones en el esfuerzo efectivo. Dicha presión del agua de poro corresponde a la presión hidrostática medida a través de un elemento poroso que hace contacto con el suelo. Puede ser ésta positiva o negativa, dependiendo de si su valor es superior o inferior a la presión atmosférica. Cuando la presión del agua de poro toma valores negativos

se la conoce como succión. El agua de poro que se encuentra bajo la capa freática se encuentra bajo presión hidrostática positiva, mientras que aquella que, por efecto capilar, se encuentra por encima de esta capa, se encuentra en un estado de tensión (succión). En un suelo no saturado, en el que el espacio de poro entre las partículas está ocupado por fluido y gas (agua y aire en la mayoría de los casos), la presión del agua de poro es siempre negativa.

En estos suelos, dicha presión juega también un papel fundamental. Es necesario en estos casos, sin embargo, separar el efecto de las tensiones externas de aquel producido por el agua de poro (Jennings & Burland, 1962). En dichos suelos se admite que una sola variable de estado no es suficiente para definir el estado de esfuerzos, siendo necesarias al menos dos variables para definir el estado tensional.

Normalmente se toma la presión neta, representada por $(\sigma - u_a)$, o sea, la diferencia entre el estado de tensiones externo y la presión del aire de poro. La succión s está definida como la diferencia entre la presión de aire y la presión de agua de poro, $s = u_a - u_w$. De lo anterior se desprende que una gran cantidad de los suelos con los que se encuentra y tiene que tratar el ingeniero presentan un estado de tensiones de agua de poro inferior a la presión atmosférica.

Esto contrasta con el hecho de que en la mayoría de los casos estudiados en la Mecánica de Suelos clásica, la presión del agua de poro se ha tomado como positiva. En gran parte esto es debido a que los terrenos saturados que se encuentran por debajo del nivel freático son abundantes en los países desarrollados de clima templado, como se han apuntado en repetidas ocasiones en la literatura. Sin embargo, también es cierto que la medición de presiones hidrostáticas positivas resulta mucho más fácil que la medición de succiones.

A falta de medios para el estudio de suelos con succión, se ha considerado – sobre todo para suelos no saturados – el estado saturado a la hora de realizar una predicción del comportamiento del material. Como indica Alonso & Lloret (1985), esto es justificable ya que la condición de saturación total tiende a ser la pésima y es previsible en el curso de la vida de las cimentaciones, terraplenes, presas o laderas. Sin embargo, como también mencionan dichos autores, en muchas ocasiones no es solo interesante predecir el comportamiento del material en este estado saturado, sino que es importante conocer las deformaciones que vienen asociadas a los cambios de humedad que se han producido en el suelo desde su estado inicial hasta el supuesto caso de saturación.

La dificultad a la hora de medir y controlar la succión en el laboratorio es quizás el principal motivo por el que la Mecánica de Suelos con succión - saturados o no saturados - no ha avanzado al ritmo que lo ha hecho la Mecánica de Suelos saturados. Si la Mecánica de Suelos requiere la aplicación del método experimental a los problemas del terreno, ya que es solo a partir de un experimento que se puede verificar la validez de una idea, es fácil ver como la carencia de técnicas en el laboratorio ha afectado el progreso en la materia. En las dos últimas décadas se han realizado avances importantes en el desarrollo de técnicas para el control y medición de la succión. Dichas técnicas están descritas, por ejemplo, en Ridley & Wray (1996), Agus & Schanz (2005), Rahardjo & Leong (2006), o más recientemente en Delage *et al* (2008). Cada una de las técnicas tiene sus ventajas y desventajas, así como su campo de aplicación. Todo ello debido a la variedad de materiales que pueden presentar succión, así como al amplio rango de succiones que puede presentar un suelo.

Es por ello que en la actualidad no hay un solo método universal que se pueda aplicar en el laboratorio para el ensayo de suelos con succión.

El objetivo de este artículo es presentar el avance que se ha realizado en los últimos años en el Imperial College, en el desarrollo de técnicas de control y medición de succión en el laboratorio para el ensayo de muestras con valores medios de succión (no superiores a 1MPa) bajo condiciones atmosféricas. El Imperial College London lleva estudiando el comportamiento de suelos no saturados desde la década de los 60.

EL PROBLEMA DE LA MEDICIÓN Y CONTROL DE SUCCIÓN

Una de las primeras técnicas utilizadas para medir y controlar succiones superiores a los 100 kPa, y que todavía se usa de forma extensa, se conoce como la técnica del “traslado de ejes”. Se fundamenta ésta en la hipótesis de que al incrementar de forma artificial la presión atmosférica que rodea a una muestra, la presión negativa del agua de poro aumenta en la misma proporción. De este modo, la succión en la muestra – dada por la diferencia entre la presión del aire de poro, u_a , y la presión del agua de poro, u_w – permanece inalterada. Si se incrementa la presión de aire hasta el punto en el que la presión del agua pasa a ser positiva, es posible medir ésta última de modo convencional (Hilf, 1956). Dicha técnica, aunque relativamente sencilla de aplicar, no está exenta de problemas, tanto técnicos como teóricos. No solo es necesario que la fase de aire sea continua en la muestra para que se cumpla la hipótesis anterior - lo que no ocurre, por ejemplo, en arcillas con un grado de saturación superior al 85% - sino que además el rango de succiones que se pueden medir queda limitado por la capacidad del equipo de generar presiones de aire suficientemente elevadas.

Desde el punto de vista teórico, el aumento de la presión de agua puede afectar el proceso físico de la entrada y salida de aire en solución (Burland & Ridley, 1996). Así mismo, al mantener la presión del agua de forma artificial por encima de la presión atmosférica, se evita la cavitación del fluido (Baker & Frydman, no publicado). En arcillas saturadas Bishop *et al* (1975). han mostrado como al generarse presiones de poro negativas el agua puede cavitarse, lo que resulta en un marcado cambio en la respuesta mecánica del material. Otra faceta importante que no se puede estudiar con esta técnica es la transición de un suelo entre el estado saturado y no saturado, o viceversa. Es por todo lo anterior que se han buscado técnicas alternativas que permitan el ensayo de suelos bajo presiones atmosféricas, tal y como se encuentran en el terreno en su estado natural.



En lo que resta de este manuscrito se describen las técnicas desarrolladas para la medición y control independientes de la succión en suelos bajo estas condiciones, así como su incorporación a equipos convencionales de laboratorio

LA MEDICIÓN DE SUCCIÓN

La medición directa de succiones en suelos se suele realizar por medio de un tensiómetro convencional. En su forma más sencilla, éste consta de un elemento poroso, generalmente de material cerámico, conectado por un tubo a un manómetro (Figura 1). Tanto el tubo como el elemento poroso están llenos de agua. Al ponerse el elemento poroso en contacto hidráulico con el agua de poro en el suelo, el agua que llena el equipo tiende, tras un breve periodo de tiempo, a alcanzar un estado de equilibrio con el agua de poro. Al estar el agua dentro del aparato inicialmente a presión atmosférica, si el suelo presenta succión habrá una transferencia de agua del tensiómetro hacia el suelo hasta que se alcanza este estado de equilibrio. La presión hidráulica, por debajo de la presión atmosférica, medida en el manómetro da una indicación de la succión en el suelo. Por sus características físicas, sin embargo, este aparato no permite la medición de succiones superiores a los 100 kPa, aunque en la práctica su límite no supera los 80 kPa. Esto se debe a que en una columna de agua en un sistema macroscópico no se pueden mantener tensiones que exceden una atmósfera. Además de esto, el elemento poroso que se utiliza en los aparatos convencionales permite la entrada de aire en el equipo una vez que la tensión en el agua supera un cierto valor respecto a la presión atmosférica externa, normalmente no muy superior a los 100 kPa.

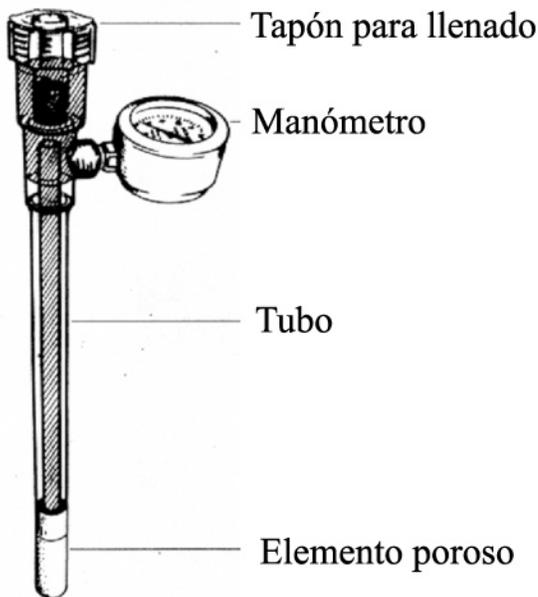


Figura 1: Componentes de un tensiómetro convencional (adaptado de James, 1988).

El comportamiento del tensiómetro convencional fue estudiado en detalle por Ridley (1993), quien presentó el primer prototipo de un tensiómetro de alta capacidad (high-capacity tensiometer, HCT, por sus siglas en inglés) que permitía la medición directa de succiones por encima de los 100 kPa (Ridley & Burland, 1993).

El segundo prototipo, conocido como el IC tensiometer (Ridley & Burland, 1995), se muestra en las Figuras 2 y 3.



Figura 2: Tensiómetro de alta capacidad de IC.

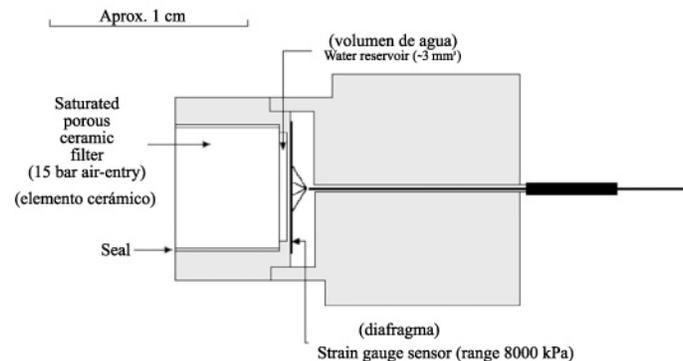


Figura 3: Sección del tensiómetro de alta capacidad de IC (adaptado de Ridley *et al.*, 2003).

Este tensiómetro de miniatura consta de los siguientes componentes:

- Un elemento cerámico que permite mantener una diferencia entre la presión externa y la presión del agua que llena el aparato de 1500 kPa.
- Un volumen de agua reducido, no superior a los 3 mm³.
- Un diafragma al que se le ha incorporado un extensiómetro de resistencia eléctrica.

Con este equipo ha sido posible medir directamente succiones de hasta 1500 kPa. Esto es debido a que si bien es cierto, en un sistema microscópico el agua no es capaz de mantener tensiones superiores a 100 kPa, si se reduce el volumen de agua suficientemente, se cuida el acabado de las paredes del receptáculo que contiene el agua, y se realiza la correcta saturación y presurización del equipo, es posible mantener el agua en un estado meta estable durante un tiempo prolongado (Ridley & Burland, 1999). Que el agua puede mantener continuidad bajo tensiones altas queda patente, por ejemplo, al observar los vasos de xilema en árboles de gran altura, como menciona Hillel (1998).

EL CONTROL DE LA SUCCIÓN POR OSMOSIS

El uso del fenómeno osmótico para la medición y control de la succión en suelos se lleva utilizando desde la década de los 60 (Zur, 1966; Peck & Rabbidge, 1966), aunque su aplicación al estudio de problemas geotécnicos es algo posterior (Kassiff & Ben Shalom, 1971).

Este sistema se basa en el hecho que al separar solvente y solución por medio de una membrana semi-impermeable, lo cual sólo permite difusión de moléculas de solvente, se produce un movimiento de moléculas de solvente hacia la solución (Figura 4). Este proceso continúa hasta que el sistema restablece un estado de equilibrio termodinámico, en el que el potencial químico a cada lado de la membrana se iguala.

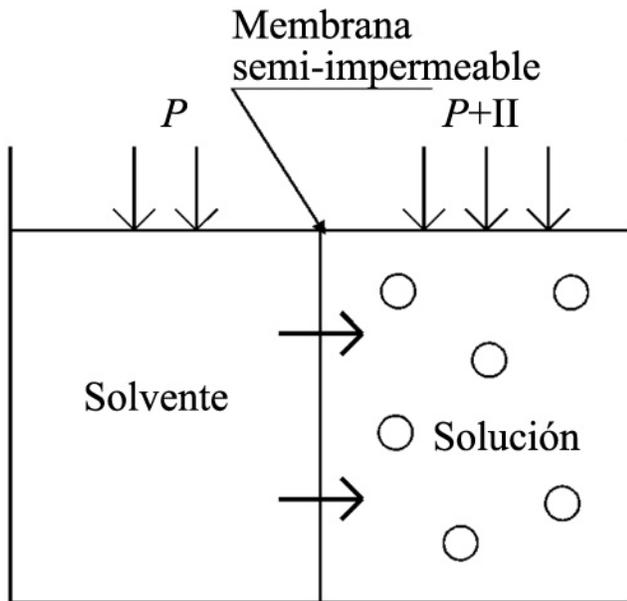


Figura 4: El fenómeno osmótico.

Si en vez de separar solvente de solución, se utiliza la membrana semi-impermeable para separar una solución del agua de poro en un suelo, es posible, por medio de la variación del potencial químico de la solución, el variar la succión en el suelo. Kassiff & Ben Shalom (1971) fueron los primeros en incorporar un sistema osmótico a un equipo de laboratorio. La Figura 5 muestra el edómetro original desarrollado por estos dos autores.

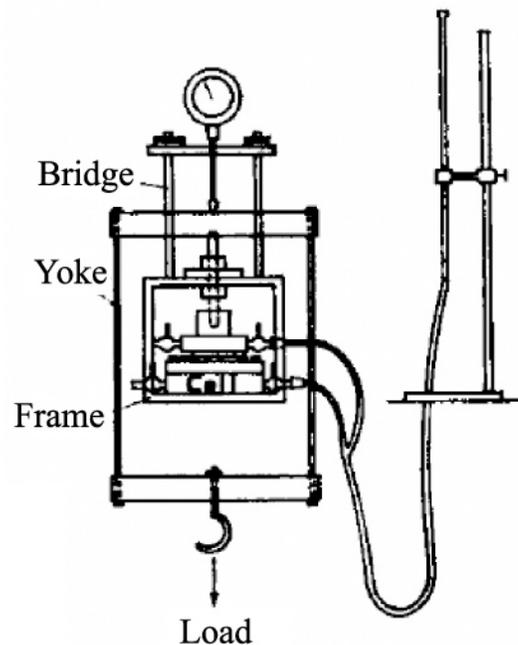
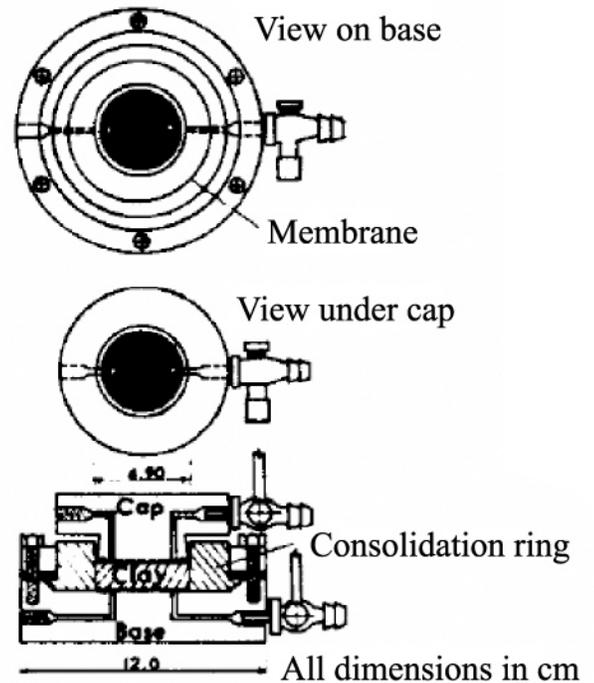


Figura 5: El edómetro osmótico de Kassiff & Ben Shalom (1971), tomado de Delage *et al.*, (2008).

El equipo que aparece en la Figura 5 fue adoptado y mejorado por sucesivos investigadores (Delage *et al.*, 1992; Dineen & Burland, 1995; Colmenares Montañez, 2002, Monroy, 2006). En su forma actual, el edómetro osmótico utilizado en los laboratorios de Imperial College es el que se muestra en las Figuras 6 y 7.

El equipo consta de las siguientes características:

- Se utiliza una solución de glicol polietilénico (PEG) mezclado con agua para el control de la succión en la muestra. Ésta se circula bajo la muestra por medio de una bomba peristáltica y un par de tubos de PVC.

- Se evita la evaporación de la solución osmótica por medio de una capa de aceite de silicona y una tapadera perforada (para permitir colocar los tubos de PVC).

- La entrada y salida de fluido de la muestra se mide en base a la variación del peso del recipiente que contiene la solución osmótica. El recipiente se coloca directamente sobre una balanza electrónica.

- Como elemento semi-impermeable se usa una membrana sintética de poliéster, que se coloca en la base del edómetro y hace contacto con la parte inferior de la muestra.

- En la parte superior de la muestra se mide la succión por medio de un tensiómetro de IC.

- El esfuerzo radial se mide por medio de cuatro diafragmas ortogonales integrados al anillo del edómetro. Este equipo permite medir, de forma automática y continua, la deformación volumétrica, esfuerzo axial, esfuerzo radial, grado de saturación y succión de la muestra.

EL CONTROL DE LA SUCCIÓN POR MEDIO DE AIRE

Este sistema es parecido en muchos aspectos al sistema osmótico. La diferencia reside en que el fluido que se circula bajo la muestra es aire seco y la membrana semi-impermeable se substituye por una piedra porosa.

Al circular aire seco a través de esta piedra porosa, es posible extraer humedad de la muestra de suelo y con ello aumentar su succión.

El sistema fue originalmente desarrollado por Cunningham (2000) para una celda triaxial. Jotisankasa (2005) lo adoptó y realizó algunas modificaciones al equipo original. Éste se presenta en las Figuras 8 y 9.

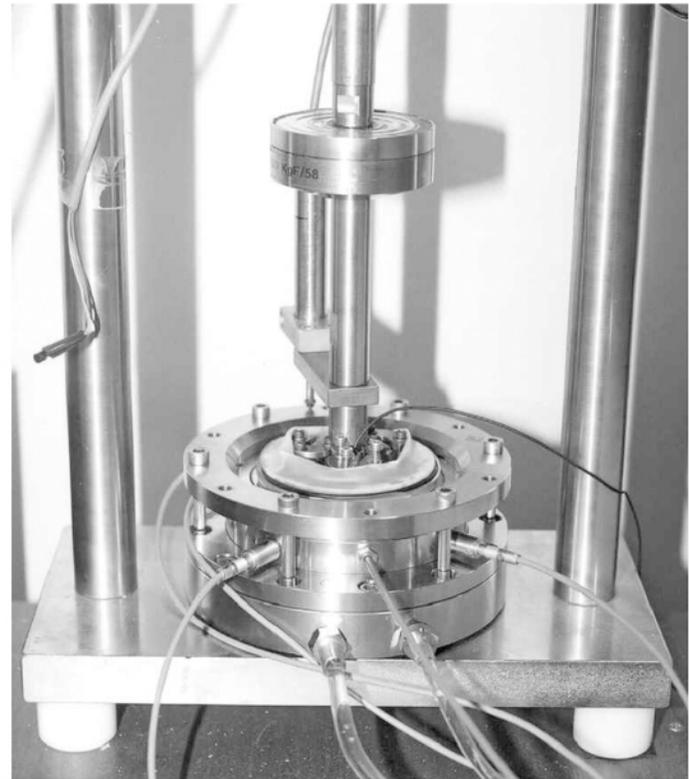


Figura 6: Edómetro osmótico disponible en los laboratorios de Imperial College.

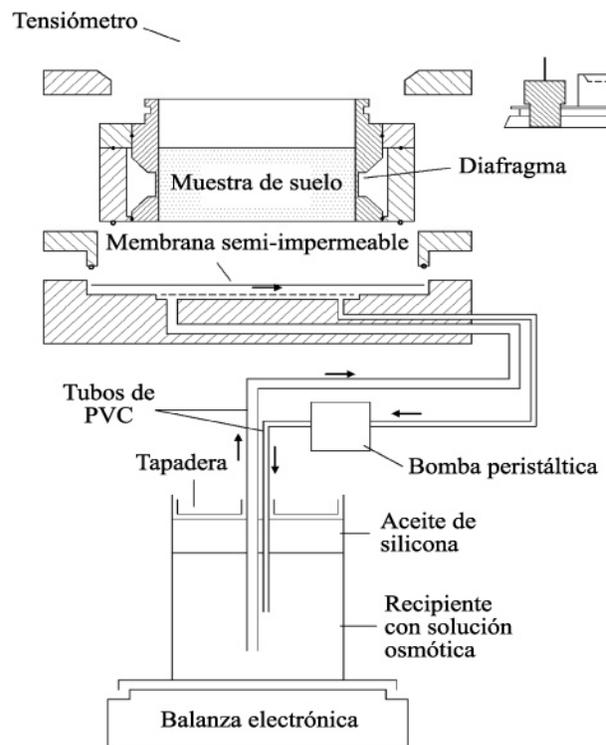


Figura 7: Esquema del odómetro osmótico (adaptado de Monroy *et al.*, 2007).



Figura 8: Celda triaxial con control de succión.

El equipo consiste en una celda triaxial del tipo Bishop & Wesley (1975) modificada. La succión se mide por medio de dos tensiómetros de IC colocados en el costado de la muestra. Con el fin de asegurar el buen funcionamiento de éstos, la celda se llena con glicerol, en vez de agua. La cantidad de agua que se extrae de la celda se realiza en base a la diferencia de humedad en el aire de entrada y salida de la piedra porosa. Para ello, el equipo incorpora un sensor de humedad en el tubo de salida de aire. El equipo que aparece en la Figura 9 permite realizar ensayos en muestras no saturadas en las que la succión se aumenta monótonicamente. Sin embargo, el sistema de circulación de aire no permite reducir la succión en una muestra. Para ello Jotisankasa (2005) tuvo que circular una mezcla de aire y agua por la parte superior de la muestra, por medio de tubos de PVC y una bomba peristáltica. Inicialmente, en el tubo que solo contenía aire se añadía una pequeña cantidad de agua, y la mezcla se circulaba con la bomba. Sobre la parte superior de la muestra se colocaba un papel de filtro que facilitaba la absorción del agua en la muestra. De este modo era posible reducir la succión de modo controlado. Midiendo la diferencia de agua dentro del tubo de PVC antes y después de la circulación, era posible calcular el volumen de agua absorbido. El equipo modificado se muestra en la Figura 10.

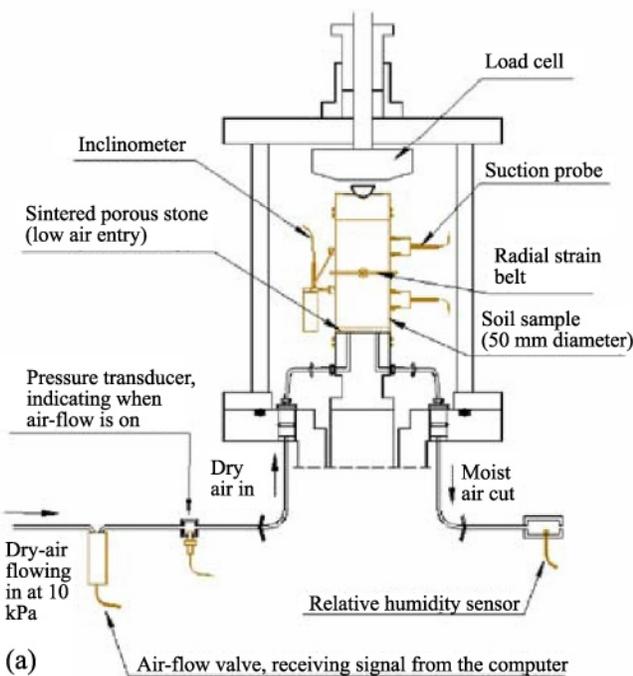


Figura 9. Esquema de la celda triaxial con control de succión por medio de circulación de aire (Jotisankasa *et al.*, 2007).

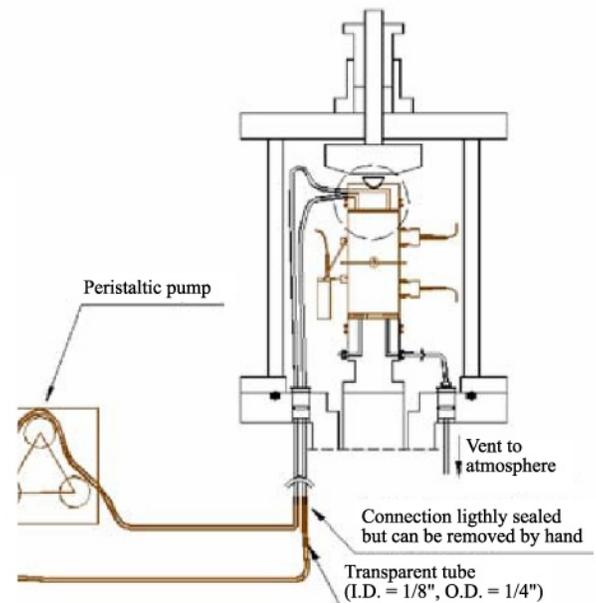


Figura 10. Esquema de la celda triaxial con control de succión por medio de circulación de aire y agua (Jotisankasa *et al.*, 2007).

Dado que la succión en la muestra se mide de forma independiente por medio de dos tensiómetros, es posible realizar ensayos con la celda triaxial mostrada en las Figuras 9 y 10 bajo condiciones de succión controlada. Por medio de un sistema automatizado es posible iniciar el proceso de secado o mojado de la muestra hasta que ésta alcanza la succión deseada.



Una vez logrado esto, el sistema, de forma automática se detiene hasta que se hace necesario volver a modificar la succión.

APLICACIONES

Los equipos descritos en los párrafos anteriores permiten el ensayo de suelos con succión de un modo que no era posible hasta ahora. La medición directa de succión por medio del tensiómetro de IC no solo está siendo utilizado en el laboratorio para la realización de programas experimentales, sino que ha encontrado un campo amplio de aplicación en la práctica geotécnica (Ridley *et al.*, 2003). Un ejemplo reciente del uso de este equipo, descrito en Hight *et al.* (2007), consistió en la medición de valores de K_0 en una arcilla preconsolidada. En este caso, se hicieron mediciones de succión en muestras tomadas con tubo de pared delgada. Asumiendo que no hay cambio de volumen al tomar la muestra y que el esfuerzo esférico efectivo permanece constante, es posible calcular con base en el valor del esfuerzo vertical efectivo y de la succión en la muestra, calcular el valor de K_0 . En la Figura 11 se muestran los valores obtenidos por este método en el Terminal 5 de Heathrow, así como valores estimados en muestras en bloque tomadas en la misma zona. Como muestra la figura 11, los valores obtenidos con ambos métodos se acercan mucho.

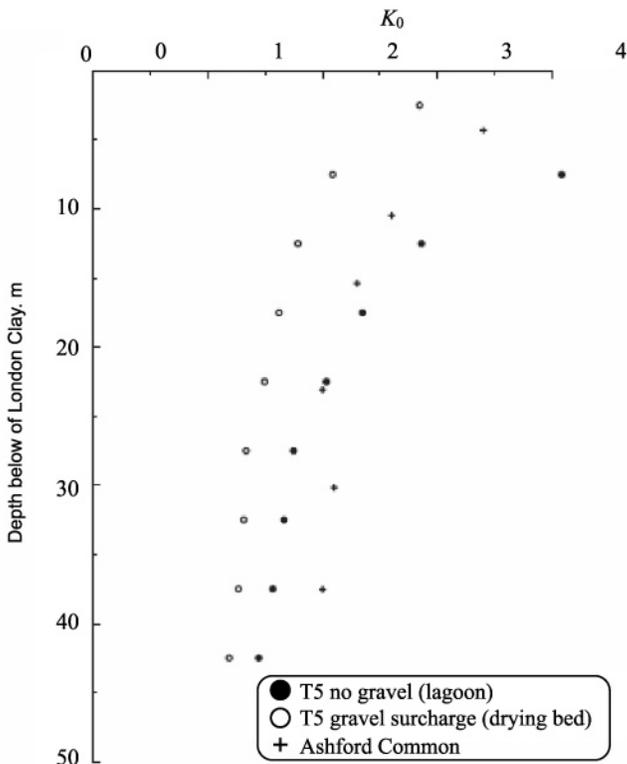


Figura 11. Perfil de K_0 estimado en base a mediciones de succión (Hight *et al.*, 2007).

El uso del edómetro y la celda triaxial permite aplicar a una muestra los cambios de carga y humedad que se prevén en el terreno. Así, por ejemplo, la Figura 12 muestra los resultados de ensayos realizados con el edómetro, en los que muestras de arcilla compactada fueron llevadas a diferentes valores de succión final por dos trayectorias de esfuerzos diferentes antes de ser cargadas a succión constante (Monroy *et al.*, 2008).

En tres de las muestras se redujo la succión del valor inicial de 1 MPa mientras se aplicaba una carga nominal de 7 kPa, permitiendo que la muestra aumentara en volumen, hasta alcanzar succiones de equilibrio de 0, 120, y 430 kPa.

En las tres muestras restantes el proceso de mojado se realizó bajo volumen constante hasta que las muestras alcanzaron succiones de 0, 120 y 405 kPa. En este último caso hubo que aumentar el esfuerzo vertical con el fin de poder mantener la condición de deformación volumétrica nula.

Como se ve en la Figura 12, el valor final de succión tiene un efecto importante en el volumen final alcanzado durante el hinchado inicial (compárese los volúmenes finales de la muestra que alcanza equilibrio a 430 kPa y al que alcanza equilibrio a 0 kPa). Así mismo es posible ver como la trayectoria de esfuerzos seguida en este caso, hinchamiento libre o volumen constante, no influye en la respuesta del material durante la fase de carga a succión constante.

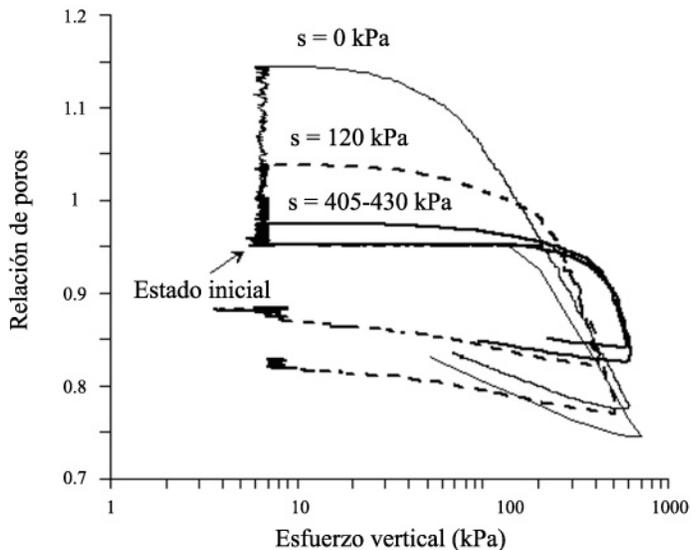


Figura 12. Curvas de carga-descarga asociadas con diferentes valores de succión y trayectorias de esfuerzos previo a la carga (adaptado de Monroy *et al.*, 2008).

CONCLUSIONES

El ensayo de suelos con succión, ya sea en estado saturado, o más comúnmente en estado no saturado, ha avanzado significativamente en las dos últimas décadas. Existe ahora a disposición del ingeniero geotécnico una amplia gama de técnicas para la medición y control de la succión en el laboratorio. Cada una de estas técnicas tiene sus ventajas e inconvenientes, y está más indicada para una aplicación determinada. En la actualidad la mayoría de los avances en la materia tienen aplicación directa en el laboratorio, aunque algunos de los equipos empiezan a ser incorporados a la práctica de la ingeniería geotécnica. En este manuscrito se han presentado, algunos de los equipos disponibles para el ensayo de suelos con succión bajo condiciones atmosféricas. Esto permite realizar ensayos bajo condiciones que se asemejan a las que se encuentra el suelo en su estado natural. Aunque en un estado de desarrollo avanzado, estos equipos, todavía presentan un grado de complicación superior al que presentan los equipos disponibles en laboratorios comerciales. Así mismo, las técnicas necesarias para la realización de un ensayo bajo succión controlada tienden a ser más complicadas. A todo esto hay que añadir el hecho de que el ensayo de suelos con succión, sobre todo si son finos y tienen un grado de saturación bajo, suele llevar bastante tiempo. Es por todo esto que todavía pase algún tiempo hasta que se puedan incorporar todos los equipos aquí descritos en laboratorios de suelos comerciales. A pesar de esto, se puede decir que en estos momentos las bases teóricas están asentadas y existen innovaciones prácticas robustas. El paso siguiente será la adopción de ambas por parte de la comunidad geotécnica.

REFERENCIAS

- Agus, S.S. & Schanz, T. (2005). Comparison of four methods for measuring total suction. *Vadose Zone J.* 4 (4): 1087-1095
- Alonso, E. & Lloret, A. (1985). Comportamiento de suelos parcialmente saturados. *Revista de Obras Públicas.* Mayo-Junio, 435 - 461
- Baker, R. & Frydman, S. No publicado. Unsaturated soils mechanics: critical review of physical foundations
- Bishop, A.W. & Wesley, L.D. (1975). A hydraulic triaxial apparatus for controlled stress path testing. *Geotechnique*, 25, 4, pp 657-670

- Bishop, A.W., Kumapley, N.K., & El-Ruwayih, A. (1975). The influence of pore water tension on the strength of clay. *Transactions of the Royal Society of London, Series A.*, 278: pp 511-555
- Burland, J.B. & Ridley, A.M. (1996). Keynote address: the importance of suction in soil mechanics. *Proceedings of the 12th Southeast Asian Geotechnical conference*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2, pp 27-49
- Colmenares Montañez, J.E. (2002). Suction and volume changes of compacted sand-bentonite mixtures. Ph.D. Thesis, University of London
- Cunningham, M.R. (2000). The mechanical behaviour of a reconstituted, unsaturated soil. Ph.D. Thesis, University of London
- Delage, P., Suraj de Silva, G.R.R. & Vicol, T. (1992). Suction controlled testing of non-saturated soils with an osmotic consolidometer. 7th International Conference on Expansive Soils, Dallas, Texas, pp 206-211
- Delage, P., Romero, E. & Tarantino, A. (2008). Recent developments in the techniques of controlling and measuring suction in unsaturated soils. *Unsaturated Soils: Advances in Geo-Engineering*. Toll et al. (eds). Taylor & Francis Group, London; pp 33-52
- Dineen, K. & Burland, J.B. (1995). A new approach to osmotically controlled oedometer testing. *Proceedings of the 1st International Conference of Unsaturated Soils*, Paris; 2, pp 459 - 465
- Hight, D.W., Gasparre, A., Nishimura, S. Minh, N.A., Jardine, R.J. & Coop, R. (2007). Characteristics of the London Clay from Terminal 5 site at Heathrow Airport. *Geotechnique*, 57, 1, pp 3-18
- Hilf, J.W. (1956). An investigation of pore-water pressure in compacted cohesive soils. Ph.D. Thesis. Technical Memo No. 654, United States Bureau of Reclamation, Denver
- Hillel, D. (1998). *Environmental Soil Physics*. Academic Press, San Diego, California, USA. 771 pp
- James, G.J. (1988). *Principles of farm irrigation system design*. John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, USA. 543 pp
- Jennings, J.E.B. & Burland, J.B. (1962). Limitations to the use of the effective stress in partly saturated soils. *Geotechnique*, 12, 2; pp 125 - 144
- Jotisankasa, A. (2005). Collapse behaviour of a compacted silty clay. Ph.D. Thesis, University of London
- Jotisankasa, A., Coop, M. & Ridley, A. (2007). The development of a suction control system for a triaxial apparatus. *Geotechnical Testing Journal*, 30, 1, ASTM
- Kassiff, G. & Ben Shalom, A. (1971). Experimental relationship between swell pressure and suction. *Geotechnique*, 21, pp 245-255
- Monroy, R. (2006). The influence of load and suction changes on the volumetric behaviour of compacted London Clay. Ph.D. Thesis. University of London
- Monroy, R., Ridley, A.M., Dineen, K. & Zdravkovic, L. (2007). The suitability of the osmotic technique for the long term testing of partly saturated soils. *Geotechnical Testing Journal* 30, 3, pp 220 - 226
- Monroy, R., Zdravkovic, L. & Ridley, A. (2008). Volumetric behaviour of compacted London Clay during wetting and loading. *Unsaturated Soils: Advances in Geo-Engineering*. Toll et al. (eds). Taylor & Francis Group, London, 315-320
- Peck, A.J. & Rabbidge, R.M. (1966). Soil-Water potential: direct measurement by a new technique. *Science* 151 (3716), pp 1385 - 1386
- Rahardjo, H. & Leong, E.C. (2006). Suction measurements. Proc. 4th Int. Conf. on Unsaturated Soils, Carefree, Arizona, Unsaturated Soils. Geotechnical Special Publication 147. G.A. Miller, C.E. Zapata, S.L. Houston and D.G. Fredlund (eds). ASCE, 1: pp 81 - 104
- Ridley, A.M. (1993). The measurement of soil moisture suction. Ph.D. Thesis, University of London
- Ridley, A.M. & Burland, J.B. (1993). A new instrument for the measurement of soil moisture suction *Geotechnique*, 44(3) : pp 551 - 556
- Ridley, A.M. & Burland, J.B. (1995). Measurement of suction in materials which swell. *Applied Mechanics Reviews*, 48 (9): pp 727 - 732
- Ridley, A.M. & Wray, W.K. (1996). Suction measurement: A review of current theory and practices. Proc. 1st Int. Conf. on Unsaturated Soils, Paris. Unsaturated Soils. E.E. Alonso and P. Delage (eds). A.A. Balkema/Presses des Ponts et Chaussées, Paris, 3: pp 1293 - 1322
- Ridley, A.M. & Burland, J.B. (1999). Use of the tensile strength of water for the direct measurement of high soil suction: discussion. *Canadian Geotechnical Journal*, 36, pp 178 - 180
- Ridley, A.M., Dineen, K., Burland, J.B. & Vaughan, P.R. (2003). Soil matrix suction: some examples of its measurement and application in geotechnical engineering. *Geotechnique*, 53, 2, pp 24 - 253
- Terzaghi, K. (1936). The shearing resistance of saturated soils and the angle between the planes of shear. Proc. 1st Int. Conf. Soil Mech. Fdn. Engng, 1, pp 54 - 56 Harvard
- Zur, B. (1966). Osmotic control of the matrix soil - water potential. *Soil Science*, 102: pp 394 - 398

CQ CLIMA

INGENIERÍA Y CONSTRUCCIÓN CQ LIMITADA

ASESORÍAS USO INTELIGENTE DE LA ENERGÍA

CONFECCIÓN DE PROYECTOS DE CLIMATIZACIÓN

EJECUCIÓN DE OBRAS DE CLIMATIZACIÓN



Diego de Oro 458 Concepción - Fonos: 2311263 - 2310834 - cvillegas @caclima.cl