

RESUMEN

El objetivo principal de esta investigación se centra en el estudio del comportamiento hidromecánico asociado con los cambios de succión y tensión neta de un suelo colapsable. Se ha definido cuidadosamente un programa de ensayos de laboratorio con una variedad de trayectorias tensionales y de succión que reproduzcan respuestas de interés para el avance del conocimiento de los suelos no saturados. Los resultados de los ensayos se han interpretado de acuerdo a un marco conceptual de endurecimiento elastoplástico (Alonso *et al.* 1990).

Para esta investigación se ha escogido una arcilla de baja plasticidad de la ciudad de Barcelona con una estructura preparada artificialmente y compactada estáticamente en condiciones isotropas (tensión controlada). Este método de fabricación de muestras tiene por objeto controlar la presión de preconsolidación en la estructura del suelo y evitar una fabricación anisótropa. La succión total de las muestras después de la compactación se ha medido empleando la técnica psicrométrica. Con este procedimiento de fabricación se conoce la historia de tensión y succión de las muestras, y se establecen unas condiciones iniciales precisas. La estructura de las muestras preparadas artificialmente se ha caracterizado mediante porosimetría de intrusión de mercurio, microscopía electrónica y una serie de ensayos mecánicos previos.

Se ha diseñado y construido una nueva célula edométrica con control de la succión matricial mediante la aplicación de la técnica de traslación de ejes. Se ha puesto a punto una célula triaxial existente con control de succión para la aplicación de una tensión desviadora y la realización de ensayos de compresión triaxial a deformación controlada. La célula triaxial, totalmente instrumentada, permite registrar la evolución temporal de la tensión desviadora (a través una célula de carga interna compensada a presión), la humedad de la muestra (mediante dos buretas conectadas a ambos discos cerámicos de AVEA), las deformaciones axiales (con dos LVDT locales), las deformaciones radiales y las isócronas de los perfiles laterales (a través de sensores láser electro-ópticos) (Romero, 1999; Barrera *et al.* 2002). En la técnica de traslación de ejes se ha mantenido constante la presión de aire (u_a) y se ha variado la presión de agua (u_w) hasta alcanzar una diferencia igual a la succión matricial deseada ($u_a - u_w$), aplicando un rango de succiones entre 10 y 800 kPa. Los equipos se han calibrado cuidadosamente desde un punto de vista mecánico e hidráulico.

Los ensayos de laboratorio se han llevado a cabo bajo trayectorias tensionales que han incluido variaciones de la succión matricial, de la tensión media / vertical neta y de la tensión desviadora. Los principales aspectos estudiados han sido la dependencia del estado del suelo con la trayectoria tensional seguida, los colapsos e hinchamientos del suelo al variar la succión y los estados de sobreconsolidación producidos por un proceso mecánico (incrementos de la tensión neta) o hidráulico (cambios de succión).

El comportamiento de cambio de volumen (colapso, hinchamiento y retracción) de las muestras normalmente consolidadas y sobreconsolidadas se ha estudiado mediante ensayos edométricos e isotrópicos (mini-célula isotrópica y célula triaxial) con control de la succión. Se ha analizado la influencia del estado inicial, así como los efectos de la tensión neta aplicada y los cambios de succión en el comportamiento volumétrico, la permeabilidad y las características de retención de agua. Es importante resaltar que son pocos los estudios sobre colapsabilidad que se han realizados bajo condiciones isotrópicas y triaxiales (Kato & Kawai, 2000; Barrera *et al.* 2000; Romero *et al.* 2002).

En los ensayos de estados tensionales edométricos e isotrópicos se han observado pautas de comportamiento reversible e irreversible en relación con los cambios de volumen (colapso, hinchamiento y retracción). Se ha constatado la existencia de deformaciones plásticas importantes y de cambios irreversibles en el contenido de agua, asociados con las trayectorias de hidratación y secado, así como en las trayectorias de carga y descarga.

Asimismo, se ha estudiado el comportamiento hidro-mecánico durante la aplicación de una tensión desviadora a succión constante, analizando la respuesta tenso-deformacional, el acoplamiento hidráulico y determinando los parámetros de resistencia al corte. Existen pocos estudios experimentales que hayan analizado dicho acoplamiento hidro-mecánico durante la etapa de corte (Rampino *et al.* 1999, Rampino *et al.* 2000, Wheeler & Sivakumar, 2000). Por otro lado, pese al indudable desarrollo de nuevos equipos triaxiales con succión controlada, se han reportado pocos resultados experimentales con relación a la evolución de la deformación axial y radial en forma local y global durante la etapa de corte en suelos no saturados. El estudio experimental ha consistido en un programa de ensayos de compresión triaxial a velocidad de deformación constante, bajo confinamiento y succión constantes. Se han analizado muestras normalmente consolidadas y sobreconsolidadas. El estado sobreconsolidado se ha inducido por tres diferentes mecanismos

previos a la etapa de corte: por un proceso mecánico de carga y descarga isótropa a succión constante; por un proceso hidráulico de humedecimiento y secado bajo tensión media neta constante con una deformación de colapso dominante; y, finalmente, por otro proceso hidráulico de secado y humedecimiento bajo condiciones libres de retracción y expansión. La respuesta al corte de las muestras normalmente consolidadas se ha estudiado para el nivel máximo de tensión media neta alcanzado por la muestra y en trayectorias previas de colapso.

Durante la etapa de corte las muestras presentaron inicialmente un comportamiento volumétrico contractante y posteriormente exhibieron dilatancia sin que se detectara evidencia de reblandecimiento del suelo. Asimismo, en todas las muestras, se observó inicialmente expulsión de agua hasta alcanzar un valor estable sin que se detectaran signos de entrada de agua durante la etapa final de dilatancia. A partir de los resultados de los ensayos se ha establecido la existencia de una línea de estado crítico en términos de tensión media neta, de tensión desviadora y de relación de vacíos, cuya posición depende del valor de la succión. Por otro lado, se ha detectado el incremento de tamaño de la superficie de fluencia debido a las deformaciones irreversibles inducidas por un proceso hidráulico (humedecimiento y secado, secado y humedecimiento) o mecánico (carga y descarga isótropa). También se ha observado un aumento de la rigidez y de la resistencia al incrementar la succión.

Los resultados experimentales se han analizado utilizando el modelo de endurecimiento elastoplástico propuesto por Alonso *et al.* (1990), que se basa en conceptos de estado crítico. Se han determinado los parámetros del suelo asociados con dicho modelo y se han simulado algunas trayectorias tensionales, que han servido para validar su capacidad para reproducir la respuesta de un suelo no saturado. La comparación de los resultados experimentales y la simulación numérica en las trayectorias de humedecimiento–secado y carga–descarga han mostrado una buena correspondencia cualitativa y cuantitativa. En lo que respecta a las etapas de corte, el modelo ha reproducido adecuadamente la respuesta tenso-deformacional y ha capturado los efectos de la sobreconsolidación mecánica e hidráulica. Sin embargo, el comportamiento dilatante observado en las etapas finales de corte no ha podido simularse satisfactoriamente.

Algunas de las aportaciones de la presente tesis se han presentado en diversas conferencias y simposios internacionales celebrados durante los últimos años. A continuación se presentan las referencias de estos trabajos.

- Barrera, M., Lloret, A., Vaunat, J. & Gens, A. (1998). Análisis teórico y experimental del efecto de la carga de compactación en los cambios de volumen de un suelo. *XI Congreso Brasileiro de Mecânica do Solos e Engenharia Geotécnica*, COBRAMSEG, Brasilia Vol. 3: 835-842.
- Barrera, M., Romero, E., Lloret, A. & Gens, A. (2000). Collapse test on isotropic and anisotropic compacted soils. *International Workshop On Unsaturated Soils: Experimental Evidence and Theoretical Approaches in Unsaturated Soils*, Trento, Italy. Balkema: 33-45.
- Barrera, M., Romero, E., Lloret, A. & Vaunat, J. (2002). Hydro-mechanical behaviour of a clayey silt during controlled-suction shearing. *International Conference on Unsaturated Soils*, Recife, Brazil, A. A. Balkema, Rotterdam Vol. 2: 485-490.
- Romero, E., Barrera, M., Lloret, A. & Gens, A. (2002). Collapse under isotropic stress state of anisotropic and isotropic compacted soils. *International Conference on Unsaturated Soils*, Recife, Brazil, A.A. Balkema, Rotterdam Vol. 2: 635-640.
- Barrera, M., Romero, E., Sánchez, M. & Lloret, A. (2002). Laboratory test to validate and determine parameters of an elastoplastic model for unsaturated soils. Enviado y aceptado para su publicación en el *International Symposium on Identification and Determination of Soils and Rock Parameters for Geotechnical Design*. Paris, France, 2-3 September 2002.