Ensayos de suelos parcialmente saturados con control simultáneo de succión y temperatura

E. ROMERO (*), A. GENS (*), A. LLORET (*)

RESUMEN En el artículo se presentan algunos avances en técnicas experimentales relacionadas con la caracterización termo-hidro-mecánica de suelos parcialmente saturados. Se describen los principales problemas asociados con la aplicación de la técnica de traslación de ejes a temperaturas elevadas. Se presentan algunos resultados experimentales de trayectorias no isotérmicas a succión matricial impuesta efectuadas sobre diferentes muestras de arcilla preparadas artificialmente.

LABORATORY TESTING OF UNSATURATED SOILS UNDER SIMULTANEOUS SUCTION AND TEMPERATURE CONTROL

ABSTRACT *The paper presents recent developments in laboratory testing related with the thermo-hydro-mechanical characterization of soil properties. Main problems concerning axis translation technique application at high temperatures are described. Selected test results of non-isothermal paths at constant matric suction are presented for different artificially prepared clay fabrics.*

Palabras clave: Equipos y ensayos de laboratorio; efectos térmicos; succión; suelos parcialmente saturados.

1. INTRODUCCIÓN

La necesidad de abordar ciertos problemas actuales de la Ingeniería Geotécnica requiere la ampliación del estado del conocimiento respecto al comportamiento de los suelos, incorporando variables de estado tensionales y ambientales relevantes. En el artículo se tratan dos de estas variables desde un punto de vista experimental, considerando sus efectos sobre el comportamiento hidro-mecánico de las arcillas, como son la succión (una variable de estado tensional) y la temperatura (una variable de estado ambiental).

Las investigaciones realizadas durante las últimas décadas han proporcionado evidencia experimental de que la succión juega un papel importante en los suelos no saturados. Por otro lado, los efectos térmicos han recibido mayor atención debido al uso creciente de geomateriales en entornos de elevada temperatura. Las barreras de ingeniería, diseñadas para el almacenamiento de residuos radiactivos de alta actividad en repositorios geológicos profundos, son un ejemplo de aplicación geotécnica en las que el estado de saturación parcial y la temperatura son factores importantes de comportamiento. Por consiguiente, es necesario extender los equipos y las técnicas experimentales actuales para investigar los estados parcialmente saturados bajo condiciones no isotérmicas y proporcionar descripciones fiables del comportamiento tensodeformacional de los suelos.

(*) Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica E.T.S. Ingenieros de Caminos, C. y P., Universidad Politécnica de Cataluña.

Existen diversos estudios experimentales que involucran los efectos térmicos en suelos saturados, y algunos resultados recientes en este área se describen en Delage et al. (2000) y Burghignoli et al. (2000). Sin embargo, la incorporación experimental de la variable temperatura en suelos parcialmente saturados no ha sido tan estudiada, principalmente debido a la dificultad de controlar los cambios de fase del agua en un sistema termodinámico abierto al vapor. Esta limitación hace imposible la aplicación de presiones de cola con el propósito de evitar estos cambios de fase a temperaturas elevadas. Saix & Jouanna (1990) y Saix (1991) reportaron los primeros resultados térmicos a succión matricial relativamente baja (valores de succión inferiores a 5 kPa). Recordon (1993) y Wiebe et al. (1998) estudiaron las consecuencias de las cargas térmicas en suelos parcialmente saturados a contenido de agua constante y sin control de la succión (sistema cerrado al vapor). Romero et al. (1998) y Romero (1999) presentaron resultados experimentales de carga térmica con control de la succión mediante la técnica de traslación de ejes (sistema abierto al vapor).

2. ENSAYOS DE LABORATORIO

2.1. EQUIPO EXPERIMENTAL

Los equipos más adecuados para caracterizar el comportamiento termo-hidro-mecánico de suelos parcialmente saturados son los que cuentan con un control simultáneo e independiente de la temperatura y de la succión. Se han desarrollado y calibrado cuidadosamente dos de tales equipos: una célula edométrica a temperatura y succión contro-

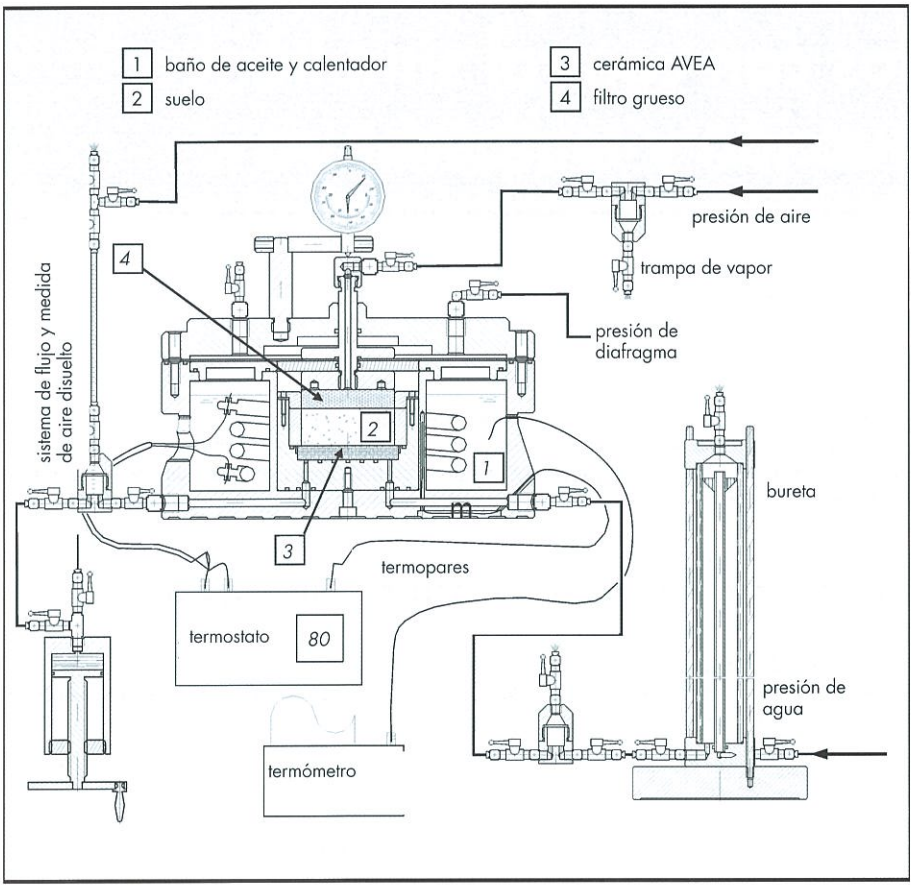

FIGURA 1. Montaje experimental (célula edométrica y equipos auxiliares) de los ensayos con control de succión y temperatura (Romero et al. 1995).

lada (Romero et al. 1995) y una célula triaxial (Romero et al. 1997, Romero 1999).

La Figura 1 muestra el esquema de una célula edométrica y de los dispositivos auxiliares requeridos para realizar los ensayos. La temperatura del suelo, entre condiciones ambientales y 80°C, se mide con termopares ubicados cerca de la muestra. Estos sensores se usan como señales de control actuando sobre un termostato programable. Este termostato controla al calentador, que está sumergido en un baño de aceite de silicona (1 en la Figura 1). El incremento de temperatura hasta el valor objetivo puede regularse eléctricamente durante la trayectoria térmica, siendo la tasa mínima de 5°C/hora.

La bureta, conectada a la cerámica de alto valor de entrada de aire (cerámica AVEA, 3 en la Figura 1) y mantenida a la temperatura de referencia del laboratorio (22°C), se utiliza para medir los cambios de volumen de agua que experimenta el suelo en cada etapa de cambio de succión y de temperatura. La succión matricial se controla por la técnica de sobrepresión de aire, en la que se aplica una presión elevada de aire a la muestra (4 en la Figura 1). Esta técnica traslada la presión relativa de agua al rango positivo, al igual que la técnica de traslación de ejes, pero regula la succión matricial bajo una presión de aire constante y presión de agua variable. El término succión matricial se refiere al control del potencial del agua mediante una técnica experimental en la que la transferencia de agua se lleva a cabo principalmente en la fase líquida a través de una cerámica permeable a las sales disueltas.

2.2. PROBLEMAS ASOCIADOS CON LA APLICACIÓN DE LA TÉCNICA DE SOBREPRESIÓN DE AIRE

Los principales problemas relacionados con la aplicación de la técnica de sobrepresión de aire a temperaturas elevadas están asociados con la acumulación de aire disuelto bajo la cerámica AVEA, con el control de la humedad relativa en el sistema de presión de aire y con la obstrucción progresiva de la cerámica debida a efectos de intercambio catiónicos a través del agua.

La acumulación de aire disuelto bajo la cerámica AVEA puede inducir la pérdida progresiva de continuidad entre el agua intersticial y el agua en el sistema de aplicación / medición. Esta disminución de la transferencia de agua en la fase líquida provoca una retracción del suelo debida a la evaporación del agua intersticial. Dicha retracción puede confundirse con la misma respuesta de cambio de volumen asociada con una contracción térmica. Por consiguiente, se requiere de un equipo auxiliar (sistema de flujo y medida de aire disuelto, indicado en la Figura 1) para evacuar y medir periódicamente el aire disuelto que pasa a través de la cerámica AVEA. Romero (1999) registró un aumento del coeficiente de difusión de aire disuelto a través de las cerámicas saturadas, con una porosidad de 0.31, al calentarlas de 22°C (coeficiente de difusión entre $6x10^{-11}$ y $1x10^{-10}$ m^2/s) hasta 80°C (entre $2x10^{-10}$ y $3x10^{-10}$ m^2/s). Adicionalmente, se observa un aumento del coeficiente volumétrico de solubilidad del aire en el agua a temperaturas más elevadas. De esta manera, una alternativa es utilizar nitrógeno para aplicar la sobrepresión de aire, ya que presenta un coeficiente volumétrico de solubilidad en el agua más bajo comparado con el del aire.

En relación con el fenómeno de transferencia de vapor entre el suelo y el sistema abierto de la línea de presión de aire, éste puede controlarse con trampas de vapor que mantengan una humedad relativa alta en la cámara de aire (Figura 1). Los flujos de evaporación se originan por la diferencia en la presión de vapor entre los poros del suelo y dicha cámara de aire. Dichos flujos volumétricos pueden medirse con la bureta en condiciones estacionarias.

Romero (1999) realizó una serie de análisis 1-D termo-hidráulicos para simular los flujos de evaporación y la evolución de la succión matricial a lo largo de una trayectoria de humedecimiento a temperaturas elevadas (80°C). El análisis realizado tuvo en cuenta los siguientes fenómenos acoplados: transporte de calor (conducción, convección y cambios de fase) y flujo de agua (fase líquida con la ley de Darcy y difusión de vapor según la ley de Fick). La simulación de estos fenómenos acoplados se realizó por medio de un código de elementos finitos (Code-Bright: Olivella et al. 1996). Las propiedades hidráulicas de la arcilla analizada se determinaron de acuerdo con resultados experimentales reportados por el mismo autor. La Figura 2 muestra la evolución temporal de la succión matricial a lo largo de una etapa de humedecimiento, aplicada con la técnica de sobrepresión de aire, para tres puntos representativos de la arcilla, empezando en un valor inicial de s_o = 1.6 MPa hasta un valor final de s_f = 0.45 MPa. La humedad relativa inicial de la cámara de aire se asume h_{ro} = 50%, en concordancia con la humedad relativa del laboratorio. Se prescribieron diferentes valores finales de humedad relativa sobre la superficie de la muestra en contacto con la cámara de aire (referirse al esquema de la Figura 2): h_{rf} = 80%, 90%, 95% y 99.7% (este último caso corresponde a la simulación de un sistema cerrado al vapor). El principal objetivo de las simulaciones era determinar la factibilidad de equilibrado de la succión matricial impuesta en la base del suelo a lo largo de la altura de la muestra de 10 mm (arcilla en contacto con la cerámica, punto medio y arcilla en contacto con el filtro grueso, tal como se indica en la Figura 2). En este proceso están involucrados dos flujos diferentes de agua, tal como se observa en el esquema de la Figura 2. Primero, un flujo de evaporación que intenta secar a la arcilla y que depende tanto de las propiedades del suelo (principalmente de la difusividad al vapor) como de las condiciones de contorno (la humedad relativa de la cámara de aire sobre la superficie de evaporación). Segundo, un flujo de agua líquida a través de la cerámica AVEA, que depende de la permeabilidad del suelo y de la cerámica. En la Figura 2 también se indican los diferentes valores de flujos volumétricos de evaporación, E_v, bajo condiciones estacionarias.

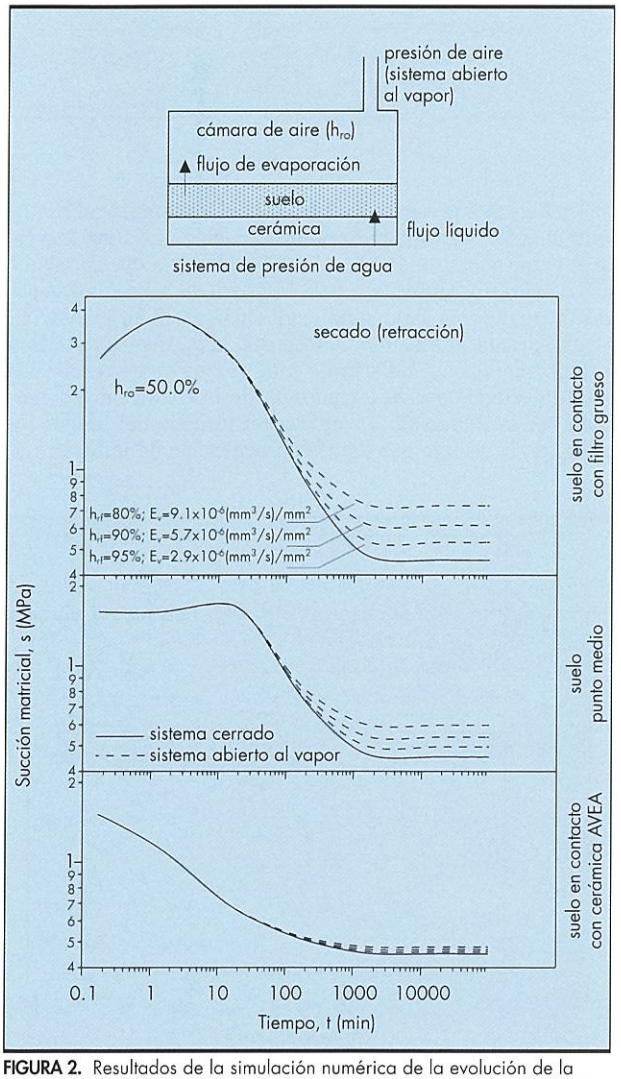

FIGURA 2. Resultados de la simulación numérica de la evolución de la succión matricial en una trayectoria de humedecimiento (succión inicial: s_o = 1.6 MPa; succión final: s_f = 0.45 MPa).

Según se observa en la Figura 2, la evaporación de agua origina el secado inicial de la superficie superior de la arcilla. Este secado va progresivamente disminuyendo y se revierte cuando se alcanza un determinado nivel de humedad relativa en la cámara de aire. Por otro lado, se detecta una reducción monótona de la succión en el contorno inferior de la muestra. Como se observa en esta figura, en un sistema abierto al vapor y al final de la etapa de humedecimiento bajo condiciones estacionarias no se logra el equilibrado final de la succión a lo largo de la altura de la muestra. El equilibrado de la succión matricial se consigue aproximadamente cuando se mantiene una humedad relativa superior a h_{rf} > 95% en la cámara de aire. Este hecho es equivalente a aceptar un flujo volumétrico de evaporación inferior a $E_v < 2.9\text{x}10^{-6}$ (mm^3/s)/mm^2. Romero (1999) recomienda una humedad relativa superior a 98.5% (o en forma equivalente, $E_v < 1\text{x}10^{-6}$ (mm^3/s)/mm^2) para limitar la transferencia de vapor a temperaturas elevadas (hasta 80°C) y para lograr el equilibrado de la succión a lo largo de toda la altura de la muestra.

3. RESULTADOS DE TRAYECTORIAS NO ISOTÉRMICAS

3.1 RESULTADOS SOBRE UNA MUESTRA ALTAMENTE SOBRECONSOLIDADA

Se pueden realizar dos tipos de ensayos con control de temperatura: ensayos isotérmicos a temperaturas elevadas y trayectorias no isotérmicas (de calentamiento o de enfriamiento). Esta sección trata solamente las trayectorias no isotérmicas de calentamiento / enfriamiento. Adicionalmente, estas trayectorias térmicas pueden clasificarse en no drenadas y drenadas. En este último caso, la tasa de calentamiento o de enfriamiento se aplica lo suficientemente lenta como para asegurar un incremento o decremento poco significativo en la presión intersticial (tasas entre 0.1°C /hora y 0.8°C /hora para suelos arcillosos con distancia de drenaje de 40 mm). Otra alternativa de realizar la trayectoria térmica drenada es aplicar los incrementos o decrementos a tasas más elevadas (alrededor de 5°C/hora) y después permitir el equilibrado de la pre-

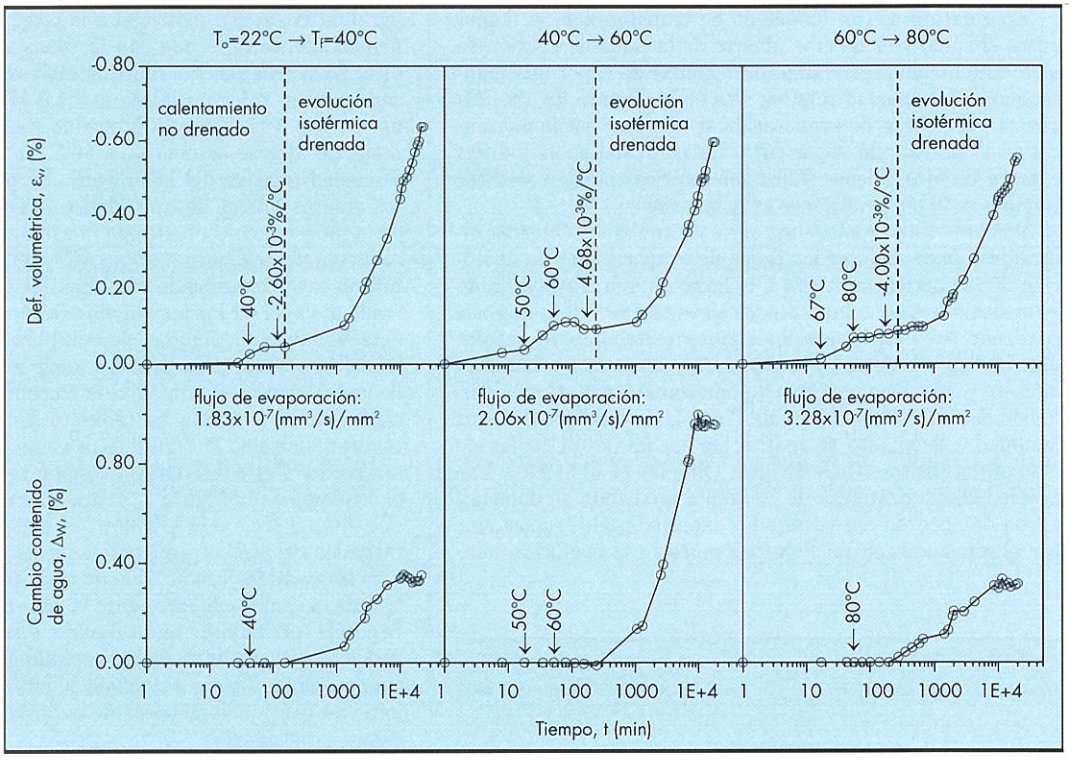

FIGURA 3. Evolución temporal de la deformación volumétrica y del cambio de contenido de agua en una trayectoria de calentamiento drenada a tensión vertical neta constante y succión matricial impuesta.

sión intersticial a temperatura constante (Romero 1999). Para procesar los resultados de las trayectorias no isotérmicas se deben realizar calibraciones cíclicas previas con el objeto de corregir los efectos de cambio de volumen de agua en las líneas de transmisión, así como los efectos de la dilatación térmica de los diferentes elementos del equipo.

La Figura 3 presenta las diferentes evoluciones no isotérmicas bajo condiciones edométricas de una arcilla artificialmente preparada y altamente sobreconsolidada, que se llevó a la succión matricial deseada siguiendo un camino de humedecimiento. Posteriormente, se calentó en tres etapas hasta 80°C bajo una tensión vertical neta constante de $(\sigma_v - u_a)$ = 0.03 MPa y una succión matricial aplicada de s = 0.06 MPa. La deformación de dilatación se considera negativa y la entrada de agua se denota con un cambio positivo del contenido gravimétrico de agua. La muestra se preparó por compactación estática en forma uni-dimensional a un contenido de agua de w = 15%. Las condiciones iniciales de la muestra, antes de la etapa de calentamiento, son e_o = 0.763 y w_o = 25.4%. Las líneas de drenaje se mantuvieron abiertas a lo largo de las diferentes trayectorias y la temperatura se incrementó en etapas a una tasa de 5°C/hora. El incremento de temperatura se detuvo cada 20°C para permitir el equilibrado de la presión intersticial. Inicialmente, la muestra dilata sin un cambio significativo en el contenido de agua en la fase cuasi no drenada (gráfico inferior de la Figura 3). Los coeficientes volumétricos de dilatación térmica en dicha fase se indican en la figura. A esta fase sigue la evolución drenada de equilibrado de presiones, en la que la muestra presenta un hinchamiento con absorción de agua. Esta última fase se interrumpe a las 2 semanas, cuando se estabiliza el cambio de contenido de agua. Los flujos volumétricos de evaporación, que aumentan con la temperatura tal como se indica en la Figura 3, se han mantenido por debajo del límite indicado en la sección anterior.

La Figura 4 presenta los resultados de dos ensayos de calentamiento / enfriamiento realizados bajo una tensión vertical neta constante de $(\sigma_v - u_a)$ = 0.03 MPa y a dos succiones matriciales diferentes (s = 0.06 MPa y 0.20 MPa). Los ensayos se realizaron bajo condiciones edométricas y sobre la misma arcilla altamente sobreconsolidada, que se describió anteriormente. Es importante indicar que estos resultados están afectados por cierta pérdida de la condición K_0, causada por la dilatación y contracción térmica del anillo. No obstante, se asume que estas consecuencias no influyen no-

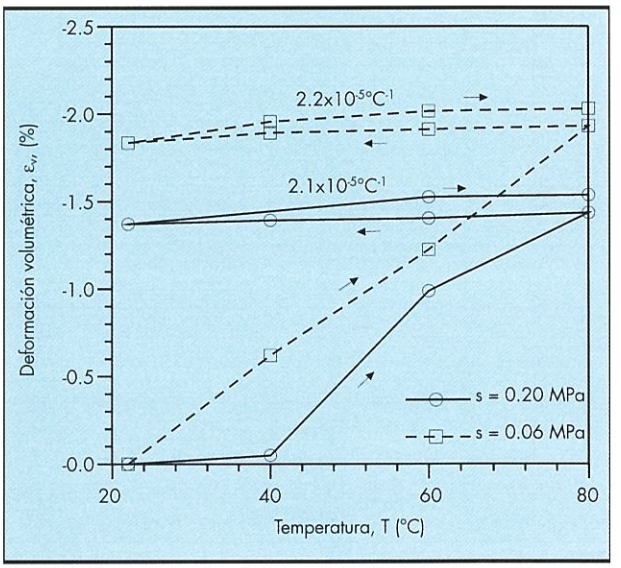

FIGURA 4. Trayectorias de calentamiento / enfriamiento a succión matricial constante y bajo una tensión vertical neta de 0.03 MPa.

toriamente en el comportamiento de cambio de volumen del suelo altamente sobreconsolidado y con elevada capacidad de hinchamiento (Romero et al. 1998). En la Figura 4 se observa la marcada influencia de la trayectoria seguida, donde se identifican claramente las componentes reversibles e irreversibles de las deformaciones volumétricas. Adicionalmente se observa una tendencia a la acumulación de deformaciones de dilatación en las trayectorias siguientes de enfriamiento y calentamiento.

3.2. RESULTADOS SOBRE UNA MUESTRA NORMALMENTE CONSOLIDADA

Sobre una arcilla normalmente consolidada se realizaron trayectorias no isotérmicas bajo una tensión media neta constante de $(\sigma_m - u_a)$ = 1.0 MPa y manteniendo una succión matricial de s = 0.20 MPa. El programa experimental se realizó bajo condiciones de tensión neta isótropa utilizando una célula triaxial con control de temperatura (sistema de convección forzada con aceite de silicona) y de la succión (técnica de sobrepresión de aire), que se describe en Romero et al. (1997) y Romero (1999). Este equipo, totalmente instrumentado, permite registrar la evolución temporal de las deformaciones axiales de la muestra mediante dos transductores LVDT locales, así como las deformaciones radiales con dos sensores láser de tipo electro-óptico.

La Figura 5 muestra la evolución temporal de las deformaciones (axial, radial, volumétrica y de corte) y de los cambios de volumen de agua (medidos a una temperatura de referencia de 22°C), que experimenta la muestra arcillosa en una trayectoria de calentamiento que va desde 30°C hasta 40°C a una tasa de 5°C/hora. Después de este incremento de temperatura, la muestra se deja en condiciones isotérmicas para equilibrar el exceso de presión intersticial generado en esta fase inicial. De esta forma, el ensayo presenta una fase inicial con restricción de drenaje debida a la baja permeabilidad de la muestra y de la cerámica AVEA. En esta etapa cuasi no drenada, la succión matricial de la muestra disminuye debido al aumento de la presión de agua. Se asume que esta fase, equivalente a una trayectoria de humedecimiento, se desarrolla principalmente bajo condiciones reversibles sin ninguna fluencia del material. Romero (1999) analizó este incremento en la presión de agua sin cambio en las

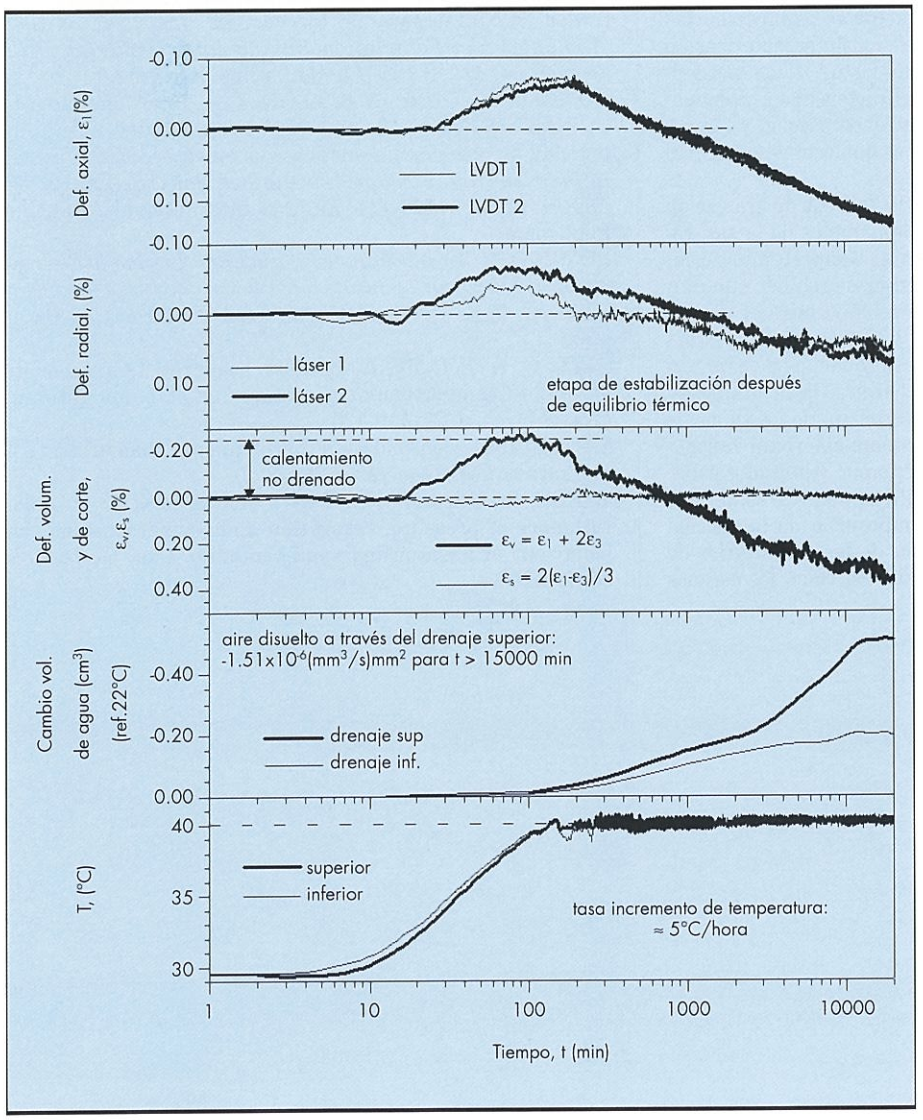

FIGURA 5. Evolución temporal de deformaciones y variación del contenido volumétrico de agua en una etapa de calentamiento a una succión matricial impuesta de s = 0.20 MPa. Fases de calentamiento no drenado y de equilibrado de la presión intersticial.

tensiones de confinamiento, asumiendo compatibilidad de deformación entre el esqueleto del suelo y de sus constituyentes e incorporando los coeficientes de compresibilidad volumétrica y de expansión térmica. Según este análisis, el incremento de presión de agua calculado se mantiene por debajo del valor de la succión matricial aplicada, por lo que no se genera sobrepresión de agua.

Tal como se observa en la Figura 5, la muestra dilata en esta fase inicial sin un cambio apreciable en la entrada de agua. Posteriormente, en la etapa de equilibrado de la presión intersticial a temperatura constante, se detecta una compresión isótropa acompañada de una pequeña expulsión de agua. Esta etapa de equilibrado se interrumpe a las dos semanas, cuando se observa cierta estabilización de la deformación volumétrica (una tasa de deformación volumétrica inferior a 0.01%/día). La dilatación isótropa que se observa en la fase inicial no drenada se debe principalmente a la expansión térmica que experimenta el agua intersticial. La compresión isótropa del esqueleto en la etapa de equilibrado de la presión intersticial se origina por la pequeña expulsión de agua, así como por la pérdida de resistencia en los contactos de los agregados arcillosos.

4. CONCLUSIONES

En el artículo se presentan los principales avances en las técnicas experimentales relacionadas con la caracterización termo-hidro-mecánica de las propiedades de suelos parcialmente saturados. Se describen las características principales de una célula edométrica con control de succión y temperatura, así como los diferentes equipos que complementan el montaje experimental.

Se demostró la aplicabilidad de la técnica de traslación de ejes en el estudio de los efectos combinados de la saturación parcial y de la temperatura en el comportamiento hidro-mecánico de los suelos. Sin embargo, se requiere un control más exhaustivo de dicha técnica mediante el uso de equipos auxiliares (trampa de vapor y sistema de flujo y medida de aire disuelto). Los principales problemas de esta técnica a temperaturas elevadas se refieren a la acumulación de aire disuelto bajo la cerámica y al control de los flujos de evaporación en la cámara de aire (sistema abierto al vapor).

Finalmente se presenta una selección de resultados sobre muestras de arcilla preparadas artificialmente y sometidas a trayectorias no isotérmicas con imposición de la succión matricial. Se representa la evolución de los transitorios de las fases no drenada y de equilibrado, así como los estados estacionarios al final de cada etapa de calentamiento, de un programa experimental realizado sobre muestras de arcilla en condiciones iniciales altamente sobreconsolidada y normalmente consolidada.

5. REFERENCIAS

BURGHIGNOLI, A., DESIDERI, A. & MILIZIANO, S. 2000. A laboratory study on the thermomechanical behaviour of clayey soils. *Can. Geotech. J.* 37: 764-780.

DELAGE, P., SULTAN, N. & CUI, Y.J. 2000. On the thermal consolidation of Boom clay. *Can. Geotech. J.* 37: 343-354.

OLIVELLA, S., GENS, A., CARRERA, J. & ALONSO, E.E. 1996. Numerical formulation for a simulator (CODE_BRIGHT) for the coupled analysis of saline media. *Engineering computations* 13 (7): 87-112.

RECORDON, E. 1993. Déformabilité des sols non saturés à diverses températures. *Rev. Franç. Géotech.* 65: 37-56.

ROMERO, E., LLORET, A. & GENS, A. 1995. Development of a new suction and temperature controlled oedometer cell. In E.E. Alonso & P. Delage (eds), *Proc. 1st Int. Conf. on Unsaturated Soils, Paris, 6-8 September 1995,* 2: 553-559. Rotterdam: Balkema / Presses des Ponts et Chaussées.

ROMERO, E., FACIO, J.A., LLORET, A., GENS, A. & ALONSO, E.E. 1997. A new suction and temperature controlled triaxial apparatus. In *Proc. 14th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Hamburg, 6-12 September 1997,* 1: 185-188. Rotterdam: Balkema.

ROMERO, E., GENS, A. & LLORET, A. 1998. Thermo-mechanical behaviour of a heavily overconsolidated unsaturated clay as observed in suction controlled oedometer tests. In *Proc. 2nd Int. Conf. on Unsaturated Soils, Beijing, 27-30 August 1998,* 1: 426-431. Beijing: International Academic Publishers.

ROMERO, E. 1999. *Characterization and thermo-hydro-mechanical behaviour of unsaturated Boom clay: an experimental study.* Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña.

SAIX, C. & JOUANNA, P. 1990. Appareil triaxial pour l'étude du comportement thermique de sols non saturés. *Can. Geotech.* J. 27: 119-128.

SAIX, C. 1991. Consolidation thermique par chaleur d'un sol non saturé. *Can. Geotech.* J. 28: 42-50.

WIEBE, B., GRAHAM, J., TANG, G.X. & DIXON, D. 1998. Influence of pressure, saturation and temperature on the behaviour of unsaturated sand-bentonite. *Can. Geotech.* J. 35: 194-205.