



**CHARACTERISATION AND THERMO-HYDRO-
MECHANICAL BEHAVIOUR OF UNSATURATED
BOOM CLAY:
AN EXPERIMENTAL STUDY**

TESIS DOCTORAL

Presentada por:
Enrique Romero Morales

Dirigida por:
Antonio Gens Solé
Antonio Lloret Morancho

Barcelona, junio 1999

To Juli

*Nullum esse librum
tam malum ut non
aliqua parte prodesset.*

Pliny The Elder

ABSTRACT

Thermo-hydro-mechanical aspects on volume change behaviour and water content changes in unsaturated clays have not been systematically studied previously, reason why phenomena associated with these effects are uncertain. In view of the increasing use of clay in high-temperature environments, mainly related to the conceptual design of engineered barriers for radioactive waste disposal in deep geological media, and to enrich the existing body of knowledge in this area, a systematic laboratory research programme has been designed and carried out to investigate these aspects. The main objective of this research is to analyse the effects of temperature and hydration or drying paths on clay volume change behaviour, water permeability and water retention characteristics, under a variety of matric suction, net stress and temperature paths. Two artificially prepared packings of Boom clay powder with a dominant aggregated fabric, exhibiting extremes of unsaturated clay behaviour and covering a wide overconsolidation range, have been used in the testing programme. Clay powder and artificially prepared samples have been extensively characterised in relation to hydraulic and mechanical aspects, both at microstructural (focused on mercury porosimetry interpretation) and macrostructural scale, where two clear 'intra-aggregate' and 'inter-aggregate governing suction' zones are detected (Romero *et al.*, 1998b, 1999a).

New temperature and suction controlled oedometer cells (Romero *et al.*, 1995) and triaxial equipment (Romero *et al.*, 1997) have been designed, developed and carefully calibrated for investigating mechanical and thermal aspects of behaviour. The fully instrumented triaxial cell allows registering the time evolution of axial strains (via internal LVDTs), radial deformations and isochrones of lateral profiles (via electro-optical laser sensors) that experiences the sample under different mechanical, hydration and temperature paths. Air overpressure technique maintaining a constant air pressure has been followed during the tests, starting from continuous air phase conditions. Maximum temperature has been limited to 80°C for no appreciable phase and chemical change to occur, as well as to limit spurious problems affecting axis translation technique. Two main test types were carried out: isothermal tests at two different temperatures and non-isothermal paths. Isothermal paths were focused on wetting and drying cycles at constant net vertical or mean stress and loading-unloading cycles at constant suction, as well as suction controlled isochoric swelling/shrinkage pressure tests.

Reversible and irreversible features of volume change behaviour (swelling, collapse and shrinkage, thermal dilatation and contraction), under oedometer and isotropic stress state conditions have been observed (Romero *et al.*, 1998a, 1998c). Tests on heavily overconsolidated states revealed irreversible expansion upon drained heating at constant suction due to a structural rearrangement of clay skeleton, giving similar values in terms of volume and water content changes compared to isothermal wetting paths at different temperatures and equivalent stress states. The existence of important plastic deformations and irreversible water content changes associated with the first suction reduction and main drying path is a relevant feature of the data, which is more important at higher temperatures. Testing results at constant suction and net mean stress show that temperature increase on an open normally consolidated structure revealed irreversible contraction. A maximum collapse/contraction zone is also identified in the isothermal wetting paths at constant net vertical stress performed on the high-porosity fabrics. Isochoric tests revealed a dominating swelling for the low-porosity sample, where a higher swelling pressure is detected, and a controlling macrostructural collapse compensated by the reversible expansion of the structure for the high-porosity fabric (Romero *et al.*, 1999c). Based on these observations, hypotheses are proposed to explain features of behaviour in terms of microscopic and macroscopic phenomena affecting unsaturated clays.

Expressions for retention curves and water permeability functions at different temperatures, as well as values of the different parameters describing porosity, temperature and degree of saturation dependence, have been proposed and determined for both fabrics under a variety of conditions. Mechanical, suction and thermal induced changes in terms of different stress state variables and their associated work conjugate variables were discussed within an elastoplastic point of view, and parameters characterising their reversible and irreversible features respect to drained and undrained thermal coefficients, as well as suction decrease, suction increase and loading-collapse yield loci, determined.

- Romero, E., Lloret, A. & Gens, A. (1995). Development of a new suction and temperature controlled oedometer cell. *Proc. 1st Int. Conf. on Unsaturated Soils*, Paris. E.E. Alonso and P. Delage (eds.), Balkema / Presses des Ponts et Chaussées, 2: 553-559.
- Romero, E., Facio, J.A., Lloret, A., Gens, A. & Alonso, E.E. (1997). A new suction and temperature controlled triaxial apparatus. *Proc. 14th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Hamburg, 1: 185-188.
- Romero, E., Gens, A. & Lloret, A. (1998a). Thermo-mechanical behaviour of a heavily overconsolidated unsaturated clay as observed in suction controlled oedometer tests. *Proc. 2nd Int. Conf. on Unsaturated Soils*, Beijing, International Academic Publishers, 1: 426-431.
- Romero, E., Gens, A. & Lloret, A. (1998b). Water permeability, water retention and microstructure of unsaturated compacted Boom clay. *Proc. Workshop on Microstructural Modelling of Natural and Artificially Prepared Clay Soils with Special Emphasis on the use of Clays for Waste Isolation*, Lund, Sweden: 111-118.
- Romero, E., Gens, A. & Lloret, A. (1998c). Thermo-mechanical behaviour of a nearly saturated clay as observed in suction controlled isotropic tests. *Proc. 5th Int. Workshop on Key Issues in Waste Isolation Research*, Barcelona.
- Romero, E., Gens, A. & Lloret, A. (1999a). Water permeability, water retention and microstructure of unsaturated Boom clay. *Engineering Geology*, 54: 117-127.
- Romero, E., Gens, A. & Lloret, A. (1999b). Experimental aspects and interpretation of suction controlled swelling pressure tests. *Proc. 11th Panamerican Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Foz do Iguaçu, Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica: 929-935.

RESUMEN

En la actualidad, las arcillas se están empleando cada vez más en ambientes de alta temperatura, en especial los relacionados con el almacenamiento de desechos radioactivos en formaciones geológicas profundas. Sin embargo, los aspectos termo-hidro-mecánicos asociados con el comportamiento de cambios de volumen y contenido de agua en arcillas parcialmente saturadas no han sido estudiados experimentalmente de forma sistemática. Dado el interés creciente del uso de este material y a fin de enriquecer el estado de conocimiento en esta área, se ha diseñado y llevado a cabo un programa de investigación de laboratorio para estudiar dichos aspectos. El objetivo principal de esta investigación se centra en el análisis de los efectos de la temperatura y la hidratación o secado de las arcillas en el comportamiento de cambio de volumen, permeabilidad y características de retención de agua, ante una variedad de trayectorias de succión, tensión neta y temperatura. En el programa experimental se han utilizado dos tipos de muestras de polvo de arcilla de Boom artificialmente agrupadas con una estructura dominante de agregados, exhibiendo pautas de comportamiento extremas de las arcillas parcialmente saturadas y cubriendo un ancho rango de grados de sobreconsolidación. El polvo y las muestras artificiales de arcilla se han caracterizado extensamente con relación a los aspectos hidráulicos y mecánicos, tanto desde el punto de vista micro-estructural (enfocándose en la interpretación de ensayos de porosimetría de mercurio), así como a escala macro-estructural, donde se identifican dos zonas claras de dominio de la succión a nivel 'intra-agregado' o a nivel 'inter-agregado' (Romero *et al.*, 1998b, 1999a).

Se han diseñado y construido nuevas células edométricas (Romero *et al.*, 1995) y un equipo triaxial (Romero *et al.*, 1997) con control de temperatura y succión, calibrando cuidadosamente los aspectos mecánicos y térmicos. La célula triaxial, totalmente instrumentada, permite registrar la evolución temporal de las deformaciones axiales (a través de LVDT locales), de las deformaciones radiales y de las isócronas de los perfiles laterales (a través de sensores láser electro-ópticos), que experimenta la muestra en diferentes trayectorias mecánicas, de hidratación y de temperatura. En la técnica de sobre-presión de aire se ha mantenido una presión constante, aplicándola inicialmente en condiciones de fase de aire continua. La temperatura se limitó a un máximo de 80°C para evitar cambios de fase y químicos apreciables, así como para limitar los problemas espurios asociados a la técnica de traslación de ejes. Se llevaron a cabo dos tipos de ensayos: las trayectorias en condiciones isotérmicas a dos temperaturas contrastantes y los ensayos a condiciones no isotérmicas. Los ensayos isotérmicos se enfocaron en trayectorias de humedecimiento y de secado bajo tensiones netas verticales y medias constantes, en ciclos de carga y descarga a succión constante, así como en ensayos isócoros de presión de hinchamiento y retracción a succión controlada.

En los ensayos de estados tensionales edométricos e isótropos se han observado pautas de comportamiento reversible e irreversible ante cambios de volumen (hinchamiento, colapso y retracción, así como dilatación y contracción térmica) (Romero *et al.*, 1998a, 1998c). Los ensayos sobre muestras altamente sobreconsolidadas revelaron un hinchamiento irreversible en las trayectorias de calentamiento bajo condiciones drenadas a succión constante, debido a una reestructuración del esqueleto de la arcilla. Estos resultados mostraron valores similares ante cambios de volumen y contenidos de agua, a los obtenidos bajo condiciones isotérmicas en trayectorias de humedecimiento a diferentes temperaturas y estados tensionales equivalentes. La existencia de deformaciones plásticas importantes y de cambios irreversibles en el contenido de agua, asociados con las trayectorias principales de hidratación y de secado, es un aspecto relevante de los resultados, siendo más

importante a temperaturas elevadas. Los resultados a succión controlada y tensión neta media constante revelaron una contracción irreversible durante el calentamiento de una muestra de arcilla normalmente consolidada. Asimismo se identifica una zona de máximo colapso y contracción en las trayectorias isotérmicas de humedecimiento bajo tensión neta vertical constante realizadas sobre las muestras de alta porosidad. Los ensayos isócoros sobre las muestras de baja porosidad mostraron un hinchamiento dominante, asociado a una presión de hinchamiento mayor que la registrada por muestras de alta porosidad, donde se detecta un colapso macroestructural compensado por la expansión reversible de la estructura (Romero *et al.*, 1999c). Basándose en estas observaciones, se han propuesto hipótesis para explicar las pautas de comportamiento desde el punto de vista de los diferentes fenómenos micro y macroscópicos que afectan a las arcillas no saturadas.

Se han planteado una serie de expresiones para las curvas de retención y funciones de permeabilidad al agua a diferentes temperaturas, así como los valores de los diferentes parámetros que describen la dependencia funcional de la porosidad, de la temperatura y del grado de saturación. Los cambios producidos por la acción mecánica, la succión y la temperatura se han interpretado bajo un concepto elastoplástico utilizando diferentes variables de estado tensional y sus correspondientes variables conjugadas extensivas. Se determinaron los parámetros que caracterizan los aspectos reversibles e irreversibles de los coeficientes térmicos drenados y no drenados, así como los asociados a las superficies de fluencia de decremento de succión, incremento de succión y de carga-colapso.

- Romero, E., Lloret, A. & Gens, A. (1995). Development of a new suction and temperature controlled oedometer cell. *Proc. 1st Int. Conf. on Unsaturated Soils*, Paris. E.E. Alonso and P. Delage (eds.), Balkema / Presses des Ponts et Chaussées, 2: 553-559.
- Romero, E., Facio, J.A., Lloret, A., Gens, A. & Alonso, E.E. (1997). A new suction and temperature controlled triaxial apparatus. *Proc. 14th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Hamburg, 1: 185-188.
- Romero, E., Gens, A. & Lloret, A. (1998a). Thermo-mechanical behaviour of a heavily overconsolidated unsaturated clay as observed in suction controlled oedometer tests. *Proc. 2nd Int. Conf. on Unsaturated Soils*, Beijing, International Academic Publishers, 1: 426-431.
- Romero, E., Gens, A. & Lloret, A. (1998b). Water permeability, water retention and microstructure of unsaturated compacted Boom clay. *Proc. Workshop on Microstructural Modelling of Natural and Artificially Prepared Clay Soils with Special Emphasis on the use of Clays for Waste Isolation*, Lund, Sweden: 111-118.
- Romero, E., Gens, A. & Lloret, A. (1998c). Thermo-mechanical behaviour of a nearly saturated clay as observed in suction controlled isotropic tests. *Proc. 5th Int. Workshop on Key Issues in Waste Isolation Research*, Barcelona.
- Romero, E., Gens, A. & Lloret, A. (1999a). Water permeability, water retention and microstructure of unsaturated Boom clay. *Engineering Geology*, 54: 117-127.
- Romero, E., Gens, A. & Lloret, A. (1999b). Experimental aspects and interpretation of suction controlled swelling pressure tests. *Proc. 11th Panamerican Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Foz do Iguaçu, Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica: 929-935.

AGRADECIMIENTOS

A través de estas cortas líneas, que me permito escribir en español, quiero agradecer a todas las personas que con su soporte científico y humano han apoyado la realización de este trabajo de investigación. En primer lugar, a mis directores Antonio Gens y Antonio Lloret, así como a Eduardo Alonso, su dedicación, apoyo y confianza depositada tanto a nivel personal como en mi trabajo. A Alberto Ledesma, mi tutor inicial, por haberme embarcado en este proyecto. A mis compañeros de laboratorio: Josep Suriol, Tomás Pérez y José Álvarez por su respaldo en los avatares de la vida experimental.

A la antigua generación de compañeros de despacho: Luis Vives, Wai Yuk Gehling, José Facio, Vicente Navarro, Ángel García y Víctor García; a los de la generación media: Jordi Alcoverro; y a los de la nueva cantera: Clemente Mata y Marcelo Sánchez, por su aliento e interés en mi trabajo. A los otros compañeros de despacho: Carlos y Gitte, Andrei y Cristina, Lupe y Toni. A Jean y Susana, Ernesto y María, Luciano y Mariate, por tantos buenos momentos. A Daniel Ballart por su ayuda en el tratamiento de imágenes.

De manera especial a mi esposa Juliana por su comprensión, estímulo, incondicional apoyo y ayuda a lo largo de las diferentes etapas de la tesis, principalmente en el montaje experimental y en otros momentos difíciles. Igualmente a mi familia, que desde la lejana Venezuela, ha sabido animarme y apoyarme.

Por último quiero agradecer a la beca Mutis de la AEI, que financió los primeros años del doctorado, y a la beca TDOC de la Generalitat de Catalunya, que me permitió finalizar con éxito el desarrollo de la tesis. Igualmente, al Departamento de Ingeniería del Terreno, que ha financiado esta investigación y complementado el soporte económico recibido a través de diferentes proyectos de investigación.