

TECHNICAL UNIVERSITY OF CATALONIA
DEPARTMENT OF GEOTECHNICAL ENGINEERING AND GEOSCIENCES
SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING

***HYDRAULIC BEHAVIOUR OF BENTONITE BASED
MIXTURES IN ENGINEERED BARRIERS:
THE BACKFILL AND PLUG TEST AT THE ÄSPÖ HRL (SWEDEN)***

PhD Thesis

by:

Clemente Mata Mena

Supervised by:

Alberto Ledesma Villalba

Barcelona, May 2003

ABSTRACT

In 1997 the Backfill and Plug Test Project started at the Äspö Hard Rock Laboratory (Sweden) managed by SKB (the Swedish Radioactive Waste Agency). The Backfill and Plug Test Project makes up an important part of SKB's research in order to store nuclear waste in an engineered barrier in a safe way. ENRESA (the Spanish Radioactive Waste Agency) collaborates in this project with SKB in estimating and determining the hydraulic conductivity of the backfill material used to backfill a gallery.

The backfill, obtained by mixing MX-80 30% of sodium bentonite and 70% of crushed granite rock by weight, which maximum grain size was 20 mm, has been experimentally characterised. The experimental campaign has taken also into account salt water effects (up to 16 g/L) on its hydro-mechanical behaviour. Because of the *high enough* bentonite content, the activity of this soil is quite large if compared with natural clayey soils as kaolinites or illites. Therefore, effects of changes in the pore fluid chemistry on the hydro-mechanical behaviour of this mixture were investigated. Due to the current application of the mixture, as candidate for sealing galleries in a future repository for nuclear waste, interest was focused on the variation of permeability related to variation of salt concentration in pore fluid. Oedometer tests on samples permeated with different salt water contents and water uptake tests permeated with different salt water contents were performed. Compaction tests with distilled and salt water were also performed at simple and double energy. Osmotic suction of this mixture was investigated on a different mixture of sodium bentonite and sand keeping the same weight ratio. Crushed granite was substituted by sand, and therefore, transistor psychrometers, for instance, could be used in this determination.

Another part of the experimental study of this mixture was carried out by designing and calibrating a new mini-piezometer. This mini-piezometer allows performing constant and variable head tests in saturated clayey soils. Some numerical tools were also developed to analyse pulse tests performed in 2003 in a gallery of the full-scale laboratory placed at the Swedish Island of Äspö. Three different methods (analytical, semi-analytical and numerical) were used to study the pulse tests performed in laboratory. Results were compared and some conclusions were drawn. In late March 2003 some pulse tests were carried out at different mini-piezometers located at the Äspö HRL. A preliminary analysis of these tests was carried out and a range of in situ local hydraulic conductivity was obtained.

The last part of the thesis is focused on using a new finite element simulator, which solves thermo-hydro-mechanical-chemical (THMC) problems in a fully coupled way (Guimarães, 2002), to simulate the saturation process of a barrier for nuclear waste made up with this mixture. Interest was mainly focused on simulating the influence on the mixture hydraulic behaviour when salt concentration in pore fluid changed. A simple geochemical model, which took into account the ion exchange reaction between of Na^+ and Ca^{2+} , was considered. An empirical law, from the experimental information, was proposed and implemented in the finite element code. Effects of mixture molecular diffusion were also investigated, pointing out the importance of this parameter when transport of solutes in porous media is solved. Total suction was computed as the sum of matric suction and osmotic suction. Osmotic suction was calculated by obtaining salt concentrations and by using the Van't Hoff equation. In this way, osmotic suction was not assumed constant as usual in engineering practice.

Finally, from the research work carried out some papers have been published:

- Mata, C. & Ledesma, A. (2002). Permeability of a bentonite-crushed granite rock mixture using different experimental techniques. (Accepted for publication in Géotechnique).*
- Mata, C., Guimarães, L., Ledesma, A., Gens, A. & Olivella, S. (2002). A hydrogeochemical analysis of the saturation process with salt water of a bentonite crushed granite rock mixture in an engineered nuclear barrier. (Submitted to Engineering Geology).*
- Mata, C., Romero, E. & Ledesma, A. (2002). Hydro-chemical effects on water retention in bentonite-sand mixtures. Proc. 3rd Int. Conf. on Unsaturated Soils, UNSAT 2002, Jucá, J.F.T., de Campos, T.M.P. & Marinho, F.A.M. (Eds.), Recife, Brazil, Vol. 1, p. 283-288*
- Mata, C. & Ledesma, A. (2002). An analysis of the saturation process of a barrier for nuclear waste. XVth EYGEC, Dublin, Ireland, September 11-14, 2002.*
- Mata, C., Guimarães, L., Ledesma, A., Gens, A. & Olivella, S. (2001). A hydrogeochemical analysis of the saturation process with salt water of a bentonite crushed granite rock mixture in an engineered nuclear barrier. In 6th Int. Workshop Key Issues on Waste Isolation Research, p. 643-663, Paris, November, 2001*
- Mata, C. & A. Ledesma (2001). In situ measurement of local saturated permeability of compacted clayey soils by means of minipiezometers. Proc. XVth International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, (ICSMGE), Istanbul, Vol 1, p. 451-454, Turkey.*
- Mata, C. & A. Ledesma (2001). Determinación de la permeabilidad saturada mediante ensayos de pulso en laboratorio. "Las Caras del Agua Subterránea", Medina, A., Carrera, J. & Vives, L. (Eds.), Vol. 2, p. 603-608, September, 2001. Barcelona.*

RESUMEN

En 1997 comenzó el Proyecto Backfill and Plug Test ubicado en el Äspö Hard Rock Laboratory en Suecia. Este laboratorio está gestionado por la empresa sueca de residuos SKB. El proyecto constituye una parte importante del trabajo de investigación y desarrollo que SKB está llevando a cabo con el objetivo de construir un cementerio de residuos nucleares de forma segura. La empresa de residuos española, ENRESA, colabora con SKB en este proyecto en el cálculo in situ de la permeabilidad del material de relleno usado en este proyecto.

El material de relleno, obtenido a partir de una mezcla de bentonita sódica MX-80 y granito machacado (30/70 en peso) con un tamaño máximo de grano de hasta 20 mm, ha sido caracterizado experimentalmente en laboratorio. La campaña experimental ha tenido en cuenta también los efectos del agua salada (concentración hasta 16 g/L) en el comportamiento hidro-mecánico de esta mezcla. Debido al *relativamente elevado contenido* en bentonita, la actividad de esta mezcla es superior a la de arcillas naturales tipo kaolín o illita. Por lo tanto, se investigaron los efectos que sobre el comportamiento hidro-mecánico tenían los cambios de la química del agua contenida en los poros. Dado que esta mezcla se está utilizando actualmente como candidato a material de sellado de galerías en un futuro cementerio para residuos nucleares, el interés se ha centrado en la variación de la permeabilidad con los cambios de concentración de sales en el fluido intersticial. Se han realizado ensayos edométricos en muestras hidratadas con agua que contenía diferentes concentraciones de sal, así como ensayos de infiltración en los que las muestras también fueron hidratadas con agua salada que contenía diferentes concentraciones de agua salada. También se han estudiado los efectos del agua salada sobre la compactación de este material y se ha comparado con el observado en muestras hidratadas con agua destilada. La succión osmótica de este material se determinó de forma indirecta, midiéndola en una mezcla alternativa en la que el granito se sustituyó por arena. Tras esta sustitución, se pudieron emplear, por ejemplo, siccómetros en la medida de la succión.

Otra parte de la tesis consistió en el diseño y calibración de un nuevo minipiezómetro. Este minipiezómetro nos permite realizar ensayos de carga constante y variable en medios arcillosos saturados. Se desarrollaron las herramientas numéricas necesarias para analizar los ensayos de pulso que se harán en el año 2003 y 2004 en una galería del laboratorio a escala real situado en la isla sueca de Äspö. Se emplearon tres métodos (uno analítico, uno semianalítico y otro numérico) para analizar los ensayos de pulso realizados en laboratorio. Los resultados de los tres modelos fueron comparados. A finales de marzo de 2003 se pudieron realizar los primeros ensayos de pulso, lo que sirvió para averiguar el estado del sistema construido y montado por AITEMÍN y también para realizar un primer análisis de los pulsos. De esta forma se pudo obtener un rango de permeabilidades del relleno compactado in situ.

También se usó un nuevo código de elementos finitos que resuelve problemas termo-hidro-mecánico-químicos de forma acoplada (Guimarães, 2002) para estudiar el proceso de saturación de una barrera de residuos nucleares en la que se ha utilizado la mezcla caracterizada experimentalmente. El interés se centró especialmente en el comportamiento hidráulico de este suelo cuando se producen cambios en la concentración de sales en el fluido intersticial. Para ello, se consideró un modelo geoquímico muy simple, que sólo contempla la reacción de intercambio de cationes entre el Na^+ y Ca^{2+} . Se propuso una ley empírica de la permeabilidad intrínseca que fue implementada en el código de elementos finitos. La importancia de la difusión molecular de este suelo en los resultados se tuvo en cuenta de

forma cualitativa, señalando su relevancia en el transporte de solutos. La succión total del suelo se calculó como la suma de la succión matricial y la succión osmótica. La succión osmótica se calculó mediante la ecuación de Van't Hoff tras calcular las concentraciones de sales en la fase líquida. Por tanto, la succión osmótica no se consideró constante como es habitual en geotecnia.

Finalmente, de este trabajo investigador se han conseguido las siguientes publicaciones:

- Mata, C. & Ledesma, A. (2002). Permeability of a bentonite-crushed granite rock mixture using different experimental techniques. (Aceptado para publicación en Géotechnique).*
- Mata, C., Guimarães, L., Ledesma, A., Gens, A. & Olivella, S. (2002). A hydrogeochemical analysis of the saturation process with salt water of a bentonite crushed granite rock mixture in an engineered nuclear barrier. (Enviado a Engineering Geology).*
- Mata, C., Romero, E. & Ledesma, A. (2002). Hydro-chemical effects on water retention in bentonite-sand mixtures. Proc. 3rd Int. Conf. on Unsaturated Soils, UNSAT 2002, Jucá, J.F.T., de Campos, T.M.P. & Marinho, F.A.M. (Eds.), Recife, Brazil, Vol. 1, p. 283-288*
- Mata, C. & Ledesma, A. (2002). An analysis of the saturation process of a barrier for nuclear waste. XVth EYGEC, Dublin, Ireland, September 11-14, 2002.*
- Mata, C., Guimarães, L., Ledesma, A., Gens, A. & Olivella, S. (2001). A hydrogeochemical analysis of the saturation process with salt water of a bentonite crushed granite rock mixture in an engineered nuclear barrier. In 6th Int. Workshop Key Issues on Waste Isolation Research, p. 643-663, Paris, November, 2001*
- Mata, C. & A. Ledesma (2001). In situ measurement of local saturated permeability of compacted clayey soils by means of minipiezometers. Proc. XVth International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, (ICSMGE), Istanbul, Vol 1, p. 451-454, Turkey.*
- Mata, C. & A. Ledesma (2001). Determinación de la permeabilidad saturada mediante ensayos de pulso en laboratorio. "Las Caras del Agua Subterránea", Medina, A., Carrera, J. & Vives, L. (Eds.), Vol. 2, p. 603-608, Septiembre, 2001. Barcelona.*

ACKNOWLEDGEMENTS

I want to thank, first of all, my supervisor, Professor Alberto Ledesma for his valuable teachings and comments since the very first moment when I started studying something called *Soil Mechanics*. His contribution has been fundamental in this work. Moreover, I am grateful to Professors Eduardo Alonso, Antonio Gens and Toni Lloret for their interesting comments about my research. I also would like to thank many people in the Dept. of Geotechnical Engineering as José Álvarez, Fernando Cortés and Tomás Pérez for their help in the experimental part of the thesis. I will not forget Albert Marqués who has solved most of the problems computers created me those years. Thanks to Eva Martínez, Mari Carmen Rodríguez and Mari Carmen Esteban for their help in all the bureaucracy along these years.

I want to thank the funding institutions. First, I acknowledge ENRESA for its economic support provided for the PhD candidate and equipment during those years. I also want to acknowledge the scholarship provided by the Catalanian Government for PhD candidates. The Catalanian Government also supported me in my stay at the School of Civil and Environmental Engineering at the University of New South Wales (Sydney, Australia) for six months. This period of time was very important to clarify important matters of this thesis and to set out other doubts. I do want to thank the staff of this University and particularly Professor Valliappan and Dr. Nasser Khalili

I am especially indebted to Clay Technology AB, AITEMÍN, CIEMAT and SKB, which have provided much valuable information and support necessary for the carrying out of this thesis.

I want to thank the help and friendship of closer colleagues as Marcelo, Enrique, Leonardo, Roberto and Salvatore. Your help and continuous support has been very important all those years. I want to thank so many important people, above all my parents and my sisters, thank you. *For everything*. Thanks to my close friends: Beti, Carlos and Óscar, Eva, Kati, Quim and Miriam, Álex and Cristina, José Vicente and Carlos, Tuto, Martina, Milena, Antonio Ramírez, Cristina Marchi, Chicca, Sandra Duarte, Gabriele, Lisi, Jens...

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer, en primer lugar, a mi tutor de tesis, Alberto Ledesma, por sus valiosas enseñanzas y comentarios ya desde el primer momento cuando comencé a estudiar algo llamado *Mecánica de Suelos*. Su aportación en este trabajo ha sido fundamental. Además, me gustaría agradecer a Eduardo Alonso, Antonio Gens y Toni Lloret por sus interesantes comentarios sobre mi trabajo de investigación. También querría agradecer su valiosa colaboración en el trabajo experimental a otros miembros del Departamento de Ingeniería del Terreno como José Álvarez, Fernando Cortés y Tomás Pérez. Y no me olvidaré de Albert Marqués que ha solucionado muchos de los problemas que los ordenadores me han creado durante los últimos años. Gracias a Eva Martínez, Mari Carmen Rodríguez y Mari Carmen Esteban por su ayuda con la burocracia estos años.

Quiero agradecer el apoyo económico de dos instituciones. Primero a ENRESA por el apoyo económico durante estos años para mí y para equipos experimentales. También quiero agradecer a la Generalitat de Catalunya por la beca FI que me fue concedida para la formación de doctores. No quiero olvidar tampoco el apoyo económico que la Generalitat me otorgó durante mi estancia de seis meses en la School of Civil and Environmental Engineering at the University of New South Wales (Sydney, Australia). Este período de tiempo fue muy importante para aclarar muchos puntos oscuros de mi tesis y abrir otros. En particular, agradezco a los miembros de la plantilla de esta universidad por su agradable trato durante mi visita y especialmente al Dr. Valliappan y al Dr. Nasser Khalili.

Estoy especialmente agradecido a Clay Technology AB, AITEMÍN, CIEMAT y SKB, que me han proporcionado mucha información vital para el desarrollo de mi tesis, así como discusiones interesantes sobre el trabajo desarrollado.

Quiero agradecer la ayuda y amistad de mis colegas Marcelo, Enrique, Leonardo, Roberto y Salvatore. Vuestra ayuda y ánimo constante han sido imprescindibles durante estos largos años. A mis padres y mis hermanas. Gracias de corazón. *Por todo*. Gracias a mis amigos: Beti, Carlos y Óscar, Eva, Kati, Quim y Miriam, Álex y Cristina, José Vicente y Carlos, Tuto, Martina, Milena, Antonio Ramírez, Cristina Marchi, Chicca, Sandra Duarte, Gabriele, Lisi, Jens...