



Departamento de Ingeniería del Terreno,
Cartográfica y Geofísica

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO TERMO-HIDRO-MECÁNICO DE ARCILLAS EXPANSIVAS

TESIS DOCTORAL

Presentada por:

Xavier Pintado i Llurba

Directores de tesis:

Antonio Lloret Morancho

Eduardo Alonso Pérez de Ágreda

Barcelona, Junio de 2002

A la Carmen pel temps robat,
als meus pares pel temps donat,
a Òscar pel temps recuperat,
i a la Marta, la nouvinguda.

AGRAÏMENTS

En el moment en que s'estan escrivint aquestes línies, s'està acabant un treball començat fa molt temps, a l'any 1990 al despatx de l'Eduardo a l'antiga escola, quan després d'oferir a classe una beca de col·laboració, vaig anar amb el meu company i amic César. Allí, l'Eduardo em va presentar al Toni i amb ell, vam començar un camí llarg, del que ha resultat la meva tesina d'especialitat i aquesta tesi, que espero que no s'acabi aquí. A tots dos, a l'Eduardo per la seva confiança a l'hora de convidar-me a treballar al Departament i al Toni, per la seva constància, pels seus consells i orientació en el desenvolupament dels treballs i per la seva ajuda a l'hora de redactar la tesi, moltes gràcies.

No puc deixar de pensar en la meva dona, la Carmen, que tan m'ha ajudat i recolzat en la confecció d'aquesta tesi. Sense ella, sense la seva comprensió i paciència, no hauria estat capaç d'acabar-la.

Els meus pares, la meva germana i el meu avi sempre han estat presents des de que vaig començar la tesi, ells em van aconsellar començar-la i m'han recolzat sempre, també l'Àlex, que es com de la família. Dissortadament el abuelo, que ens va deixar quan estava a l'equador de la tesi, no estigui amb nosaltres per gaudir del final. A tots ells, moltes gràcies.

Tants anys al Departament han fet que al final, el laboratori acabés sent una gran família en la que uns i altres vivíem compartint il·lusions i esforços, per això, vull agrair al Jean, per aguantar les meves injúries contra la bentonita, al Roberto, per les tardes compartides el voltant de provetes. També agraeixo a tots els que han passat pel laboratori, el seu recolzament i ajuda, a l'Enrique, al Mauricio, als Lucianos, al Jordi, al Víctor, al José, al Tomás... Mentre es va fer la tesi, vaig tenir la sort d'anar a París i a Glasgow, on vaig conèixer al Pierre i al Simon, professors en aquestes ciutats, que també van contribuir a la tesi. Al Domenico, un italià a Glasgow, li agraeixo la seva ajuda en aquella ciutat.

Abans de fer la tesi, vaig haver de fer la carrera de camins, en la que vaig conèixer persones amb les que estic molt unit i amb les que he compartit molts moments importants, al Ramon, al Manel, al David, al César, al Federico, a l'Anna, al Santi, al Luis, al Miguel, al M.A., al Robert, al Vidal i a tots els que van estudiar amb mi la carrera. També al Clement, al Xavier i a l'Òscar, gràcies.

Des de que vaig deixar el Departament, he treballat en dues empreses on els companys de feina sempre m'han animat a seguir, als companys de DM Iberia i de CICSА-ESTEYCO, gràcies.

Per acabar, voldria agrair al Pascual i al Vicenç la lectura de l'esborrany i els seus consells per millorar-la.

RESUMEN

En los últimos años, se ha estado analizando la posibilidad de almacenar los residuos radioactivos de alta actividad procedentes del combustible gastado procedente de las centrales nucleares de producción de energía eléctrica, en galerías excavadas en roca. Entre la cápsula que contiene el residuo radioactivo y la roca, se estudia colocar una arcilla expansiva tipo bentonita (proyecto FEBEX; Alonso et al., 2000). Esta tesis se ha concentrado en el estudio y caracterización termo-hidro-mecánico de dicha arcilla.

Para realizar este estudio, primero se hicieron una serie de ensayos de laboratorio convencionales, idénticos a los utilizados para caracterizar todo tipo de suelos. Sin embargo, dadas las especiales características del material (una arcilla expansiva) y las condiciones de trabajo que tendría en un repositorio nuclear (altas temperaturas producidas por la degradación del material radioactivo y altas presiones debidas al confinamiento), se han tenido que desarrollar nuevos equipos y procedimientos de ensayo: una célula edométrica con succión controlada mediante un flujo forzado de aire húmedo, un equipo para la medida de dilatación por efectos térmicos y un equipo para estudiar la respuesta del suelo frente a flujos de calor. Los resultados obtenidos son consistentes con los deducidos por otros autores en el mismo material (Villar, 2000) y han permitido profundizar en el conocimiento del comportamiento de la bentonita (Lloret et al., 2002).

El desarrollo y mejora de las técnicas de cálculo numérico, ha permitido que recientemente, se hayan podido desarrollar una serie de códigos numéricos que permiten la simulación de procesos de flujo multifásico y resolver las ecuaciones constitutivas que regulan el comportamiento mecánico del suelo. En esta tesis, se han analizado los ensayos de laboratorio realizados simulándolos con ayuda de un código de elementos finitos desarrollado por el Departamento de Ingeniería del Terreno de la Universitat Politècnica de Catalunya, CODE_BRIGTH (Olivella, 1995), que resuelve el problema citado anteriormente. De este modo, se han podido estudiar los diferentes fenómenos ligados al movimiento de agua, de calor y a los cambios de volumen en los ensayos realizados.

Tradicionalmente, la cuantificación de parámetros que se realiza a partir de los ensayos de laboratorio, consiste básicamente en aplicar de manera directa la ley constitutiva que regula el comportamiento de la muestra en las condiciones del ensayo. Generalmente, consiste en deducir un parámetro de una ecuación relativamente sencilla (ensayos de permeabilidad) o dibujar los resultados obtenidos en el ensayo en sistemas de coordenadas especiales que permiten evaluar parámetros de manera gráfica (ensayos edométricos). Sin embargo, hay parámetros que no se pueden medir directamente (parámetros que regulan el flujo acoplado de agua y vapor debido a gradientes térmicos en un ensayo de flujo de calor), esto hace necesario que se deban utilizar otras técnicas para identificar los parámetros que los regulan. En esta tesis se han aplicado técnicas de identificación muy utilizadas en otros campos como son la hidrogeología o la sismología, para deducir parámetros que regulan el problema termo-hidráulico. Para ello ha sido necesario desarrollar un algoritmo de cálculo que, utilizando CODE_BRIGTH como rutina para resolver el problema directo, minimiza la diferencia entre los valores medidos en los ensayos y los valores calculados por el código (Pintado et al., 1998, 2002).

Alonso, E., Carrera, J., Gens, A., García-Molina, A., Guimerà, J., Guimaraes, L.N., Lloret, A., Martínez, L., Pintado, X. and Sánchez, M. (2000). FEBEX project. Full-scale engineered barriers experiment for a deep geological repository for high level radioactive waste in crystalline host rock. Publicación Técnica ENRESA (ISSN:1134:1134-380X). Vol 01/00.

Olivella, S. (1995). Non isothermal multiphase flow of brine and gas through saline media. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya.

Pintado, X., Ledesma, A. and Lloret A. (1998). Backanalysis of thermohydraulic bentonite properties from laboratory tests. V International Workshop on Key Issues in Waste Isolation Research. Barcelona. 25 pp.

Pintado, X., Ledesma, A. and Lloret A. (1998). Backanalysis of thermohydraulic bentonite properties from laboratory tests. Engineering Geology. nº 64, pp: 91-115.

Lloret, A., Villar, M.V., Sánchez, M., Gens, A., Pintado, X. and Alonso, E. (2002). Mechanical behaviour of heavily compacted bentonite under high suction changes. Enviado en Abril de 2002, para su publicación en Geotechnique.

Villar, M.V. (2000). Caracterización termo-hidro-mecánica de una bentonita del Cabo de Gata. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1-1
1.1 Antecedentes.....	1-1
1.2 Objetivos de la tesis.....	1-4
1.3 Organización y contenido de la tesis.....	1-5
2. FENÓMENOS T-H-M EN ALMACENAMIENTOS DE RESIDUOS RADIOACTIVOS. CARACTERIZACIÓN EN LABORATORIO DEL MATERIAL DE BARRERA.....	2-1
2.1 Introducción.....	2-1
2.2 Análisis del comportamiento de una barrera de arcilla.....	2-1
2.3 Justificación del programa de ensayos.....	2-6
2.4 Técnicas experimentales disponibles.....	2-12
2.4.1 Ensayos para la obtención de la curva de retención.....	2-12
2.4.2 Ensayos edométricos con control de succión.....	2-15
2.4.3 Ensayos de medida de la dilatación térmica.....	2-16
2.4.4 Ensayos de medida de la permeabilidad no saturada.....	2-16
2.4.5 Ensayos con flujo de calor.....	2-17
3. RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA T-H-M.....	3-1
3.1 Introducción.....	3-1
3.2 Ecuaciones básicas.....	3-1
3.2.1 Ecuaciones de balance.....	3-1
3.2.2 Restricciones de equilibrio.....	3-3
3.2.3 Ecuaciones constitutivas.....	3-4
3.3 Modelo numérico.....	3-12
3.3.1 Introducción.....	3-12
3.3.2 Características de CODE_BRIGHT.....	3-12
3.4 Técnicas de identificación de parámetros.....	3-14
3.4.1 Introducción.....	3-14
3.4.2 Base matemática del método.....	3-17
3.4.2.1 Introducción al problema matemático.....	3-17
3.4.2.2 Formulación del problema estadístico.....	3-17
3.4.2.3 Minimización de la función objetivo. Algoritmos.....	3-20
3.4.2.4 Cuantificación de los errores de medida.....	3-24
3.4.2.5 Análisis de resultados.....	3-28
3.4.3 Estructura del código de identificación de parámetros.....	3-34
4. CARACTERIZACIÓN DEL SUELO UTILIZADO.....	4-1
4.1 Antecedentes.....	4-1
4.1.1 Características del yacimiento.....	4-1
4.1.2 Identificación básica.....	4-4
4.1.3 Caracterización mineralógica y química.....	4-5
4.2 Curva de retención.....	4-6
4.2.1 Curva de retención sin confinamiento a 22°C.....	4-13
4.2.2 Curva de retención sin confinamiento a varias temperaturas.....	4-20
4.2.3 Curva de retención a volumen constante.....	4-23

4.3 Ensayos de hinchamiento bajo carga.....	4-36
4.4 Permeabilidad saturada.....	4-41
4.4.1 Medida directa.....	4-41
4.4.2 Medida indirecta con ensayos edométricos.....	4-42
4.5 Ensayos de columna resonante.....	4-45
5. TÉCNICAS EXPERIMENTALES EMPLEADAS Y RESULTADOS OBTENIDOS.....	5-1
5.1 Introducción.....	5-1
5.2 Ensayos edométricos con succión controlada.....	5-2
5.2.1 Descripción del equipo y preparación de las muestras.....	5-2
5.2.2 Plan de ensayos.....	5-10
5.2.3 Resultados obtenidos.....	5-15
5.3 Medida de la dilatación lineal por cambio de temperatura.....	5-43
5.3.1 Descripción del equipo.....	5-43
5.3.2 Resultados obtenidos.....	5-47
5.4 Ensayos de flujo de calor.....	5-56
5.4.1 Descripción del equipo.....	5-57
5.4.2 Resultados obtenidos.....	5-61
6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS.....	6-1
6.1 Simulación y análisis de ensayos.....	6-1
6.2 Simulación de ensayos edométricos.....	6-1
6.2.1 Simulación del flujo de gas a través de la muestra.....	6-2
6.2.1.1 Descripción del modelo conceptual.....	6-3
6.2.1.2 Resultados obtenidos.....	6-7
6.2.2 Simulación del flujo de gas por las bases de la muestra.....	6-15
6.2.2.1 Descripción del modelo conceptual.....	6-16
6.2.2.2 Resultados obtenidos.....	6-17
6.3 Simulación del ensayo de dilatación térmica.....	6-22
6.3.1 Estudio de la solución analítica.....	6-24
6.3.2 Estudio de la solución numérica.....	6-25
6.3.2.1 Descripción del modelo conceptual.....	6-26
6.3.2.2 Resultados obtenidos.....	6-29
6.4 Simulación del ensayo de flujo de calor sin confinamiento.....	6-37
6.4.1 Estudio de la solución analítica del problema térmico.....	6-37
6.4.2 Estudio de la solución numérica.....	6-46
6.4.2.1 Descripción del modelo conceptual.....	6-49
6.4.2.2 Descripción de los resultados de la simulación: Parte térmica.....	6-51
6.4.2.3 Descripción de los resultados de la simulación: Parte hidráulica.....	6-53
6.4.2.4 Descripción de los resultados de la simulación: Parte mecánica.....	6-58
6.4.3 Retroanálisis del ensayo.....	6-60
6.4.3.1 Caso térmico.....	6-61
6.4.3.2 Caso hidráulico.....	6-69
6.4.3.3 Caso termo-hidráulico.....	6-74

7. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN.....	7-1
7.1 Resumen y conclusiones.....	7-1
7.1.1 Características del material ensayado.....	7-1
7.1.2 Nuevas técnicas experimentales desarrolladas.....	7-3
7.1.2.1 Edómetros con succión controlada.....	7-3
7.1.2.2 Equipo de medida de la dilatación por cambio de temperatura.....	7-4
7.1.2.3 Equipo de aplicación de flujo de calor.....	7-4
7.1.3 Resultados de los ensayos.....	7-5
7.1.3.1 Ensayos edométricos.....	7-5
7.1.3.2 Ensayos de dilatación térmica.....	7-6
7.1.3.3 Ensayos de flujo de calor.....	7-6
7.1.4 Modelación de los ensayos.....	7-7
7.1.4.1 Ensayos edométricos.....	7-7
7.1.3.2 Ensayos de dilatación térmica.....	7-7
7.1.3.3 Ensayos de flujo de calor.....	7-8
7.1.5 Identificación de parámetros.....	7-8
7.2 Líneas futuras de investigación.....	7-10

BIBLIOGRAFÍA

1 INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

El uso de la arcilla como material para la construcción de barreras que frenen el movimiento incontrolado de contaminantes en el suelo, se plantea cada vez con más frecuencia como solución para proteger acuíferos, humedales, zonas urbanas, tierras de cultivo, etc., del vertido de elementos que pueden ser peligrosos para la población vegetal, animal y humana. La principal ventaja del uso de la arcilla es que permite asegurar una durabilidad de la barrera que el uso de materiales sintéticos como el hormigón o los polímeros no tienen, ya que presentan el grave inconveniente de la incertidumbre de su efectividad a lo largo del tiempo. La arcilla, como material geológico formado tras la descomposición de las rocas en procesos que duran centenares de miles de años, garantiza una durabilidad muy superior a cualquier material sintético. Otra ventaja de la arcilla es su baja permeabilidad (menor que la del hormigón en muchos casos) y su bajo coste. Finalmente, el hecho de que la arcilla no se mezcle con componentes sintéticos, convierte las barreras construidas con este material en obras no agresivas al medio ambiente.

El estudio del comportamiento termo-hidro-mecánico (T-H-M) del suelo ha tomado una gran relevancia al plantearse la posible viabilidad de un repositorio subterráneo en un medio rocoso a gran profundidad, con el fin de almacenar los residuos nucleares de alta actividad procedentes de las centrales nucleares de producción de energía eléctrica. Estos residuos se almacenarían en el eje de unas galerías perforadas en un macizo rocoso y, entre la cápsula que contiene el residuo y la pared rocosa, se colocaría una barrera de arcilla expansiva. Los residuos emiten energía en forma de calor y el macizo, por estar a gran profundidad, se encontraría saturado de agua, lo que asegura que la barrera se sature, que la arcilla se expanda y se selle el repositorio.

Tradicionalmente, el comportamiento T-H-M de los suelos se ha estudiado para resolver los distintos problemas técnicos que se plantean cuando se trata de aprovechar un recurso natural o realizar una obra. El más conocido es el flujo de calor de origen geotérmico en el suelo. Hay numerosos estudios sobre el aprovechamiento de la energía geotérmica para calefacción y producción de energía eléctrica (Armstead y Christopher, 1978; Harsh, 1980).

También se han realizado estudios sobre aprovechamiento de energía geotérmica en Cataluña (Albert, 1988).

En países fríos, en los cuales hay largos períodos de tiempo con temperaturas bajo cero durante el año, se hace necesario estudiar el efecto de la congelación del agua. Este fenómeno influye en el comportamiento de terraplenes y pedraplenes de carretera o ferrocarril. La congelación provoca levantamientos del pavimento al aumentar el agua de volumen y, cuando se produce el deshielo, el suelo se ablanda y se producen asientos relativamente bruscos, blandones y roderas en el firme. Estos efectos afectan mucho a la durabilidad de una obra. La congelación también puede provocar deformaciones laterales en muros o provocar asientos diferenciales en edificios cuando el agua aumenta su volumen. En Andersland y Anderson (1978) se define el concepto de permafrost, que es un área de terreno donde durante todo el año existen capas del subsuelo congeladas. El área del planeta afectada por el permafrost de una manera más o menos importante se extiende, en el hemisferio norte, a vastas regiones en Estados Unidos, Rusia, Europa central, China, la península escandinava, etc.

También es importante conocer el comportamiento T-H-M del suelo cuando se congela de manera artificial. Esta técnica, que nace en la minería, consiste en congelar el agua del suelo de manera provisional para estabilizarlo cuando éste es demasiado blando y hacerlo de manera convencional es inviable, para recalzar una estructura mientras se repara la cimentación o para evitar la entrada de agua en una excavación cuando el procedimiento de bombear el agua no es posible (Harris, 1995).

Los fenómenos T-H-M en arcillas expansivas revisten gran complejidad, esto hace que sea necesario recurrir a modelos conceptuales sumamente complejos, con muchos parámetros ligados a los distintos procesos de flujo de calor y agua y cambio de volumen. Por ejemplo, en la barrera descrita anteriormente, la arcilla que la conforma está sometida a un aporte de calor al estar en contacto con el residuo y a un aporte de agua en el contacto con la pared rocosa, lo que provoca una serie de gradientes térmicos e hidráulicos que producen movimiento de vapor, agua líquida, calor y deformaciones. Todos estos fenómenos están acoplados entre sí.

En la modelación T-H-M de un fenómeno como el que se describe anteriormente, el número de parámetros necesarios para caracterizar el material puede ser muy elevado (10-20). Algunos de estos parámetros o propiedades se pueden determinar directamente a partir de ensayos de laboratorio especialmente diseñados para ello, como por ejemplo, la conductividad hidráulica saturada y su variación con la densidad seca o la curva de retención y su variación con la temperatura. Sin embargo, hay otros parámetros que no pueden ser determinados directamente a partir de ensayos, como son la variación de la permeabilidad con el grado de saturación o la tortuosidad, uno de los factores que determina el flujo de vapor no advectivo.

En los casos en que los parámetros no se puedan determinar directamente, se debe realizar un retroanálisis a partir de los resultados obtenidos con equipos de laboratorio especialmente diseñados para ello. Para hacerlo, es necesario simular los ensayos de laboratorio con ayuda de un modelo numérico basado en un código de elementos finitos y minimizar la diferencia entre lo que se mide en el laboratorio y lo estimado por el modelo con unos determinados parámetros. Normalmente, la deducción de los parámetros que mejor se ajustan a lo medido se realiza con el método de prueba y error, ya que la mayor parte de los códigos de elementos finitos no están preparados para resolver el problema inverso.

El método de prueba y error es complicado si no se tiene mucha experiencia. Además, cuando la cantidad de parámetros se hace importante (más de tres), es prácticamente imposible seguir una lógica sistemática de búsqueda. Las modernas técnicas de identificación de parámetros son entonces de gran utilidad. El planteamiento estadístico del problema de identificación de parámetros permite extender el análisis a la identificación de modelos, aunque no es objetivo de esta tesis extenderse en este problema. Es importante resaltar que se cometería un grave error si se pensara que este método automatizado elimina totalmente la labor del investigador a la hora de obtener parámetros que definan el comportamiento del material. No cabe duda que la nueva herramienta numérica será de gran ayuda, pero como se verá más adelante, el usuario debe conocer en base a la experiencia propia o ajena los valores previos de parámetros, criterios de convergencia, incrementos de parámetros para calcular derivadas numéricamente. No siempre se va a poder llegar a una solución satisfactoria, ya que pueden existir errores importantes en las medidas, condiciones de contorno erróneas, búsqueda de parámetros inidentificables, etc. Será el criterio del usuario el que decida el camino a tomar y el que deberá valorar los resultados del laboratorio y la información previa de que disponga.

Otro aspecto importante de la utilización de modelos numéricos es el análisis de ensayos de laboratorio bajo el punto de vista estrictamente conceptual. La introducción de un cambio en el método o en el equipo a utilizar en un ensayo puede alterar los procesos que tienen lugar en el mismo, potenciando fenómenos cuyos efectos, dada la complejidad del material, son difíciles de predecir y, en algunos casos, pueden inutilizar el propio ensayo. La introducción del análisis numérico en el diseño de equipos de laboratorio y de procedimientos de ensayo nuevos puede ayudar a evitar los efectos citados anteriormente.

1.2 OBJETIVOS DE LA TESIS

El objetivo subyacente en la Tesis ha sido el de caracterizar experimentalmente en el laboratorio el comportamiento termo-hidro-mecánico de la bentonita del Cabo de Gata. Esta arcilla compactada a alta densidad, es utilizada por ENRESA en sus experimentos a escala real para avanzar en el desarrollo de la tecnología necesaria para la construcción de un almacenamiento de residuos nucleares de alta actividad.

Este trabajo experimental tiene, a su vez, dos objetivos parciales:

A) Estudiar los fenómenos que tienen lugar en la bentonita sometida a cambios de tensión, cambios de succión o de temperatura y profundizar en el conocimiento de los mismos.

B) Establecer el valor de los parámetros y propiedades que caracterizan el comportamiento del material con el fin de que puedan servir de punto de partida en la modelación de los mencionados experimentos a escala real.

Dadas las especiales características del material a ensayar, para alcanzar estos objetivos ha sido necesario desarrollar nuevos equipos y procedimientos de ensayo. Los nuevos equipos se han diseñado, por una parte, para poner de manifiesto los fenómenos a estudiar (por ejemplo, la dilatación por efecto térmico o el efecto de un flujo de calor en la arcilla parcialmente saturada) y, por otra, para tratar de optimizar el proceso de ensayo como se ha hecho en el caso de la aplicación de un flujo forzado de aire húmedo para controlar la succión en los ensayos edométricos con succión controlada.

Otro de los objetivos parciales de la Tesis ha sido la modelación numérica de alguno de los ensayos realizados en el laboratorio.

Dada la complejidad de los procesos, muchos aspectos importantes de los fenómenos que tienen en los ensayos de laboratorio no son observables directamente, por ejemplo, este es el caso del flujo de vapor, la evolución de la succión en un ensayo de flujo de calor o de agua, la importancia relativa del flujo de agua en fase líquida o de vapor, etc. En estos casos, la utilización de un modelo numérico que trate de reproducir el ensayo, estudiándolo como un problema de contorno, permite evaluar todos esos aspectos que no se pueden medir.

La utilidad de la modelación numérica de los ensayos es múltiple, por una parte permite profundizar en el entendimiento de los procesos que tienen lugar en el ensayo, por otra permite obtener parámetros físicos del modelo mediante retroanálisis de los resultados del ensayo y finalmente permite validar la bondad del modelo matemático para reproducir los fenómenos que se pretenden modelar en el estudio de las barreras.

Algunas de las propiedades que caracterizan el comportamiento de la bentonita no se pueden obtener directamente. Sin embargo, la modelación de los ensayos permite utilizar las técnicas de identificación de parámetros para la caracterización de dichas propiedades. El último objetivo parcial de la Tesis ha sido el desarrollar una metodología basada en el empleo de esas técnicas para la obtención sistemática de los parámetros que caracterizan el comportamiento de la bentonita. La utilización de un enfoque probabilista en las técnicas de identificación de parámetros, no solamente permite obtener el valor óptimo de los mismos sino que además permite valorar la fiabilidad de los mismos y conocer las posibles correlaciones existentes entre ellos.

1.3 ORGANIZACIÓN Y CONTENIDO DE LA TESIS

La tesis está compuesta de seis capítulos más. El capítulo 2 está dedicado a la descripción de los fenómenos T-H-M que tienen lugar en una barrera arcillosa. También se incluye la descripción de las técnicas de laboratorio actualmente disponibles.

En el capítulo 3 se describen los modelos constitutivos que se han utilizado en esta tesis para analizar los ensayos realizados y se exponen brevemente las técnicas numéricas empleadas por el código de elementos finitos utilizado (CODE_BRIGTH). Seguidamente se exponen las bases teóricas de las técnicas de identificación de parámetros utilizadas en la tesis planteado con detalle el problema de minimización de funciones y, seguidamente, se pasa a estudiar la cuantificación de los errores cometidos en la medida de las variables y la información que se puede extraer sobre la calibración del modelo a partir de los resultados añadidos que proporciona el enfoque probabilístico del problema. Finalmente se comenta brevemente el procedimiento de implementación de estas técnicas desarrollado en este Tesis.

El capítulo 4 presenta una descripción detallada del material utilizado, una bentonita procedente del Cabo de Gata (zona del Cortijo de Archidona) empleada en el proyecto FEBEX (Full-scale Engineered Barriers Experiment. ENRESA (2000), coordinado por ENRESA (Empresa Nacional de Residuos Radioactivos, S.A.) en el que participan tres países de la Unión Europea (España, Francia y Alemania) y Suiza. En este capítulo también se incorporan los resultados obtenidos en los diversos ensayos convencionales de caracterización realizados en el marco de desarrollo de la tesis.

En el capítulo 5 se describen los ensayos edométricos, los ensayos de aumento de temperatura homogéneo en muestras no confinadas con humedad constante y los ensayos de flujo de calor a lo largo de muestras en las mismas condiciones. En el capítulo se describen los equipos utilizados en la Tesis y se exponen los resultados de los ensayos.

En el capítulo 6 se analizan los resultados obtenidos en los ensayos descritos en el capítulo 5 y se aplican las técnicas de identificación de parámetros descritas en el capítulo 3. Se trata de un capítulo importante aunque hay que señalar que esta tesis no está centrada exclusivamente en la calibración de modelos sino también en el desarrollo de equipos y nuevas técnicas experimentales para la caracterización del comportamiento de suelos expansivos.

En el capítulo 7 se presentan una serie de conclusiones y se sugieren futuras líneas de investigación.

2. FENÓMENOS T-H-M EN ALMACENAMIENTOS DE RESIDUOS RADIOACTIVOS. CARACTERIZACIÓN EN LABORATORIO DEL MATERIAL DE BARRERA

2.1 INTRODUCCIÓN

Con la utilización de modelos se pretende resolver problemas simplificando la realidad. Los modelos se fundamentan en la observación de la evolución de un proceso natural determinado, observando qué ocurre a medida que se va desarrollando, qué factores le influyen, cómo reacciona cuando se producen perturbaciones, tanto en el interior del dominio donde éste se desarrolla como en el contorno, cómo influyen las condiciones iniciales, etc. Posteriormente, se deben cuantificar los fenómenos identificados y deducir las ecuaciones que los rigen (modelo físico-matemático). Finalmente, se obtiene un sistema de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, con unas condiciones de contorno y unas condiciones iniciales que deberán resolverse empleando técnicas numéricas (Olivella et al., 1994). En el caso del comportamiento termo-hidro-mecánico de las barreras de arcilla, la solución del sistema descrito proporcionará la evolución en el tiempo de las variables que rigen el problema (presión de agua, presión de gas, temperatura y desplazamientos) en cada punto de la barrera.

En este contexto los ensayos de laboratorio tienen dos funciones básicas:

- Obtener pautas de comportamiento que permitan establecer modelos o confirmar la bondad de los mismos.
- Obtener parámetros necesarios en los modelos para realizar sus predicciones.

2.2 ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE UNA BARRERA DE ARCILLA

Como se ha descrito brevemente en la introducción, según el concepto español de almacenamiento geológico profundo (AGP) de residuos radioactivos de alta actividad (RAA) (ENRESA, 1994; ENRESA, 1995), el repositorio de residuos radioactivos consistirá en una serie de galerías excavadas en una roca o en un suelo a gran profundidad. En el eje de la galería se colocarán las cápsulas que contienen los residuos radioactivos en su interior. El espacio comprendido entre el encapsulado y la roca de la pared se rellenará con unos bloques de arcilla expansiva compactada.

En lo que se refiere al comportamiento de la arcilla, se deberán conocer los distintos procesos que tienen lugar en ésta cuando se la somete a las condiciones de trabajo que se describen a continuación. Para ello, habrá que analizar los fenómenos que se producen en el conjunto encapsulado-arcilla-roca y estudiar las ecuaciones diferenciales que los rigen. Éstos son:

- Transporte de calor: El residuo radioactivo es una fuente de calor que se disipa aumentando la temperatura del entorno. La disipación de calor se va a producir por conducción (flujo conductivo a través de la arcilla debido al gradiente de temperatura), por advección (transporte de calor debido al flujo de agua, tanto en forma de vapor o líquida, y al flujo de aire, tanto en forma de gas como disuelto en el agua) y por radiación (de importancia mucho menor que los anteriores). Estos fenómenos de transporte de calor están acoplados con los flujos de líquido y de gas.

- Flujo de agua: El agua va a circular a través de la barrera de arcilla debido a dos causas: Una va a ser debida al aporte de agua procedente de la roca circundante. Este flujo es advectivo y se debe a la diferencia de presión de agua entre la roca y la arcilla. El otro motivo es que desde la zona de la barrera cercana al contenedor del residuo va a haber migración de agua en forma de vapor hacia el contorno rocoso. Este flujo es advectivo si existen gradientes de presión de gas, debido a que el agua en forma de vapor forma parte de la mezcla gaseosa en movimiento. Dentro de la fase gaseosa, existe además un flujo no advectivo debido a gradientes de fracción másica de vapor en el gas. Este movimiento de vapor está ligado a la difusión molecular y a la dispersión mecánica. Todos estos fenómenos están acoplados. Si la temperatura aumenta de tal modo que la presión de vapor se iguala a la presión de gas, se producirá la ebullición del agua.

- Flujo de aire: El aire va a circular debido a gradientes de presión de gas al ser éste una mezcla de vapor y aire. El flujo no advectivo de aire es complementario al de vapor y la suma de ambos es nula. El aire también forma parte de la fase líquida al estar disuelto en el agua y, por tanto, se mueve con ésta. Si no hay fugas a través del macizo rocoso en las condiciones ideales de funcionamiento del repositorio, el aire se va a ir disolviendo en el agua hasta desaparecer cuando la barrera esté completamente saturada.

- Comportamiento mecánico: La arcilla tendrá un estado tensional inicial debido a su peso propio. A medida que el agua fluye del macizo rocoso a la misma, la zona de la barrera en contacto con la roca hinchará hasta que se llenen todos los huecos que puedan haber (juntas entre bloques y el hueco en la clave debida al peso propio). La arcilla tenderá a seguir hidratándose pero tendrá los desplazamientos impedidos debido a la presencia de la roca, muy rígida, y empezará a entrar en carga, aumentando su compresión. En el contacto con el calentador, la arcilla empezará a retraer por la migración del agua, posteriormente tenderá a deformarse hacia el interior debido al empuje provocado por el aumento de volumen de la arcilla que se hidrata en el contorno. Finalmente se hidratará por la llegada de agua del macizo y se expandirá, comprimiendo la arcilla del contorno exterior. Todos estos procesos están acoplados con la expansión térmica, tanto del macizo como de la arcilla.

Hay tres puntos importantes en este tipo de barreras que no van a tratarse aquí pero que es importante tenerlos en cuenta en el diseño de estas barreras:

- Generación de gases en el interior de la barrera por la degeneración de los materiales que componen la cápsula metálica que contiene los residuos. Estos gases no pueden salir por estar confinados en la barrera de arcilla cuando ésta alcanza la saturación, por lo que existe la posibilidad de que se genere una fractura hidráulica en el seno de ésta y aparezca una vía preferente de fuga de contaminantes (Graham et al., 1998).

- Proceso de cambio mineralógico de la arcilla: La arcilla estudiada es una montmorillonita que a altas temperaturas se transforma en illita. Este fenómeno puede ocurrir al alcanzar la arcilla los 120 grados centígrados (ENRESA, 1997). Este proceso de cambio dura entre centenares de miles a millones de años.

- Interacción entre los radionucleidos y la barrera de arcilla: Es un efecto favorable, ya que retarda la migración de los mismos al quedar fijados (adsorbidos) a la arcilla o a la roca que forma el macizo (Zimmie y Mahmud, 1994).

Los fenómenos termo-hidro-mecánicos que se van a producir en una barrera de arcilla van a depender de las condiciones de contorno a las que esté sometida. La barrera está situada en un entorno natural donde estas condiciones no serán sencillas de determinar. En el

contacto roca-arcilla se va a tener un flujo de agua de la roca a la arcilla. Este flujo se debe a la diferencia de presión de agua entre ambos materiales. La arcilla, al no estar saturada, tiene un potencial de agua negativo mientras que la roca se va a encontrar saturada, con presiones de agua positivas. Una vez se selle el repositorio, el macizo empezará a saturar la galería. Las condiciones de saturación dependerán de los valores relativos de la permeabilidad del macizo y de la barrera. Si el macizo es muy permeable la velocidad de situación estará controlada por la infiltración en la arcilla (que dependerá fundamentalmente de su permeabilidad y del espesor de la barrera), en cambio si la permeabilidad de la roca es muy baja, las condiciones de flujo en el macizo rocoso son las que rigen la velocidad de infiltración. En este último caso, el papel de la zona de roca alterada alrededor de la excavación de la galería (EDZ) puede jugar un papel importante en el desarrollo de la saturación de la arcilla (Alonso et al., 2001). En el contacto entre la roca y la arcilla se puede producir una desaturación complementaria al tener la arcilla una presión de líquido por debajo de la presión de líquido de la roca. Esta posible desaturación dependerá principalmente de las propiedades hidráulicas de ambos materiales. De lo anterior se deduce que no pueden fijarse condiciones de contorno en el contacto roca-arcilla, por lo que se deberán fijar en un entorno suficientemente alejado de la barrera, donde la presencia de ésta no modifique de manera significativa el estado del macizo. Este hecho implica que el análisis de la barrera debe extenderse también a la roca, por lo que también deberán conocerse las propiedades termo-hidro-mecánicas de ésta.

Las condiciones de contorno que se producen en una barrera de arcilla son relativamente sencillas de describir en el contacto con las cápsulas que contienen los residuos, ya que se reducen a una inyección de calor, un flujo nulo de agua y unos desplazamientos coaccionados (alta rigidez del encapsulado del residuo). Esta última condición puede ser errónea en las primeras fases de existencia del repositorio, donde la retracción producida por la migración de agua en forma de vapor, puede “despegar” la arcilla del encapsulado. También hay que tener en cuenta que si la entrada de agua del macizo no es simétrica, el contorno interior puede moverse.

La temperatura inicial del repositorio será parecida a la del macizo antes de excavar la galería donde se almacenarán los residuos, las diferencias que puedan haber se deberán a la influencia de la excavación. La presión inicial de agua del macizo y de la arcilla se pueden conocer midiéndola en el caso de la roca o deduciéndola de la curva de retención en el caso

de la arcilla, ya que se puede medir su densidad seca y su humedad. Las tensiones iniciales de la barrera de arcilla se deben al peso propio.

Se han publicado numerosos trabajos sobre el comportamiento de este tipo de barreras. Pollock (1986) presenta un interesante estudio sobre el flujo de agua, aire y calor en un aluvial no saturado. Se formulan las ecuaciones de balance de agua, aire y calor, las restricciones de equilibrio y las ecuaciones constitutivas, resolviéndolas por el método de los elementos finitos para un caso unidimensional; analiza dos casos con condiciones iniciales y de contorno distintas. En Radhakrishna et al., (1992) se presenta el desarrollo de un código de diferencias finitas que resuelve las ecuaciones de flujo de agua y calor, presenta 5 casos sintéticos donde se estudia la evolución de las variables (temperatura y contenido volumétrico de agua), posteriormente se calibra el modelo con un ensayo de laboratorio y otro “in situ”. En Ma y Hueckel (1992), se presenta un estudio numérico sobre el comportamiento del agua adsorbida en una arcilla saturada, cómo evoluciona mientras disminuye el aporte de calor debido a la desintegración de los radionucleidos y qué efectos tiene sobre la barrera arcillosa. Para ello se utiliza un modelo termoelástico de consolidación acoplado con el problema hidráulico que tiene en cuenta la pérdida de agua adsorbida. Es un estudio interesante que trata el problema de la deshidratación con la temperatura de la arcilla, que implica un aumento de la permeabilidad. En Thomas et al. (1994), se presenta un trabajo experimental y numérico sobre la hidratación de una columna de arcilla de Boom, donde se describen las ecuaciones de flujo de agua, aire y calor (la modelación no incluye la parte mecánica) y se describe también el ensayo y el método para obtener la humedad: un edómetro con las deformaciones verticales impedidas donde se inyecta agua por la base y se mantiene la parte superior en condiciones atmosféricas. La evolución espacial de la humedad se mide con tomografías. Obtienen un buen ajuste de la humedad medida con la calculada, por lo que se deduce que en este caso, apenas hay acoplamiento mecánico.

Los parámetros que rigen el comportamiento de la arcilla pueden ser deducidos a partir de ensayos en el laboratorio o de los datos de un ensayo in situ Honjo y Thavaraj (1994). En Thomas y He (1995) presentan un análisis sobre el flujo de calor, agua y aire en un suelo; para ello, resuelven las ecuaciones de balance de masa, calor y momentum con el método de los elementos finitos. Las ecuaciones constitutivas que utilizan para el suelo se basan en el modelo de las superficies de estado. Posteriormente presenta un caso sintético y

un ajuste numérico a partir de un ensayo de laboratorio. Gera et al. (1996) analizan los aspectos críticos en la modelación termo-hidro-mecánica de una barrera arcillosa, como son la evolución de las deformaciones producidas por cambios de tensión y de temperatura en el esqueleto sólido, fluidos intersticiales (agua adsorbida que pasa a la fase líquida por el aumento de temperatura y la posible reversibilidad del proceso) y mineralógicos (cambio de smectita a illita por el aporte de calor y su posible reversibilidad, retardo de los radionucleidos al interactuar con los minerales arcillosos). Propone también estudiar fenómenos naturales en los que haya habido un aporte de calor a un depósito arcilloso, como puede ser la intrusión de un batolito.

Alonso et al. (1998) utilizan el modelo elasto plástico desarrollado en Barcelona para suelos no saturados con un análisis acoplado con el flujo de agua y gas del experimento Bacchus 2 en Mol (Bélgica), Alonso et al. (1998). En Gens et al. (1998) se presenta un análisis T-H-M de un repositorio nuclear formado por una galería excavada en granito, donde el residuo se coloca en el eje de la galería y entre éste y la roca se coloca una barrera formada por bloques de arcilla expansiva compactada. Se modela el comportamiento de la barrera y de la roca con una malla unidimensional. Se resuelven las ecuaciones de balance de calor, agua, aire y equilibrio de fuerzas mediante el método de los elementos finitos. El modelo mecánico utilizado para la arcilla es el de las superficies de estado, mientras que el del granito es un modelo elástico lineal. Realizan una serie de análisis para verificar la influencia del flujo de vapor, la curva de retención del granito y la ausencia de inyección de calor. Komine y Ogata (1998), presentan un estudio experimental sobre la influencia de los cambios de temperatura en la capacidad de hinchamiento de una muestra en el que describen un modelo de repositorio nuclear.

2.3 JUSTIFICACIÓN DEL PROGRAMA DE ENSAYOS

En el contexto del estudio y modelación del comportamiento de las barreras de arcilla, los ensayos de laboratorio obedecen a tres motivos distintos:

- 1) Bajo el punto de vista cualitativo, los ensayos de laboratorio permiten la observación de los cambios experimentados por el suelo frente a acciones de tipo termo-hidro-mecánico análogas a las que se puedan desarrollar en un repositorio. Estas acciones se

imponen sobre el suelo en condiciones muy controladas y permiten también calibrar la idoneidad de los modelos teóricos a emplear.

- 2) Bajo el punto de vista cuantitativo, estos ensayos permiten obtener conjuntos de parámetros del modelo teórico por ajuste entre las medidas y las predicciones de los modelos existentes. Para muchos de los parámetros del modelo no existen ensayos que permitan su obtención de manera directa. Por ello, es necesaria la utilización del propio modelo numérico para encontrar el valor de estos parámetros mediante el análisis comparativo entre resultados de dicho modelo y los resultados de los ensayos de laboratorio. Sin embargo, hay que señalar que el acoplamiento entre distintos fenómenos hace que estos retroanálisis conduzcan a conjuntos de parámetros que, pudiendo ser diferentes entre sí, pueden reproducir de manera similar el comportamiento del suelo observado en los ensayos. En estos casos, el criterio del investigador que realiza el análisis juega un papel fundamental.

- 3) Finalmente, se pretende avanzar en el conocimiento del comportamiento termo-hidro-mecánico de las arcillas expansivas. Se trata de realizar también ensayos encaminados a profundizar en las bases teóricas del comportamiento de la arcilla, que permitan completar y, en su caso, mejorar los modelos teóricos que se utilizan actualmente.

Para estudiar la viabilidad de un repositorio de residuos nucleares a gran profundidad, ENRESA (Empresa Nacional de Residuos Radioactivos) organizó, dentro de su programa I+D y en el marco de los programas de investigación de la Unión Europea, el proyecto FEBEX (Full-scale Engineered Barriers Experiment). El proyecto cuenta con un ensayo a escala real en un macizo granítico en Grimsel (Suiza), un ensayo a escala reducida (mock-up) que se realiza en las instalaciones de CIEMAT en Madrid y un programa de ensayos de laboratorio que, junto la modelación de los ensayos mencionados anteriormente, proporcionará la información necesaria para asegurar la viabilidad o no de este tipo de barreras.

Para llevar a cabo este tipo de ensayos se hizo necesario el desarrollo y puesta a punto de nuevos equipos y técnicas de ensayo. Los ensayos realizados y su justificación se presentan a continuación:

- Ensayos para la obtención de la curva de retención: El análisis del comportamiento de barreras arcillosas pone de manifiesto que esta relación juega un papel fundamental en la evolución y distribución del contenido de agua en una barrera de arcilla (Gens et al., 1998; Gens et al., 1997; Van Impe y Bouazza, 1996; Roussety Giraud, 1996; Thomas et al., 1994) o en un aluvial (Pollock, 1986). Esta relación es importante en todos los procesos de movimiento de agua en medios no saturados, como pueden ser el movimiento de agua hacia la superficie provocado por la evaporación (Christopher y Milly, 1982) o la aparición de fisuras en una arcilla por desecación (Mikulisch y Gudehus, 1995; Bronswijk, 1988). La curva de retención juega un papel muy relevante cuando se trata de cuantificar el flujo de líquido y gas en la barrera al influir tanto en los gradientes que se generan y que provocan el movimiento de las especies en el seno de la misma como en el valor de la permeabilidad relativa, que en este material, se aproxima a una función exponencial que tiene como base el grado de saturación. Es importante conocerla con precisión en un amplio intervalo de humedad que incluye puntos próximos a la saturación total (entrada de aire en los poros) al ser una situación que se va a producir en todos los puntos de la barrera cuando ésta se sature y puntos con humedad casi nula (contenido de agua residual), situación que se producirá tan pronto como la arcilla entre en contacto con el encapsulado que contiene los residuos, que emitirán calor. Otro aspecto que se debe estudiar es la histéresis. El motivo es que la barrera va a estar sometida a ciclos de secado-humedecimiento en el contacto con el encapsulado: primero la arcilla se secará por el calor generado por los residuos y posteriormente se saturará al llegar el agua del macizo. La histéresis se ha estudiado tanto en trayectorias mojado-secado como secado-mojado. Se ensayaron trayectorias con densidades secas iniciales distintas para poder estudiar la sensibilidad de esta variable en la curva de retención. El efecto de la temperatura se estimó con ensayos de curva de retención con hinchamiento libre a varias temperaturas. Puesto que la arcilla estudiada en esta tesis presenta grandes cambios de volumen ante cambios en su grado de saturación, es de esperar que se produzcan cambios microestructurales que alteran la forma de la curva de retención. Por este motivo se realizaron ensayos para obtener la curva de retención a volumen constante. Durante una primera fase, la barrera de arcilla en contacto con el macizo expande libremente al entrar el agua procedente de éste hasta sellar todas las juntas que puedan haber. Posteriormente en una segunda fase, una vez sellada la barrera, la arcilla seguirá hidratándose aunque no podrá aumentar su volumen, por lo que aumentará su tensión de compresión. Por tanto, puede decirse que en la mayor parte de la arcilla la hidratación se produce a volumen constante.

- Ensayos para la obtención de la permeabilidad saturada: La permeabilidad saturada es el parámetro que regula la capacidad de transporte de agua en un medio saturado. Las barreras arcillosas acabarán saturándose con el tiempo, por lo que es necesario conocer este parámetro para cuantificar el movimiento del agua cuando el encapsulado que rodea los residuos haya perdido su efectividad como barrera, tal como está previsto al tratarse de materiales sintéticos de durabilidad limitada. Villar (2000) realizó una serie de ensayos para medir este coeficiente en muestras compactadas a distintas densidades secas, con lo que este parámetro está bien caracterizado. No obstante, en esta tesis se han realizado varios ensayos edométricos a partir de los cuales se ha deducido el valor de la permeabilidad para un amplio intervalo de porosidades. También se realizó un ensayo de medida directa.

- Ensayos para obtener la permeabilidad no saturada: Desde que se sella el repositorio tras colocar los residuos hasta que queda totalmente saturado, el movimiento del agua líquida depende fundamentalmente de la permeabilidad no saturada. Existen una serie de leyes que relacionan el grado de saturación, la curva de retención o el contenido volumétrico de agua y la permeabilidad saturada con la permeabilidad no saturada (Leong y Rahardjo, 1997; Fredlund et al., 1994; Van Genuchten, 1980). No se han realizado ensayos para obtener la permeabilidad no saturada en el marco de esta tesis, aunque existen datos procedentes del retroanálisis (Lloret et al., 1999) realizado por el autor de esta tesis con datos procedentes de ensayos de infiltración efectuados por Villar (SCK-CEN, 1994) y por el autor de esta tesis (Lloret et al., 1999). Sin embargo, esta permeabilidad se pudo estimar a partir de ensayos de conductividad térmica sin confinamiento, donde existe flujo de agua en forma de vapor desde el extremo caliente al frío y flujo de agua líquida en sentido inverso, como se verá más adelante.

- Ensayos edométricos con succión controlada: El análisis del comportamiento de una barrera arcillosa que deba albergar residuos radioactivos (Gens et al., 1998; Gens et al., 1997), revela una serie de cambios en el estado tensional debidos a la entrada del agua procedente del macizo y, en menor medida, al aporte de calor de los residuos. La entrada del agua provoca el hinchamiento libre de la arcilla (se sellan los espacios entre bloques) y, posteriormente, se produce un aumento de las tensiones al quedar confinada mientras sigue entrando agua del macizo. El aporte de calor seca la arcilla y se ésta retrae. Estos cambios en

el contenido de humedad y en el estado de tensiones, se analizaron en base a los resultados de ensayos edométricos con succión controlada a temperatura ambiente, en los que se imponía a las muestras distintas trayectorias de secado-humedecimiento y carga-descarga que se espera se produzcan en una barrera. Estos ensayos ayudan a cuantificar los parámetros del modelo mecánico que relacionan tensiones, deformaciones y cambios de humedad. En esta tesis no se ha llegado a estudiar el efecto de la temperatura en el comportamiento mecánico de la bentonita. Este tipo de ensayos también son importantes para estudiar los distintos modelos que existen bajo un punto de vista cualitativo. Los trabajos publicados sobre el comportamiento de suelos no saturados (Alonso et al., 1999; Shuai y Fredlund 1998; Wheeler, 1996; Bolzon et al., 1996; Alonso et al., 1994; Alonso y Gens, 1992) presentan modelos de comportamiento muy complejos que abarcan una casuística muy extensa. Los trabajos experimentales realizados son escasos y los modelos no se pueden validar para muchas de las trayectorias que se pueden producir en una arcilla. Los ensayos edométricos con succión controlada realizados en esta tesis proporcionan una información interesante para validar modelos con trayectorias que posteriormente pueden producirse en una barrera.

- Ensayos de presión de hinchamiento: La capacidad de hinchamiento de la arcilla y la tensión que alcance una vez la barrera se haya hidratado, es muy importante a la hora de dimensionar el encapsulado que deberá contener los residuos (deberán resistir la tensión a la que van a estar sometidos), al fijar la densidad y contenido de humedad de los bloques que conformen la barrera (parámetros que condicionan la capacidad de hinchamiento y la tensión final que alcanzará la barrera) y las características mecánicas del entorno que va a albergar el repositorio (al igual que el encapsulado, deberá resistir la tensión debida al hinchamiento de la arcilla). Por ser un parámetro importante en el comportamiento de las arcillas, se han realizado multitud de trabajos para determinarlo (Komine y Ogata, 1996; Serratrice y Soyez, 1996; Josseaume et al., 1991).

- Ensayos de dilatación térmica: La mayor parte de los cambios de volumen que se producen en la arcilla que forma una barrera se deben a los procesos de cambio de su grado de saturación (hidratación o secado) y a cambios en su estado tensional. Sin embargo, es interesante conocer también el efecto del cambio de volumen provocado por los cambios de temperatura. Estos cambios derivan a su vez un cambio de volumen en las fases, en el esqueleto y un cambio de succión con su correspondiente cambio de volumen. Todos estos

procesos están acoplados. En esta Tesis se han realizado ensayos de medida de la dilatación térmica en muestras de arcilla con diferentes densidades y humedades sin confinamiento mecánico y humedad constante durante el ensayo.

- Ensayos de inyección de calor sin confinamiento: En las fases iniciales de hidratación de la barrera, los bloques de arcilla pueden expandir o retraer libremente. La arcilla situada cerca de los residuos tardará cierto tiempo en hidratarse con el agua procedente del macizo, mientras que estará sometida a un aporte de calor importante. Con el fin de estudiar su comportamiento, se hizo necesario realizar ensayos en los que se inyecta calor en el extremo de una probeta manteniéndola aislada térmica e hidráulicamente y sin presión de confinamiento. Con este ensayo, se puede estudiar la evolución de la temperatura y obtener el calor específico y el coeficiente de dilatación térmica. Dado que el material está no saturado y existen gradientes importantes de temperatura, y por tanto, de presión de vapor existirá un elevado flujo de vapor que alterará la distribución de humedad en la muestra. La medida de la distribución de humedad en la muestra permite obtener información acerca de la difusividad del vapor. Se pueden estudiar también los cambios de volumen y de humedad debidos al movimiento de agua inducido por la inyección de calor.

- Ensayos de columna resonante: Como se ha comentado anteriormente, durante la fase de hidratación de la barrera la arcilla se verá sometida a una serie de cambios de volumen y cambios en el estado de tensiones, por lo que se hace necesario conocer los parámetros que rigen el problema mecánico. Los ensayos de columna resonante proporcionan el valor del módulo de deformación tangencial a bajas deformaciones (Pintado, 1993; Suriol, 1993; Qian et al., 1991; Wu et al., 1985).

Es preciso recalcar que estos ensayos no son simulaciones en laboratorio de los procesos que tienen lugar en una barrera sino que en ellos se plantean situaciones donde se desarrollan fenómenos análogos a la barrera pero donde las condiciones de trabajo están controladas. Cualitativamente permiten estudiar el efecto del cambio de variables de estado mediante la observación directa de la reacción del material ante este cambio. La utilización de un modelo permite, además, estimar los cambios experimentados en aquellas variables o en aquellas zonas de las muestras en las que no se han realizado medidas. Cuantitativamente

permite estimar los diferentes parámetros necesarios para la modelación del comportamiento de la barrera.

2.4 TÉCNICAS EXPERIMENTALES DISPONIBLES

El estudio del comportamiento T-H-M de un suelo expansivo en el laboratorio es un problema planteado hace relativamente poco y, por tanto, las técnicas experimentales para realizar este tipo de estudios son escasas. No obstante, parte del programa de trabajo consiste en ensayos T-M y H-M para los cuales sí hay numerosas técnicas disponibles. Aún así, dadas las características de este material (una arcilla muy expansiva con baja permeabilidad), algunas de estas técnicas se utilizaron estableciendo nuevos procedimientos de ensayo.

2.4.1 ENSAYOS PARA LA OBTENCIÓN DE LA CURVA DE RETENCIÓN

La curva de retención es un parámetro fundamental en la descripción del estado y comportamiento de un suelo no saturado (Assouline y Tessier, 1998; Aubertin et al., 1998; Fredlund y Anqing, 1994; Van Genuchten, 1980). Para obtenerla, se puede hacer de dos formas distintas: una sería preparar una muestra con un grado de saturación determinado y medir su succión de manera directa. Para medir la succión, matricial o total, debe utilizarse alguno de los aparatos de medida disponibles en función del intervalo de succión a medir:

- Tensiómetros. Miden la succión matricial en el intervalo de 0 a 70 kPa, aunque Ridley y Burland (1993) desarrollaron uno que permite medir hasta 1.5 MPa. Miden la presión negativa del agua directamente. Para la medida de la presión absoluta del agua en suelos saturados, el principio es el mismo y, como en el caso anterior, la limitación depende de la presión mínima a partir de la cual, el agua empieza a cavitarse (Muraleetharan y Granger, 1999).

- Psicrómetros. Miden la succión total en el intervalo comprendido entre 80 kPa y 4.5 MPa. La medida está basada en la diferencia de temperatura entre un termómetro “seco” situado en el ambiente cuya humedad relativa se quiere medir, y un termómetro “húmedo”, que está en contacto con agua que va evaporándose. El calor de vaporización hace que descienda la temperatura del termómetro húmedo. La diferencia entre ambas temperaturas es

función de la humedad relativa ambiental (Jones et al., 1990; Baker et al., 1973). La humedad relativa ambiental (h_r) se relaciona con la succión (s) a través de la ley psicrométrica:

$$s = \frac{R \times (273.15 + T) \times \rho_l}{M_w} \times \ln(h_r)$$

donde M_w es la masa molecular del agua (0.018 kg/mol), R es la constante de los gases perfectos (8.314 J/molK), ρ_l es la densidad del agua (en kg/m³) y T es la temperatura expresada en grados centígrados.

- Higrómetros capacitivos: Miden el valor de succión total a través de la relación psicrométrica. El intervalo de medida está situado entre el 0 y el 100 % de humedad relativa, aunque el error al medir es alto para humedades por encima del 90 %. Su uso en un intervalo determinado está condicionado al error máximo que se esté dispuesto a tolerar (1% 0-90% y 2% 90-100%, aunque depende del equipo utilizado). Se basan en la variación de la capacidad de un condensador cuando su dieléctrico se humedece. La humedad de este material dieléctrico (un polímero) depende de la humedad relativa del ambiente (Vaisala, 1996; Oldecop, 1999).

- Papel de filtro. Mide la succión matricial en un intervalo entre 0.01 y 100 MPa. La técnica de medida consiste en poner en contacto una muestra de suelo con un pequeño fragmento de papel de filtro. El agua circulará desde el suelo al papel de filtro hasta igualarse la succión de ambos. Calculando la humedad del papel, se puede conocer la succión a partir de una curva de calibración succión-humedad del papel (Houston et al., 1994; Chandler y Gutierrez, 1986).

- Conductividad térmica. Mide la succión matricial. Este método consiste en medir la conductividad térmica de un elemento poroso patrón. Este elemento se pondrá en contacto con un suelo y el agua se moverá hasta que las succiones en la muestra y el elemento poroso sean iguales. Conociendo la variación de la conductividad térmica del patrón con la succión, se conoce la succión del suelo. Este método es parecido al del papel de filtro en su fundamento. (Sattler y Fredlund, 1989).

El segundo procedimiento para deducir la curva de retención es imponer una succión determinada a una muestra de suelo y medir posteriormente tanto sus dimensiones como su humedad para deducir el grado de saturación e ir obteniendo varios puntos de esta relación succión-grado de saturación al variar el valor de la succión impuesta.

La imposición de la succión se puede hacer de múltiples maneras en función del intervalo de succiones en el que se vaya a trabajar, ya que no existe un único método válido para toda la curva de retención. Estos métodos son:

- Técnica de traslación de ejes (se impone la succión matricial): (Romero, 1999; Lloret, 1982; Escario y Sáez, 1973; Chang, 1969; Richards, 1941): Para obtener la curva de retención, se trabaja con placas de succión. Esta técnica viene limitada por la succión a partir de la cual, el aire empieza a desplazar al agua en las piedras porosas (hasta 1.5 MPa, Aubertin et al., 1998; Saez, 1986) o en las membranas de acetato (hasta 10 MPa, Yuk Gehling, 1994; Villar, 1998). Hay que tener en cuenta también que esta técnica requiere trabajar con circuitos de aire sometidos a presiones muy elevadas que pueden resultar peligrosos.

- Succión osmótica (se impone la succión matricial): Esta técnica consiste en poner en contacto el agua de la muestra con una disolución de agua mezclada con un soluto que le impone una succión conocida. Entre la disolución y el suelo, se coloca una membrana que deja pasar el agua pero no el soluto disuelto. Esta técnica está limitada por el tamaño del poro de la membrana, debiéndose trabajar con productos químicos formados por moléculas grandes (polietilenglicol 20000), para que no pasen a través de la membrana (Delage et al., 1998; Delage et al., 1992). La succión máxima que se puede imponer es del orden de 1.5 MPa.

- Humedad relativa controlada (se impone la succión total): Se puede imponer la succión colocando la muestra de suelo en una cámara hermética con la humedad relativa del aire del interior controlada, de esta manera, se conocerá la succión impuesta aplicando la ley psicrométrica (Esteban, 1990). Esta humedad relativa se puede imponer con disoluciones de ácido sulfúrico con concentraciones conocidas (Villar, 2000; Esteban, 1990), con disoluciones de cloruro de sodio a concentraciones conocidas (Romero, 1999) o con disoluciones saturadas de sales (Yahia-Aissa, 1999). Las dos primeras técnicas tienen el inconveniente común de

añadir un error al calcular la concentración del ácido o de la sal y hacer la interpolación que relaciona ésta con la succión ambiental. La técnica del ácido sulfúrico tiene, además, el inconveniente de mezclar el suelo con los sulfatos volátiles que libera la disolución cuando la temperatura es alta.

Un aspecto característico de las arcillas altamente expansivas es que la curva de retención se debe obtener cambiando la humedad de la muestra a volumen constante. Esto se consigue al colocar la muestra en un edómetro que pueda imponer la succión, siguiendo trayectorias de humedecimiento y cargándolo de tal modo que los desplazamientos verticales sean nulos (Villar, 2000) o bien elaborar células rígidas de material poroso de tal modo que dejen circular libremente el agua en forma de vapor pero que impidan deformaciones de la muestra (Villar, 2000 y Yahia-Aissa, 1999).

2.4.2 ENSAYOS EDMÉTRICOS CON CONTROL DE SUCCIÓN

Como se ha dicho anteriormente, las técnicas para imponer la succión en el laboratorio son tres: traslación de ejes, osmótica y control de la humedad relativa ambiental. La arcilla que se estudia todavía tiene altos grados de saturación para las succiones en las cuales, las técnicas de traslación de ejes e imposición de succión osmótica alcanzan su valor máximo de succión aplicable. Esto motivó imponer la succión fijando una humedad relativa en el entorno de la muestra mediante el empleo de una disolución acuosa de ácido sulfúrico (Villar, 2000 y Esteban, 1990). Esta técnica tiene varios inconvenientes: el principal es el tiempo de espera para que el agua del suelo alcance el equilibrio con la humedad ambiental. El mecanismo físico del movimiento del agua desde o hacia la muestra es la difusión del vapor. El proceso de cambio de contenido de agua en la muestra es muy lento y para acelerarlo, se puede hacer circular el gas, con humedad relativa impuesta, por las bases de la muestra. Yahia-Aissa, (1999) utiliza este sistema, aunque para imponer la humedad relativa utiliza disoluciones saturadas de sales o hidróxidos. Este sistema tiene el inconveniente de que se puedan arrastrar partículas de la sal disuelta que pueden depositarse en los tubos por donde circula el aire y en la piedra porosa.

2.4.3 ENSAYOS DE MEDIDA DE LA DILATACIÓN TÉRMICA

Este tipo de ensayos no se han normalizado en suelos expansivos de forma directa, sin embargo, la norma ASTM describe un ensayo para rocas que se ha utilizado como punto de partida para establecer el procedimiento de ensayo desarrollado en esta tesis.

En suelos no muy expansivos sí existen medidas del coeficiente de deformación volumétrica térmica a varias temperaturas y con presiones de confinamiento distintas (Hueckel y Baldi, 1990; Baldi et al., 1988). En Romero (1999), se estudia el fenómeno de la dilatación térmica en ensayos con tensión isotrópica no isotérmica en una cámara triaxial donde se puede controlar la temperatura y la succión por el método de traslación de ejes.

2.4.4 ENSAYOS DE MEDIDA DE LA PERMEABILIDAD NO SATURADA

Existe una gran cantidad de trabajos orientados a medir la permeabilidad no saturada del suelo. Esto es debido a que los contaminantes procedentes de vertederos, los fertilizantes utilizados en la agricultura y en general, agua de que se infiltra en el suelo deben circular a través de un suelo no saturado antes de llegar a los acuíferos. Para estudiar el flujo del agua que va desde la superficie hasta el acuífero, es necesario conocer los parámetros hidráulicos de la capa de suelo no saturada que hay entre ambos.

Romero (1999), mide la permeabilidad no saturada con ensayos edométricos con succión controlada, en trayectorias de secado y humedecimiento bajo tensión vertical neta constante o volumen constante a varias temperaturas. En Diny et al. (1993) presentan dos métodos de medida distintos, uno es el de los perfiles instantáneos y el otro consiste en medir el agua que entra o sale de una muestra no saturada cuando se disminuye o aumenta su succión. En Kanno y Wakamatsu (1992) se describe un ensayo de infiltración para determinar mediante retroanálisis los parámetros hidráulicos y la presión de hinchamiento de una bentonita no saturada.

Hay estudios de la variación del contenido de humedad con el tiempo en ensayos de infiltración. En los ensayos realizados por Angulo et al. (1993), se utiliza el sistema de la espectrometría con rayos gamma. En unos ensayos realizados por Yahia-Aissa (1999), se utiliza un psicrómetro que se introduce en varios puntos de la muestra, el sistema de ensayo permitiría una lectura continua de la succión, para ello, son necesarios tantos psicrómetros como orificios tiene el molde metálico que contiene la muestra y un sistema de adquisición de datos.

El problema del flujo de agua en un medio no saturado también se estudia en hidrogeología. En esta rama de la ingeniería se utiliza mucho el análisis inverso (Jiri et al., 1998; Mous, 1998). En el siguiente capítulo se trata este tema y se referirán trabajos sobre el flujo en medio no saturado en ensayos de laboratorio y ensayos “in situ” donde se aplican técnicas de identificación de parámetros.

2.4.5 ENSAYOS CON FLUJO DE CALOR

Con este tipo de ensayos se pretende estudiar el comportamiento del suelo cuando está sometido a gradientes de temperatura en fase transitoria y en fase estacionaria. Bajo el punto de vista estrictamente térmico, hay procedimientos de ensayo para caracterizar materiales que se van a utilizar como aislantes en edificación (UNE 92202:1989 para determinar la conductividad térmica en materiales aislantes). El problema de la transmisión del calor se estudia con el fin de conocer las propiedades térmicas de nuevos materiales que se usan en la industria astronáutica, aeronáutica, automoción, etc., encontrándose muchos trabajos sobre el tema (Feng y Michealides, 1998; Wu y Hwang, 1998; Martin et al., 1998).

Para la obtención de la conductividad térmica, existe el método de la caja, utilizado para obtener la conductividad térmica en materiales de construcción (Chaker et al., 1998). Conceptualmente, este método se basa en el mismo principio que el ensayo de Darcy para medir la permeabilidad saturada, ya que en condiciones estacionarias, la ecuación constitutiva del flujo de calor (ley de Fourier) y del flujo de agua en un medio saturado (ley de Darcy) tienen expresiones matemáticas idénticas.

El calor específico se puede medir con un calorímetro (Zemansky, 1973). Este aparato aumenta la temperatura de la muestra y cuantifica el calor necesario para ello, el calor específico se deduce fácilmente a partir de su definición. Si no se dispone de alguna de estas dos medidas, se puede deducir a partir de la difusividad térmica (cociente entre la conductividad térmica y el calor específico volumétrico). La medida de la difusividad térmica κ está muy investigada, ya que es el parámetro fundamental de la ecuación del calor $\left(\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \Delta T\right)$. La medida de este parámetro se puede realizar proporcionando calor de manera periódica con una frecuencia y amplitud determinada a una muestra del material que se desea estudiar, midiendo la evolución de la temperatura con el tiempo. La muestra puede ser cilíndrica, inyectar calor en la generatriz con una resistencia y medir la temperatura del interior con termopares (Khendari et al., 1995), también puede ser plana y el calor se proporciona con un láser, midiendo la disipación de calor de manera indirecta al medir la desviación de la trayectoria de un rayo láser que incide paralelo a la superficie de la muestra por el punto de aplicación del calor (Abla et al., 1998; Bertolotti et al., 1993); el método del flash es parecido al anterior y se utiliza con muestras planas muy finas aplicando un pulso de calor (Blum, et al., 1998; Chaker et al., 1998).

El estudio de la conductividad térmica y la capacidad de almacenamiento de calor de los geomateriales, está asociado generalmente a la problemática de la durabilidad de carreteras sometidas a ciclos de hielo-deshielo y al posible aprovechamiento de los suelos como almacén de calor.

Para estudiar el problema de los ciclos de hielo-deshielo, se han realizado trabajos en mezclas bituminosas mezcladas con gravas y para grava-cemento, utilizados en capas de rodadura o subases de carreteras (Boutonnet et al., 1974), desarrollando un equipo donde se inyecta calor a dos muestras enfrentadas y separadas por un calentador para conservar la simetría. Las condiciones de contorno son una inyección de calor constante y una fuga de calor lateral cuasi nula. Otro estudio motivado por la presencia de los ciclos de hielo-deshielo en terraplenes de carretera, es el realizado por Kerston (1941).

También se han realizado trabajos para conocer las propiedades termohidráulicas de un suelo para utilizarlo como almacén de calor o frío (Saix, 1987).

Enfocado a la problemática del repositorio nuclear, Selvadurai (1996) presenta un ensayo de laboratorio que consiste en un prisma de granito de base cuadrada con un hueco interior, este hueco se rellena de arcilla compactada y en el eje se coloca un calentador. El granito está instrumentado con termopares. En el mismo artículo se presenta otro ensayo, aunque por sus dimensiones se puede decir que es un ensayo en “maqueta”, donde se investiga el comportamiento del contacto arcilla-granito, midiendo temperatura y contenido volumétrico de agua.

Un tipo de ensayo que también se ha utilizado para determinar las características térmicas del suelo en el laboratorio se basa en la aplicación de pulsos de calor (Bilskie et al., 1998). Consiste en introducir en el suelo una sonda con un calentador y un termopar y junto a ésta, otra sonda sólo con un termopar. Posteriormente se dan pulsos de calor y se miden los cambios de temperatura. En Evgin y Svec (1988) se presenta una célula de ensayo donde se impone la temperatura en sus dos extremos y se mide la temperatura con termopares en varios puntos de ésta. La porosidad y el contenido volumétrico de agua se deduce a partir del análisis del espectro resultante de barrer la muestra con un scanner de rayos gamma. Este ensayo es interesante al medirse estos dos últimos parámetros sin tener que destruir la muestra.

Un trabajo interesante es el presentado por Thomas et al. (1994), en el que se estudia la conductividad térmica del suelo situado en un fondo marino, tanto en el laboratorio como “in situ”.

Los estudios realizados en arcillas sometidas a gradientes térmicos se han originado por la problemática del almacenamiento de los residuos radioactivos. Se utilizan varios tipos de células de ensayo. En CEC (1994), se presenta una célula cilíndrica metálica rodeada de aislante en cuyo interior se introducía una muestra.

Para simular el comportamiento termo-mecánico de una arcilla confinada, Mohamed et al. (1996) desarrollaron una célula donde se inyecta calor, en la cual, se mide la temperatura en varios puntos de la muestra y la presión de hinchamiento; ambas variables se miden de forma continua. Al finalizar el ensayo, se mide el contenido de humedad cortando la

muestra. La muestra está confinada dentro de una célula de hormigón rodeada por una camisa exterior de metal.

Finalmente, Kanno et al. (1996), desarrollaron una célula donde midieron la conductividad térmica colocando una muestra dentro de una camisa de plexiglás entre dos fuentes de calor a distintas temperaturas y rodeando la muestra de un material aislante. Las temperaturas se miden de manera continua con termopares y la distribución de humedades se mide al acabar el ensayo cortando la muestra.

3. RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA T-H-M

3.1 INTRODUCCIÓN

Los fenómenos descritos en el capítulo anterior se modelan mediante las ecuaciones de equilibrio mecánico, de balance de masa y de energía, las restricciones de equilibrio entre el agua y el aire seco, que permiten eliminar las ecuaciones de cambio de fase, las ecuaciones constitutivas de los materiales presentes en el medio, las condiciones de contorno y las condiciones iniciales. Debido a la complejidad de las ecuaciones (ecuaciones diferenciales no lineales en derivadas parciales), la geometría del medio y las condiciones de contorno, no existe solución analítica del problema, debiéndose resolver las ecuaciones mediante técnicas numéricas. En esta tesis se ha utilizado el programa CODE_BRIGTH (Olivella, 1995) para analizar estos fenómenos en el ámbito de los ensayos de laboratorio. Se trata de un código que resuelve las ecuaciones anteriormente citadas por el método de los elementos finitos en el espacio y de las diferencias finitas en el tiempo. Como se ha comentado en el capítulo anterior, ha sido necesario utilizar el modelo numérico para analizar los resultados y estimar parámetros a partir de ensayos de laboratorio. Para esto último se han utilizado una serie de técnicas de identificación de parámetros basadas en el método de la máxima verosimilitud con información previa. CODE_BRIGTH no estaba preparado para resolver el problema inverso, por lo que se han tenido que desarrollar una serie de programas que implementan el algoritmo de minimización de Levenberg-Marquardt y utilizan CODE_BRIGTH como subrutina para resolver el problema directo en cada iteración.

3.2 ECUACIONES BÁSICAS

3.2.1 ECUACIONES DE BALANCE

Las ecuaciones de balance se formulan de manera diferencial en cada punto del espacio. Representan la conservación de la energía y de la masa de las especies agua y aire seco tanto en fase líquida como gaseosa (Olivella et al., 1994).

En las siguientes ecuaciones, el superíndice ω se refiere a la especie agua y el superíndice a se refiere a la especie aire. Los subíndices s , l y g se refieren a las fases sólida, líquida y gaseosa respectivamente.

Balance de energía:

$$\frac{\partial}{\partial t} (E_s \rho_s (1 - \phi) + E_l \rho_l S_l \phi + E_g \rho_g S_g \phi) + \nabla(\mathbf{i}_c + \mathbf{j}_{E_s} + \mathbf{j}_{E_l} + \mathbf{j}_{E_g}) = f^E$$

donde E_s , E_l y E_g son las energías internas específicas correspondientes a cada fase; ρ_s , ρ_l y ρ_g son las densidades de las tres fases, ϕ es la porosidad, S_l la fracción volumétrica de líquido (grado de saturación) y S_g la fracción volumétrica de gas respecto al volumen de poros. Evidentemente $S_g + S_l = 1$. \mathbf{i}_c es el flujo conductivo no advectivo de calor y los vectores \mathbf{j}_i son los flujos advectivos de cada una de las tres fases. Los flujos advectivos más importantes son los correspondientes al movimiento de vapor y agua líquida. f^E es la energía aportada o extraída del medio por unidad de tiempo.

Balance de masa de agua:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\theta_l^w S_l \phi + \theta_g^w S_g \phi) + \nabla(\mathbf{j}_l^w + \mathbf{j}_g^w) = f^w$$

donde θ_l^w y θ_g^w son la masa de agua por unidad de volumen de líquido y gas respectivamente. \mathbf{j}_l^w y \mathbf{j}_g^w son el flujo total de agua en las fases líquida y de vapor y f^w es la masa de agua aportada o extraída del medio.

Balance de masa de aire:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\theta_l^a S_l \phi + \theta_g^a S_g \phi) + \nabla(\mathbf{j}_l^a + \mathbf{j}_g^a) = f^a$$

donde θ_l^a y θ_g^a son la masa de aire por unidad de volumen de líquido y gas respectivamente. \mathbf{j}_l^a y \mathbf{j}_g^a son el flujo total de aire en las fases líquida y gaseosa y f^a es la masa de aire aportada o extraída del medio. Esta ecuación puede ser eliminada si se considera que la presión de gas es constante.

Balance de momento (ecuación de equilibrio):

$$\nabla \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{b} = 0$$

donde $\boldsymbol{\sigma}$ son las tensiones y \mathbf{b} las fuerzas de volumen.

En estas ecuaciones, las incógnitas son T , P_l , P_g (temperatura, presión de líquido y presión de gas respectivamente) y los desplazamientos. Para encontrarlas, es necesario relacionar estas variables con los flujos y las tensiones a través de las restricciones de equilibrio y las ecuaciones constitutivas.

3.2.2 RESTRICCIONES DE EQUILIBRIO

Las restricciones de equilibrio proporcionan la concentración de vapor en la fase gaseosa y la cantidad de aire disuelto en el líquido. Al suponer equilibrio entre las fases, no es necesario formular los cambios de estado, que implicarían una complejidad extra al problema al tener que añadir los términos relacionados con el cambio de fase en las ecuaciones de balance. Sin embargo, pueden darse casos en que este equilibrio no existe, como por ejemplo, la inyección de aire a una determinada humedad relativa en una muestra que en sus poros tiene el aire con una humedad relativa distinta al inyectado. Si el aire se mueve a gran velocidad, el equilibrio agua líquida-vapor puede no ser cierto porque el aire inyectado no dispone del tiempo de permanencia en los poros suficiente para equilibrarse con el agua líquida que hay en éstos.

La masa de vapor por unidad de volumen de gas (θ_g^w) viene dada por la ley psicrométrica (Edlefson y Anderson, 1943):

$$\theta_g^w = (\theta_g^w)^0 \exp\left(\frac{-(P_g - P_l)M_w}{R(273.15 + T)\rho_l}\right)$$

donde P_g y P_l son las presiones del gas y del líquido respectivamente, $(\theta_g^w)^0$ es la densidad del vapor en la fase gaseosa en contacto con la superficie del líquido, M_w es la masa molecular del agua (0.018 kg/mol), R es la constante de los gases perfectos (8.314 J/molK), ρ_l es la densidad

del agua (en kg/m³) y T es la temperatura expresada en grados centígrados. $(\theta_g^w)^0$ depende mucho de la temperatura. La presión parcial del vapor se calcula según la ley de los gases perfectos.

La solubilidad del aire en el agua está regida por la ley de Henry:

$$\omega_l^a = \frac{P_a}{H} \frac{M_a}{M_w}$$

donde ω_l^a es la fracción másica de aire en la fase líquida, P_a es la presión parcial del aire, M_a es la masa molecular del aire (0.02895 kg/mol) y $H=1000$ MPa es la constante de Henry. De acuerdo con la definición de densidad parcial, $\theta_l^a = \omega_l^a \rho_l$.

3.2.3 ECUACIONES CONSTITUTIVAS

Son las ecuaciones que relacionan los flujos con los gradientes de las variables que definen el problema y las tensiones con las deformaciones. Definen el comportamiento del material (arcilla expansiva en este caso). Las ecuaciones constitutivas térmicas son generalizables a la mayor parte de los materiales, variando tan sólo sus parámetros. Las ecuaciones constitutivas hidráulicas son las mismas que las que se utilizan en cualquier suelo homogéneo, por lo que también son bien conocidas y contrastadas. Las ecuaciones constitutivas mecánicas son las más complejas. Las barreras arcillosas se construyen con una arcilla altamente expansiva que va a quedar confinada en un entorno rocoso de alta rigidez. Esto significa que el modelo constitutivo elegido deberá ser capaz de reproducir los cambios de volumen debidos al humedecimiento y secado provocados por la entrada de agua del macizo e inyección de calor procedente del residuo y las tensiones inducidas por el confinamiento.

Ecuaciones constitutivas asociadas a los fenómenos térmicos

Se supone que el flujo de calor conductivo está gobernado por la ley de Fourier:

$$\mathbf{i}_c = -\lambda \nabla T$$

donde λ es la conductividad térmica. Puesto que se trata de un material poroso en cuyos poros hay una mezcla de agua y aire, esta conductividad variará mucho según cual sea la presencia de cada uno de estos componentes, Gens et al. (1998) establecen una relación entre la conductividad del medio y la conductividad térmica en estado saturado λ_{sat} , en estado seco λ_{dry} y el grado de saturación: $\lambda = \lambda_{sat}^{S_i} \lambda_{dry}^{1-S_i}$

Las energías internas E_l y E_g por unidad de volumen se expresan como:

$$E_l = E_l^w \omega_l^w + E_l^a \omega_l^a$$

$$E_g = E_g^w \omega_g^w + E_g^a \omega_g^a$$

Donde $E_l^w = 4180.0T$ (J/kg), $E_l^a = 1006.0T$ (J/kg), $E_g^w = 2.5 \times 10^6 + 1900.0T$ y $E_g^a = 1006.0T$ (J/kg), donde T es la temperatura absoluta. El valor de E_s depende de la arcilla utilizada en la barrera.

Ecuaciones constitutivas asociadas a los fenómenos hidráulicos

El flujo advectivo del líquido y del gas sigue la ley de Darcy:

$$\mathbf{q}_\alpha = -\mathbf{K}_\alpha \nabla \left(z + \frac{P_\alpha}{\gamma_\alpha} \right)$$

En estas expresiones, α significa líquido o gas, dependiendo del flujo que se esté considerando y z es la coordenada vertical en el sentido opuesto a la gravedad. $\mathbf{K}_\alpha = \mathbf{K} \gamma_\alpha k_{r\alpha} / \mu_\alpha$ es el tensor de permeabilidad al fluido α . La permeabilidad intrínseca \mathbf{K} depende de la estructura porosa del material. Hay que señalar que en las arcillas muy expansivas, la estructura (tamaño de los poros entre las partículas sólidas), varía mucho al producirse la hidratación (aunque ésta se produzca a volumen constante y el volumen total de los poros no cambie) y, por tanto, varía mucho también el valor de la permeabilidad intrínseca (Villar y Lloret, 2001). $k_{r\alpha}$ es el valor de la permeabilidad relativa que controla el cambio de permeabilidad con el grado de saturación cuando la arcilla todavía no está saturada y μ_α es la viscosidad dinámica del fluido (aire o agua). La permeabilidad intrínseca varía con la porosidad (ley Kozeny o ley exponencial, según el tipo de suelo). La permeabilidad relativa varía con el grado de saturación. Para este material, se puede suponer que sigue una relación de tipo exponencial:

$k_{ra} = S_e^\lambda$. Se define S_e como $S_e = (S_l - S_{rl}) / (S_{ls} - S_{rl})$, siendo S_{rl} el grado de saturación mínimo, S_{ls} es el grado de saturación máximo y S_l el grado de saturación.

El tipo de curva de retención que se ha utilizado para modelar la relación entre la succión ($P_g - P_l$) y el grado de saturación es la siguiente (Lloret et al., 1999):

$$S_e = \left(\frac{1}{1 + ((P_g - P_l) / P)^{1/(1-\lambda)}} \right)^\lambda \left(1 - \frac{P_g - P_l}{P_s} \right)^{\lambda_s}$$

donde $P = P_0 * \sigma / \sigma_0$, σ_0 es la tensión superficial a una temperatura de referencia, σ es la tensión superficial que depende de la temperatura siguiendo una ley empírica dada por Custodio y Llamas (1983): $\sigma = 0.03059 \exp(252.93 / (273.15 + T))$ (N/m), T en grados centígrados. P_0 , P_s , λ y λ_s son parámetros experimentales. Esta curva es una modificación de la curva de retención presentada por van Genuchten (1980), a la que se ha añadido el segundo término multiplicativo función de P_s , λ_s y $P_g - P_l$ para ajustar mejor los valores experimentales obtenidos con succiones muy altas.

El flujo no advectivo del vapor de agua en el gas está gobernado por la ley de Fick:

$$\mathbf{i}_g^w = -\mathbf{D}_g^w \nabla \omega_g^w = -(\phi \rho_g S_g \tau D_m^w \mathbf{I} + \rho_g \mathbf{D}_g') \nabla \omega_g^w$$

$$\mathbf{i}_g^w = -\mathbf{D}_g^w \nabla \omega_g^w$$

donde \mathbf{i}_g^w es el flujo másico no advectivo de agua en el gas, D_g^w es la difusión molecular, \mathbf{D}_g' es el tensor de dispersión mecánica, ω_g^w es la fracción másica del agua en el gas y τ la tortuosidad del medio. La difusión molecular y la dispersión mecánica tienen pesos distintos en el transporte de vapor, que depende de la escala espacial del problema. En casos de escala regional, la componente debida a la difusión molecular es despreciable frente la dispersión mecánica. No ocurre lo mismo en las barreras arcillosas y menos aún en los ensayos de laboratorio, donde el transporte debido a la dispersión mecánica es despreciable frente al transporte por difusión molecular. Por lo anterior, el tensor de dispersión mecánica \mathbf{D}_g' se supone nulo. La difusión molecular D_g^w es:

$$D_m^w (m^2 / s) = 5.9 \times 10^{-12} \frac{(273.15 + T)^{2.3}}{P_g} \quad (T \text{ expresada en } ^\circ\text{C} \text{ y } P_g \text{ en MPa})$$

El valor de τ depende de la estructura del medio y es un parámetro que habrá que conocer en cada caso concreto.

Ecuaciones constitutivas asociadas a los fenómenos mecánicos

Las ecuaciones constitutivas mecánicas son, con mucho, las más complejas, esto se debe a que el comportamiento de una arcilla expansiva presenta distintos comportamientos en función de su trayectoria de cambios de tensión y/o succión. Sin embargo, dada la intención de realizar simulaciones numéricas con el código CODE_BRIGTH, se debe elegir entre uno de los modelos implementados en este programa. Los modelos constitutivos que se contemplaban en el programa CODE_BRIGTH en el momento de la realización de esta tesis eran: elástico lineal, modelo viscoelástico para materiales salinos, modelo de las superficies de estado, modelo elástico lineal para cambios de volumen inducidos por cambios de temperatura y presión y el modelo BBM (Barcelona Basic Model) modificado para tener en cuenta el acoplamiento térmico. Este modelo está basado en la formulación del estado crítico (Gens, 1995). Para modelar el comportamiento mecánico de la bentonita, se eligió este último modelo constitutivo.

Las variables con las que se va a trabajar son las tensiones netas totales ($\sigma_{ij} - P_g \delta_{ij}$), la succión ($P_g - P_l$) y el incremento de temperatura (ΔT) tomado con respecto a una temperatura de referencia T_0 .

Para simplificar las ecuaciones del modelo, se va a formular en estado axisimétrico de tensiones (dos de las tensiones principales iguales). $p = \frac{1}{3}(\sigma_1 + 2 \times \sigma_3) - P_g$ es la tensión media neta, $q = \sigma_1 - \sigma_3$ es la tensión desviadora, $\varepsilon_v = \varepsilon_1 + 2 \times \varepsilon_3$ es la deformación volumétrica y $\varepsilon_q = \frac{2}{3}(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)$ es la deformación desviadora. σ_1 y σ_3 son las tensiones principales y ε_1 y ε_3 las deformaciones principales. p_i y s_i son p y s iniciales.

Las deformaciones volumétricas elásticas se calculan con las siguientes expresiones, siguiendo el modelo BBM (Barcelona Basic Model, Alonso et al., 1990) con cambios de temperatura (Gens, 1995):

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p$$

$$\varepsilon_v^e = -\frac{k_i}{1+e_0} \ln \frac{p}{p_i} - \frac{k_s}{1+e_0} \ln \left(\frac{s+p_{at}}{s_i+p_{at}} \right) + \alpha(\Delta T, p) \Delta T$$

$$\alpha(\Delta T, p) = \alpha_0^* + \alpha_2 \Delta T + (\alpha_1 + \alpha_3 \Delta T) \ln \frac{p}{p_i}$$

Donde e_0 es el índice de poros inicial y α_0^* , α_1 , α_2 , y α_3 son parámetros del modelo.

la rigidez del suelo ante cambios de tensión aumenta con la succión según la relación:

$$k_i = k_{i0} (1 + \alpha_{is} s),$$

y la rigidez del suelo ante cambios de succión aumenta con la tensión de confinamiento y la succión según la relación:

$$k_s = k_{s0} (1 + \alpha_{sp} \ln(p/p_i)) \exp(\alpha_{ss} s)$$

siendo k_{i0} , α_{is} , k_{s0} , α_{sp} y α_{ss} parámetros del modelo.

La deformación de corte elástica se calcula utilizando un módulo elástico de deformaciones al corte G:

$$\varepsilon_q^e = \frac{1}{3G} (q - q_i)$$

q_i y p_i son los valores iniciales en los cuales las deformaciones elásticas son nulas.

Para el cálculo de las deformaciones plásticas, hay que definir una superficie de fluencia y una ley de flujo. La superficie de fluencia del modelo es:

$$f \equiv q^2 - M^2 (p + p_s)(p_0 - p) = 0$$

Esta superficie de fluencia intersecta en el plano $q=0$ formando dos curvas diferentes. La que se forma en el semiespacio de las p negativas (tracción isotropa), es una curva que sigue la relación $p_s = ks \exp(-\rho \Delta T)$, donde k representa el aumento de la resistencia a tracción del suelo con la succión y ρ la caída exponencial de esta resistencia con la temperatura.

En el semiespacio de p positivas, la línea que forma la intersección de la superficie de fluencia con el plano $q=0$ es la LC del modelo BBM, si bien con parámetros dependientes de la temperatura. La forma de dicha curva es:

$$p_0 = p^c \left(\frac{p_c}{p^c} \right)^{\frac{\lambda(0)-k_r}{\lambda(s)-k_r}}$$

Donde los parámetros tienen los siguientes valores:

$$\lambda(s) = \lambda(0)[(1-r)\exp(-\beta s) + r]$$

$$p_c = p_0^* + 2(a_1\Delta T + a_2\Delta T|\Delta T|)$$

Siendo $\lambda(0)$, r , β , α_1 y α_2 parámetros del modelo y p_0^* la intersección de la superficie LC con el eje $s=0$. Este parámetro es el que indica el tamaño de la superficie de fluencia.

En esta última relación, se pone de manifiesto que la superficie de fluencia se contrae con la temperatura, haciendo el suelo más blando.

La regla de flujo es la misma que el modelo BBM.

$$\frac{\partial g}{\partial p} = n_p = 1$$

$$\frac{\partial g}{\partial q} = n_q = \frac{2q\alpha}{M^2(2p + p_s - p_0)} \alpha = \frac{M(M-9)(M-3)}{9(6-M)} \{1/[1 - k_i / \lambda(0)]\}$$

Donde g es el potencial plástico.

El BBM no explica satisfactoriamente el comportamiento de las arcillas expansivas. Éstas presentan un comportamiento más complejo que requiere un modelo que sea capaz de reproducirlos. El BBM es un modelo desarrollado para el estudio de suelos no saturados no activos. Ante las evidencias experimentales, se hizo necesario desarrollar un nuevo modelo, el BExM (Barcelona Expansive Model), descrito ampliamente en Alonso et al., 1999; Alonso,

1998; Alonso et al., 1994; Alonso y Gens, 1992. Aquí sólo se van a comentar algunos de los puntos más relevantes de este modelo.

Este modelo tiene una base física que está ligada a la estructura de una arcilla expansiva. Ésta está formada por tres fases: una gaseosa, con aire y vapor de agua, una líquida, con aire disuelto, agua y sales disueltas, y una fase sólida, formada por partículas de tamaño arena o limo, partículas de arcilla con agua adsorbida a éstas. Las partículas de arcilla se unen formando estructuras mayores (agregados), éstos se encuentran siempre saturados y se puede aplicar el principio de las tensiones efectivas para modelar su comportamiento. El comportamiento de estos agregados se supone elástico ante cambios de succión y/o tensión y también se supone que sólo tienen incremento volumétrico. Forman la denominada microestructura del suelo y su comportamiento está ligado a la presencia de minerales activos. Entre estos agregados y las partículas no arcillosas (limo, arena y grava), están los poros del suelo. Son mucho mayores que los que se encuentran en el interior de los agregados y son los que se desaturan al aumentar la succión. Forman la macroestructura del suelo y tienen deformaciones elásticas y plásticas al cambiar la succión o el estado tensional y deformaciones plásticas provocadas por cambios en la microestructura. El modelo supone equilibrio mecánico, hidráulico y químico entre la macroestructura y la microestructura.

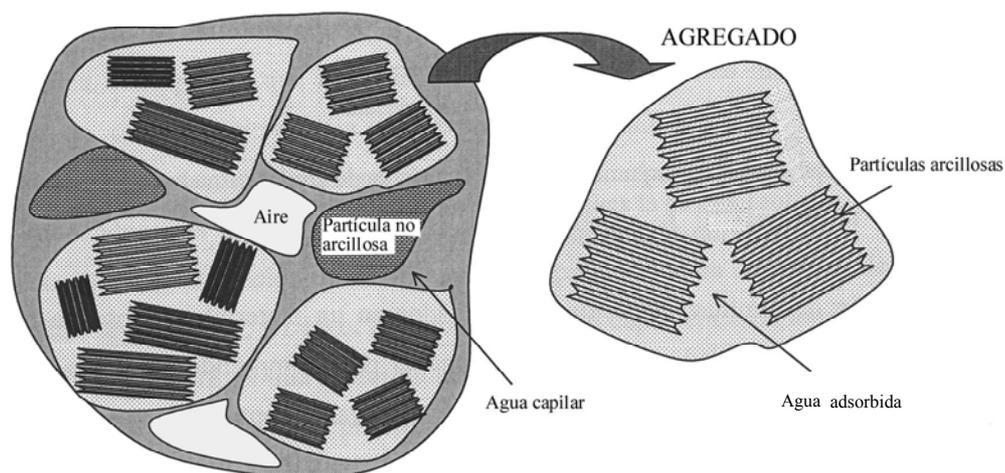


Figura 3.2.3.3.1 Estructura del material arcilloso (Villar, 2000)

El incremento de deformación volumétrica de la microestructura $d\varepsilon_{vm}^e$ depende tan solo del incremento de la tensión principal efectiva:

$dp' = d(p - p_l) = d(p - p_g + p_g - p_l) = d(p + s)$. A lo largo del estado definido por la línea $p+s=\text{constante}$, no se producen deformaciones volumétricas en la microestructura. Esta línea se denomina Línea Neutra (NL). El hinchamiento de la microestructura al disminuir la succión induce deformaciones plásticas de hinchamiento en la macroestructura. La retracción de la microestructura por un aumento de succión induce a su vez deformaciones plásticas de retracción en la macroestructura. Para modelar estos dos comportamientos, se definen dos superficies de fluencia: SD (Disminución de Succión) y SI (Incremento de Succión), las cuales definen el inicio de las deformaciones plásticas de la macroestructura por hinchamiento o retracción de la microestructura (figura 3.1.3.3.1). Sin embargo, las deformaciones plásticas de la macroestructura no sólo dependen de la deformación de la microestructura sino también del estado tensional y su índice de poros. Debido a este hecho, pueden darse comportamientos del suelo ante cambios de succión que contradicen lo mencionado anteriormente: si la tensión aplicada al suelo es baja, puede suceder que la microestructura retraiga más que la macroestructura, aumentando el volumen de poros en esta última. También puede suceder que se produzca una intrusión de los agregados en la macroestructura si las tensiones aplicadas al suelo son tales que no puede hinchar lo suficiente, “fluyendo” la arcilla hacia al interior de los macroporos, disminuyendo el volumen de la macro. Alonso et al. (1994) proponen la siguiente expresión para cuantificar la deformación de la macroestructura en función de la deformación de la microestructura:

$$d\varepsilon_{vM}^p = f_D \varepsilon_{vm}^e \text{ si se activa la superficie SD}$$

$$d\varepsilon_{vM}^p = f_I \varepsilon_{vm}^e \text{ si se activa la superficie SI}$$

f_D y f_I son dos funciones que dependen del cociente p/p_0 en el caso del estado de tensiones hidrostático.

El cociente p/p_0 es una medida de la distancia desde el estado tensional actual a la superficie de fluencia LC (p_0), que es la misma que la LC del modelo BBM y está asociada a las deformaciones volumétricas plásticas de la macroestructura que se producen al aumentar las tensiones o al disminuir la succión. Estas tres superficies de fluencia están acopladas entre sí: por ejemplo, si la macroestructura se densifica, el dominio elástico de ésta aumenta y la LC se expande. Este modelo estaba en fase de implementación en CODE_BRIGTH durante la

realización de esta tesis y no ha podido ser utilizado en el análisis de los resultados de los ensayos realizados.

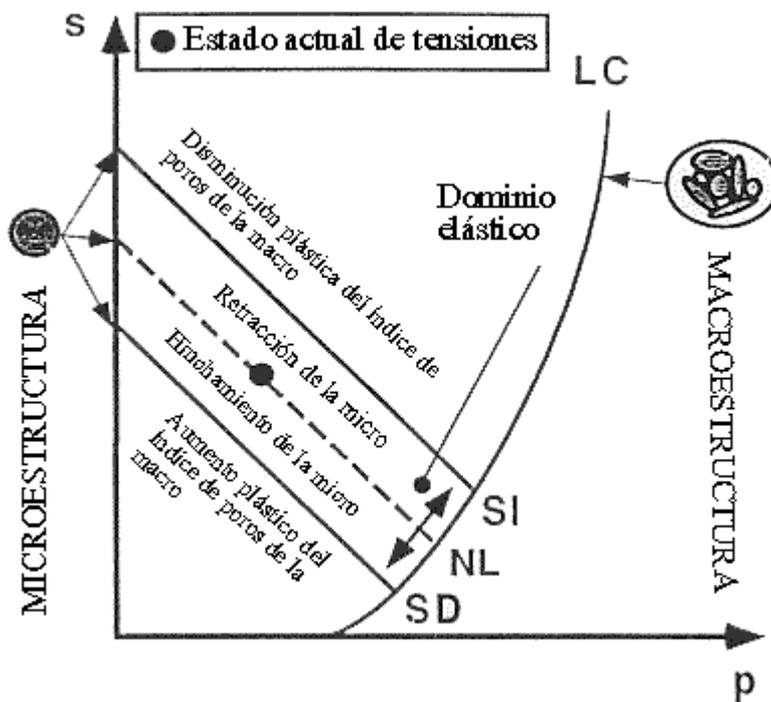


Figura 3.2.3.3.2 Superficies de fluencia del modelo BExM (Alonso et al., 1999)

3.3 MODELO NUMÉRICO

3.3.1 INTRODUCCIÓN

Las ecuaciones descritas anteriormente no se pueden resolver de forma analítica dada su extrema complejidad, por ello, se hace necesario recurrir a las técnicas del cálculo numérico para resolverlas y poder abordar el estudio del problema T-H-M en arcillas expansivas.

3.3.2 CARACTERÍSTICAS DE CODE_BRIGHT

Las principales características del código de elementos finitos CODE_BRIGHT (Olivella, 1995), utilizado en esta tesis para la simulación de ensayos, son:

- Resuelve las ecuaciones en 1, 2 y 3 dimensiones y en 2 y 3 dimensiones con axisimetría.

- Utiliza funciones de interpolación lineales y elementos en forma de segmentos, triángulos, cuadriláteros, tetraedros, prismas triangulares y prismas cuadrangulares. Se utiliza integración analítica para segmentos, triángulos, tetraedros y los prismas triangulares. Se utiliza la integración numérica para los cuadriláteros (1, 2 o 4 puntos), para los prismas triangulares de cualquier tipo (6 o 8 puntos) y para los prismas cuadrangulares (8 puntos). Cuando se resuelve el problema mecánico, se utiliza la integración selectiva, esto es, se integra la parte volumétrica con una cuadratura reducida a un punto. Para todos los tipos de elementos, las ecuaciones de flujo se resuelven con las aproximaciones “element-wise” y “cell-wise”. Esta aproximación es independiente del tipo de integración utilizado.
- La integración temporal se realiza por el método de las diferencias finitas implícitas. Se definen dos tiempos intermedios entre los dos extremos del intervalo de tiempo (t y $t+\Delta t$). Uno representa el instante donde se cumplen las ecuaciones ($t+\theta\Delta t$) y el otro donde se calculan las funciones no lineales ($t+\varepsilon\Delta t$). Por ejemplo, $\varepsilon=0$, $\theta=1$ representan el problema linealizado con una integración temporal totalmente implícita.
- El sistema no lineal de ecuaciones diferenciales se resuelve por el método de Newton-Raphson. El código discretiza automáticamente el tiempo. Incrementa el intervalo de tiempo si se alcanza la convergencia con el intervalo actual y lo reduce en caso contrario.
- La reducción del paso de tiempo se puede deber a una excesiva variación de las variables desconocidas en la iteración, un excesivo número de iteraciones para alcanzar la convergencia o por una corrección mayor que la iteración anterior.

La implementación de las condiciones de contorno se realiza del siguiente modo:

- Nodos de caudal y/o tensión fijos: Se procede nodo a nodo. Es sencillo debido a que estos términos están de manera explícita en las ecuaciones algebraicas resultantes de discretizar las ecuaciones diferenciales que definen el proceso analizado.
- Nodos de PRESIÓN y/o desplazamiento fijo: Si i es un nodo de PRESIÓN y/o desplazamiento fijos, se hace D_{ii} infinita, donde D_{ii} es el término de la diagonal de la matriz de coeficientes que discretiza la derivada parcial del tiempo asociado al desplazamiento y/o nivel fijado. Hay un caso particular interesante de condición de contorno de flujo: es la condición mixta: $Q_i=\alpha(H_i-h_i)$, donde Q_i es el caudal que entra o sale por un nodo, H_i es el valor de la variable que tendría dicho nodo si tuviera las mismas condiciones que la

atmósfera que lo rodea (temperatura, presión), h_i es el valor real de dicha variable en el nodo y α es el coeficiente D_{ii} . Esta condición es de gran interés porque regula los procesos de rezume, evaporación, cantidad de calor que pasa al suelo procedente del Sol, etc. La evaluación del parámetro α no siempre es sencilla y suele tener que recurrirse a formulaciones empíricas que lo hacen depender de las condiciones del entorno del dominio en el que se estudia el problema. Físicamente representa la capacidad del medio que rodea el dominio de definición del problema estudiado para aportar o extraer masa o calor. En el laboratorio esta condición debe aplicarse lo menos posible, ya que es precisamente el buen control de las condiciones del material en el que se está realizando un ensayo la principal ventaja del laboratorio. Esta condición también se puede utilizar en la resolución del problema mecánico, en este caso, α se interpretaría físicamente como un muelle, que en caso de imponer un desplazamiento nulo, tiene una rigidez infinita.

En un problema T-H-M en tres dimensiones se tienen seis variables: los tres desplazamientos, la presión de gas, la presión de líquido y la temperatura. Las ecuaciones de balance a resolver son seis (balance de agua, de aire, de energía y la ecuación de equilibrio, que tiene tres componentes). Las ecuaciones constitutivas son complejas (plasticidad en el problema mecánico, por ejemplo), lo que hace que la solución numérica del problema T-H-M sea elaborada, aunque por las características antes mencionadas, el programa CODE_BRIGTH puede ser calificado de “robusto” frente a problemas de convergencia.

3.4 TÉCNICAS DE IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS

3.4.1 INTRODUCCIÓN

En apartados anteriores se describieron las ecuaciones que definen el comportamiento T-H-M de una arcilla. Dichas ecuaciones dependen de unas variables (presión de agua, presión de aire, temperatura y desplazamientos) y de unos parámetros (permeabilidad intrínseca, tortuosidad, conductividad saturada, etc.) Conociendo estos últimos y resolviendo las ecuaciones citadas, se obtiene la respuesta de la arcilla en el espacio y en el tiempo para las condiciones de contorno impuestas (tanto en la barrera como en las muestras de laboratorio).

El conocimiento de los parámetros que definen el comportamiento de la arcilla es fundamental, por lo que se deben obtener de la forma más precisa posible para poder cuantificar

debidamente los fenómenos que se van a producir en una barrera construida con este material. Cuando no es posible la medida directa de esos parámetros hay que proceder a la identificación indirecta.

Los avances en las técnicas de identificación de parámetros son relativamente recientes, posteriores a 1960. Sin embargo, el enfoque estadístico del problema ha sido estudiado desde hace más de 200 años (Ledesma, 1987). El problema que estudiaban los matemáticos de aquella época era el de obtener, a partir de unas observaciones, los parámetros de un modelo estadístico definido por su función de probabilidad. Los primeros trabajos se atribuyen a Bayes y Daniel Bernoulli a finales del siglo XVIII. Durante el siglo XIX, la estadística vive un desarrollo importante: Gauss define la ley normal de distribución y Laplace trabaja en la denominada teoría de la probabilidad inversa, iniciando una teoría de la inferencia estadística. Chebyshev presenta los conceptos de varianza y esperanza matemática y crea una escuela de matemáticos rusos que posteriormente seguirían trabajando en la probabilidad (Markov, Kolmogorov...).

De forma paralela, se fueron desarrollando métodos de minimización de funciones. En el siglo XVIII destacan Euler y Lagrange, que realizan descubrimientos en el cálculo variacional y Lagrange describe el método de los multiplicadores que lleva su nombre.

Fue a mediados de los años 30 cuando Fisher, que trabajaba extensamente en inferencia estadística, fijó las bases matemáticas del método de estimación de parámetros por máxima verosimilitud y el de mínimos cuadrados como caso particular de éste.

Hacia finales de los años 50, aparecen los primeros trabajos que sentarían las bases matemáticas del problema utilizable directamente en las ciencias aplicadas. Lanczos reúne y publica la teoría de sistemas de ecuaciones lineales no cuadradas a principios de los 60. El problema inverso planteado aquí es un sistema de n ecuaciones (observaciones) con p incógnitas (parámetros), donde n es, generalmente, mayor que p . A mediados de los años 60, Linnik y Hamilton utilizaron este método como base para desarrollar una teoría estadística de identificación de parámetros a partir de observaciones. Paralelamente, se van desarrollando algoritmos de minimización de funciones (Marquardt, 1963). Existen trabajos de estadística aplicada que desarrollan la teoría de la estimación. Edwards (1972), define la base estadística del método de estimación de máxima verosimilitud. Una cronología más detallada puede consultarse en Ledesma (1987).

En ciencias aplicadas relacionadas con la ingeniería civil, el desarrollo de métodos de identificación ha sido muy extenso. La Geofísica y la Hidrogeología han destacado por utilizar datos de campo para estimar los parámetros que ayudan a reproducir el movimiento de las ondas sísmicas en un caso, y el flujo de agua en el otro (Gómez-Hernández y Wen, 1998; Yeh, G-W, 1986). En geotecnia se pueden encontrar trabajos sobre la identificación de parámetros en problemas de túneles (Ledesma, 1987; Gioda y Maier, 1980).

El caso que aquí se estudia es el de identificación de parámetros a partir de los resultados de ensayos de laboratorio. Tradicionalmente, en el laboratorio se deducen parámetros de manera directa a partir de ensayos que involucran procesos relativamente simples. De este modo, se puede deducir la permeabilidad saturada por aplicación directa de la ley de Darcy en los resultados obtenidos en un ensayo de permeabilidad convencional, o el módulo de elasticidad aplicando la ley de Hooke en un ensayo de compresión simple o triaxial.

En los últimos años se han desarrollado mucho los métodos numéricos, permitiendo simular problemas reales con geometrías y leyes constitutivas sumamente complejas. En suelos no saturados, el problema de la estimación de los parámetros que rigen el flujo de agua (permeabilidad no saturada y curva de retención), ha sido estudiado extensamente, desarrollándose paralelamente una serie de ensayos de laboratorio donde se medía, por ejemplo, el flujo de agua que sale de una muestra de arena cuando se la seca (Hollenbeck y Jensen, 1998). Otro método interesante consiste en medir el flujo de agua hacia el interior de un tensiómetro para medir la permeabilidad no saturada del suelo (Timlin y Pachepsky, 1998). También se han realizado ensayos de campo y laboratorio, utilizando diversos métodos que implican una extracción o inyección de agua en el suelo y la medida de su presión en varios puntos con tensiómetros (Simunek et al., 1998; Romano y Santini, 1999). También han sido realizados ensayos de campo para determinar los parámetros que rigen el flujo no saturado en rocas (Finsterele y Pruess, 1995).

El problema de identificación de parámetros térmicos ha sido extensamente estudiado en materiales dado el gran interés que existe en la industria aeroespacial (Aviles-Ramos et al., 1998).

3.4.2 BASE MATEMÁTICA DEL MÉTODO

3.4.2.1 INTRODUCCIÓN AL PROBLEMA MATEMÁTICO

El enfoque probabilístico del problema presenta muchas ventajas tanto en el proceso de minimización como en el de análisis de resultados, ya que permite introducir la información previa y los errores de observación. Esto es de gran ayuda a la hora de establecer un criterio de bondad en la estimación de los parámetros al poder definir posteriormente intervalos de confianza que luego permitirán estudiar el caso real con unos parámetros con errores conocidos y cuantificados.

El problema puede ser formulado utilizando un esquema Bayesiano (Cividini et al.; 1983), en el cual, los parámetros del suelo \mathbf{p} son considerados como aleatorios y una estimación de sus valores se obtiene al maximizar la densidad de probabilidad de \mathbf{p} dado un cierto número de medidas n . Un procedimiento alternativo lo proporciona el tomar como criterio de optimización el de máxima verosimilitud (Ledesma et al., 1989; Carrera y Neuman, 1986). La verosimilitud $L(\mathbf{p})$ de una hipótesis se define como proporcional a la probabilidad f , de obtener unas medidas \mathbf{x}^* , que pueden ser temperaturas, desplazamientos, tensiones, etc. dado un conjunto de parámetros \mathbf{p} :

$$L(\mathbf{p}) = k f(\mathbf{x}^* / \mathbf{p})$$

donde k es una constante arbitraria. El modelo se supone determinista, con unos parámetros que se consideran fijos pero inciertos debido a la falta de información, por tanto, no es estrictamente necesario que el modelo reproduzca exactamente el sistema que se analiza. Esta circunstancia es útil para extender el análisis al problema de identificación de modelos. La diferencia entre los dos esquemas de solución probabilista (Bayesiano y Máxima Verosimilitud) es únicamente conceptual y las expresiones matemáticas que resultan en los dos casos son las mismas.

3.4.2.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA ESTADÍSTICO

En primer lugar, se supone que el problema a analizar puede ser representado como $\mathbf{x}=\mathbf{M}(\mathbf{p})$; donde \mathbf{x} es el conjunto de las n medidas disponibles, \mathbf{p} es el conjunto de los m parámetros desconocidos y \mathbf{M} representa el modelo adoptado para representar la solución real.

Normalmente, el modelo no tendrá expresión analítica y se deberán resolver las ecuaciones numéricamente, utilizando por ejemplo, el método de los Elementos Finitos. En el caso más general, se dispondrá de cierta información previa sobre los parámetros obtenida de la bibliografía o de la experiencia personal previa.

Es razonable suponer que los errores de las medidas y los errores de la información previa son independientes. En este caso, la verosimilitud de una hipótesis \mathbf{p} es (Edwards, 1972):

$$L(\mathbf{p}) = kP(\mathbf{x})P(\mathbf{p})$$

donde $P(\mathbf{x})$ es la función de probabilidad de los errores de las medidas y $P(\mathbf{p})$ la función de probabilidad de los errores de la información previa de los parámetros.

El problema de estimación de parámetros se reduce a como encontrar el conjunto de parámetros \mathbf{p} que maximiza la ecuación anterior, que desde el punto de vista matemático, es equivalente a minimizar la función objetivo $J = -2 \ln L(\mathbf{p})$, la cual, suponiendo que las funciones de distribución de probabilidad de los errores en las medidas y en la información previa son gaussianas multivariadas, puede escribirse como (Ledesma, 1987):

$$J = (\mathbf{x}^* - M(\mathbf{p}))^t \mathbf{C}_x^{-1} (\mathbf{x}^* - M(\mathbf{p})) + (\langle \mathbf{p} \rangle - \mathbf{p})^t (\mathbf{C}_p^0)^{-1} (\langle \mathbf{p} \rangle - \mathbf{p}) + \ln |\mathbf{C}_x| + \ln |\mathbf{C}_p^0| + n \ln 2\pi + m \ln 2\pi - 2 \ln k$$

donde:

\mathbf{C}_x es la matriz de covarianza de las medidas

\mathbf{x}^* es el vector de medidas

\mathbf{C}_p^0 se denomina matriz de covarianzas de los parámetros a priori y está basada en la información previa disponible sobre los parámetros.

$\langle \mathbf{p} \rangle$ es el vector de parámetros a priori.

Los tres últimos términos de la expresión anterior son constantes y pueden eliminarse del proceso de minimización. Nótese que la magnitud y la estructura de los errores de las medidas está representada en la matriz de covarianza \mathbf{C}_x y la magnitud y estructura de error de la

información previa está representada en la matriz de covarianza \mathbf{C}_p^0 . A menudo es conveniente separar la magnitud del error y su estructura, expresando \mathbf{C}_x y \mathbf{C}_p^0 como $\mathbf{C}_x = \sigma_x^2 \mathbf{E}_x$ y $\mathbf{C}_p^0 = \sigma_p^2 \mathbf{E}_p^0$. Ahora, σ_x^2 es una varianza que representa una magnitud promedio de error en las medidas y σ_p^2 en la información previa, mientras que la matriz \mathbf{E} contiene la estructura del error de medida que depende de los tipos de instrumentos utilizados para obtener las medidas en el caso de \mathbf{E}_x , y de la información previa sobre los parámetros en el caso de \mathbf{E}_p^0 (Carrera y Neuman, 1985).

Utilizando estas nuevas expresiones para las matrices de covarianza, la función objetivo a minimizar para el caso de que se tengan r instrumentos de medida y se hagan s ensayos es:

$$J = \sum_{i=1}^r (\mathbf{x}^* - \mathbf{x})^t \frac{\mathbf{E}_{xi}^{-1}}{\sigma_{xi}^2} (\mathbf{x}^* - \mathbf{x})^t + \sum_{j=1}^s (\mathbf{p} - \langle \mathbf{p} \rangle)^t \frac{\mathbf{E}_{pj}^{-1}}{\sigma_{pj}^2} (\mathbf{p} - \langle \mathbf{p} \rangle)^t + \sum_{i=1}^r m \ln \sigma_x^2 + \sum_{j=1}^s n \ln \sigma_p^2$$

La función objetivo definida de forma general en la expresión anterior puede simplificarse si se realizan algunas hipótesis adicionales. Por ejemplo, si la magnitud y la estructura del error cometido en las medidas y en la información previa se suponen fijos, los dos últimos términos son constantes y no afectan al proceso de minimización. La expresión resultante puede escribirse como:

$$J = (\mathbf{x}^* - M(\mathbf{p}))^t \mathbf{C}_x^{-1} (\mathbf{x}^* - M(\mathbf{p})) + (\langle \mathbf{p} \rangle - \mathbf{p})^t (\mathbf{C}_p^0)^{-1} (\langle \mathbf{p} \rangle - \mathbf{p})$$

Si no se dispone de información previa sobre los parámetros, la función objetivo anterior queda como:

$$J = (\mathbf{x}^* - M(\mathbf{p}))^t \mathbf{C}_x^{-1} (\mathbf{x}^* - M(\mathbf{p}))$$

Si la matriz de estructura de error es diagonal (errores de medida independientes), se obtiene el criterio de Markov.

Finalmente, si la matriz estructura de error de las medidas es la identidad, se obtiene el criterio conocido y muy utilizado de minimización de mínimos cuadrados (utilizado en esta tesis para estimar la permeabilidad saturada a partir de ensayos edométricos, descrito en el capítulo 4).

$$J = (\mathbf{x}^* - M(\mathbf{p}))^t (\mathbf{x}^* - M(\mathbf{p}))$$

Los criterios para obtener el conjunto de parámetros óptimo según las funciones objetivo descritas anteriormente, dan lugar a análisis con grados de dificultad decreciente. La expresión a usar en cada caso dependerá del tipo de problema, de la cantidad de información disponible, del tipo de instrumentos de medida utilizados, del grado de aproximación a la realidad del modelo utilizado y del nivel de confianza exigido a los parámetros a estimar. Sin embargo, el método de máxima verosimilitud con información previa proporciona un mismo marco teórico para todos los tipos de análisis.

3.4.2.3 MINIMIZACIÓN DE LA FUNCION OBJETIVO. ALGORITMOS

Posteriormente, será necesario minimizar una función, un problema clásico de cálculo numérico. Los algoritmos de minimización se dividen en tres grandes grupos: a) los que anulan el gradiente, cumpliendo la condición necesaria de extremo en un conjunto abierto (Medina, 1993). Es el método utilizado en esta tesis, b) los que minimizan directamente la función sin calcular derivadas (Gioda y Maier, 1980) y c) los que eligen un camino de descenso por la derivada de una o varias variables de la función y no derivan el resto. Puesto que no hay un algoritmo universal que sea el más rápido y el más robusto sino que en cada caso habrá un algoritmo mejor que el resto, es conveniente disponer de varios métodos numéricos de minimización y usar uno u otro en función del tipo de problema que se resuelve y establecer un criterio que aconseje qué algoritmo escoger en cada problema.

Las condiciones para que un punto \mathbf{p}^* del espacio de parámetros sea un mínimo (local o global) de una función $J(\mathbf{p})$ son:

$$\mathbf{g}(\mathbf{p}^*) = 0$$

$$\Delta \mathbf{p}^t \mathbf{G}(\mathbf{p}^*) \Delta \mathbf{p} > 0$$

donde $\mathbf{g}(\mathbf{p}) = \partial J / \partial p_i$ es el jacobiano de J y $\mathbf{G}(\mathbf{p}) = \partial^2 J / \partial p_i \partial p_j$ es el hessiano de J. Es decir, el jacobiano de la función debe ser cero en el mínimo y el hessiano definido positivo. En caso de mínimo débil, el hessiano es semidefinido positivo.

En torno al mínimo, la función J es aproximadamente cuadrática, y en el caso de que el número de parámetros sea dos, puede representarse por curvas de nivel aproximadamente elípticas. Los vectores propios del hessiano forman un sistema de ejes ortogonales asociados a la curvatura de la función en el mínimo, y su magnitud es proporcional al valor propio correspondiente a cada vector propio. La relación entre la curvatura máxima y mínima proporciona una idea de la identificabilidad del problema. En el caso de dos parámetros, por ejemplo, cuanto más se acerque la curva de nivel elíptica a la forma circular, más fácil será la resolución del problema. En caso de que la elipse degenera a un valle, cualquier punto de dicho valle minimizará la función, por lo que el problema inverso no tendrá solución única, ya que infinitas combinaciones de parámetros lo pueden resolver. Si el valle tiene la dirección de uno de los ejes de parámetros, significa que el parámetro asociado a dicha dirección no influye en el problema. Un ejemplo puede ser el de identificar el calor específico y la conductividad térmica sólo con datos de temperaturas del estado estacionario, en cuyo caso, el calor específico no influye en éstas.

El algoritmo usado en este trabajo es el de Gauss-Newton, aunque también se implementó el algoritmo de minimización de Levenberg-Marquardt por lo explicado anteriormente: conviene disponer de más de un método implementado porque no existe uno óptimo universal.

El método de Newton (antecedente del Gauss-Newton), se basa en el hecho de que cerca del mínimo puede aproximarse J(\mathbf{p}) por una cuádrica. En ese caso, los dos primeros términos del desarrollo en serie de Taylor del gradiente de J, \mathbf{g} , en un punto del espacio de parámetros \mathbf{p}_k es:

$$\mathbf{g}(\mathbf{p}_k + \Delta\mathbf{p}_k) \approx \mathbf{g}(\mathbf{p}_k) + \mathbf{G}\Delta\mathbf{p}_k$$

donde \mathbf{G} es la matriz hessiano en el punto \mathbf{p}_k . Si $\Delta\mathbf{p}_k$ es tal que $\mathbf{p}_k + \Delta\mathbf{p}_k$ corresponde al mínimo de la función objetivo, entonces el gradiente en ese punto es cero y se deduce:

$$\Delta \mathbf{p}_k = -\mathbf{G}^{-1} \mathbf{g}(\mathbf{p}_k)$$

de manera que $\Delta \mathbf{p}_k$ es la dirección de avance, en el espacio de parámetros, desde el punto \mathbf{p}_k hacia el mínimo. Si la función objetivo fuese en realidad cuadrática, se llegaría al mínimo en un solo paso. En general se deberá proceder de forma iterativa. Obsérvese que este algoritmo requiere calcular el hessiano de la función objetivo. Utilizando el criterio de identificación más simple (mínimos cuadrados), esta función es en nuestro caso:

$$J = (\Delta \mathbf{x})' (\Delta \mathbf{x})$$

donde es $\Delta \mathbf{x}$ es el vector diferencia entre los valores medidos y calculados. Si se define

$$\mathbf{A} = \frac{\partial \Delta \mathbf{x}}{\partial \mathbf{p}}$$

el gradiente y el hessiano de J son

$$\mathbf{g}(\mathbf{p}) = -2\mathbf{A}' \Delta \mathbf{x}$$

$$\mathbf{G}(\mathbf{p}) = 2\mathbf{A}' \mathbf{A} + 2 \sum_{i=1}^n (\Delta \mathbf{x}_i) \mathbf{T}_i = 2\mathbf{A}' \mathbf{A} + \mathbf{Q}$$

donde \mathbf{T}_i es el hessiano de $\Delta \mathbf{x}_i$. \mathbf{Q} son los términos de segundo orden del hessiano de \mathbf{J} expresados en forma matricial.

En la mayoría de los problemas de identificación, el cálculo de las derivadas segundas de las variables medidas respecto a los parámetros (hessiano de $\Delta \mathbf{x}_i$) es costoso, por lo que se intenta evitar en la medida de lo posible. Así, por ejemplo, el método de Gauss-Newton se basa en aproximar $(2\mathbf{A}' \mathbf{A} + \mathbf{Q})$ por $(2\mathbf{A}' \mathbf{A})$, que sólo depende de las derivadas primeras. Además, la matriz $(\mathbf{A}' \mathbf{A})$ es siempre, al menos, semidefinida positiva, aunque puede ser singular. Se puede comprobar que el método de Gauss-Newton coincide con el operador lineal de mínimos cuadrados.

El algoritmo de Levenberg-Marquardt consiste en aproximar \mathbf{Q} por $\mu\mathbf{I}$, donde \mathbf{I} es la matriz identidad y μ un escalar, en principio arbitrario. A medida que el algoritmo se aproxima al mínimo, conviene que μ tienda a cero para que el método adquiera la velocidad asintótica de convergencia propia del algoritmo de Gauss-Newton. Cuando $\mu \rightarrow \infty$, el algoritmo proporciona un incremento de parámetros de tamaño infinitesimal en la dirección de máximo gradiente. A medida que μ disminuye, la magnitud del incremento aumenta y su dirección tiende a la de Gauss-Newton. Se trata de un algoritmo de velocidad de convergencia más baja que la del Gauss-Newton pero es más robusto.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, el proceso iterativo comienza partiendo de un punto inicial en el espacio de parámetros p_0 y se sigue con la expresión:

$$\Delta \mathbf{p}_k = (\mathbf{A}_k^t \mathbf{A}_k + \mu \mathbf{I})^{-1} \mathbf{A}_k^t \Delta \mathbf{x}_k$$

que proporciona el incremento de parámetros a aplicar, de forma que:

$$\Delta \mathbf{p}_{k+1} = \mathbf{p}_k + \Delta \mathbf{p}_k$$

Procediendo iterativamente, la condición de convergencia se puede imponer exigiendo estas dos condiciones:

$$\|\Delta \mathbf{p}_k\| < \varepsilon_1$$

$$|J_{k+1} - J_k| < \varepsilon_2$$

Si se utiliza el criterio de máxima verosimilitud, el algoritmo de Levenberg-Marquardt toma la expresión

$$\Delta \mathbf{p}_k = (\mathbf{A}_k^t \mathbf{C}_x^{-1} \mathbf{A}_k + \mu \mathbf{I})^{-1} \mathbf{A}_k^t \mathbf{C}_x^{-1} \Delta \mathbf{x}_k$$

Por otra parte, si se utiliza el criterio de máxima verosimilitud con información previa, esta expresión pasa a ser:

$$\Delta \mathbf{p} = \Delta \mathbf{p}^0 + (\mathbf{A}_k^t \mathbf{C}_x^{-1} \mathbf{A}_k + \mathbf{C}_p^{0-1} + \mu \mathbf{I})^{-1} \mathbf{A}_k^t \mathbf{C}_x^{-1} (\Delta \mathbf{x} - \mathbf{A} \Delta \mathbf{p}^0)$$

donde $\Delta \mathbf{p}^0 = \mathbf{p}^0 - \mathbf{p}$ y \mathbf{p}^0 es el vector inicial de parámetros procedentes de la información previa, con una estructura de error definida por \mathbf{C}_p^{0-1} . En caso de que $\mu \rightarrow 0$ en las expresiones anteriores, se obtiene el método de Gauss-Newton. Debido a que este parámetro representa una complejidad adicional, en principio se recomienda usar el método de Gauss-Newton, que resultó válido para todas las aplicaciones descritas en esta tesis.

3.4.2.4 CUANTIFICACIÓN DE LOS ERRORES DE MEDIDA

El modelo matemático utilizado proporciona el valor de las variables en función de los parámetros, la posición y el tiempo siguiendo la ecuación $z_m = f(x, t, p)$. El valor medido es z^* y el valor real z . La diferencia entre los valores medidos y calculados puede escribirse como:

$$z_m - z^* = (z_m - z) + (z - z^*) = \varepsilon_{\text{modelo}} + \varepsilon_{\text{medida}} \quad \varepsilon_{\text{modelo}} = \varepsilon_{\text{aproximación}} + \varepsilon_{\text{numérico}}$$

Según las expresiones anteriores, en total se cometen tres errores: uno debido a la precisión con la que se miden las variables con los diferentes aparatos de medida ($\varepsilon_{\text{medida}}$), otro debido a la aproximación de la realidad realizada con el modelo ($\varepsilon_{\text{aproximación}}$) y otro debido a la precisión con que se resuelven numéricamente las ecuaciones que describen el modelo matemático (error de truncamiento, error de redondeo, errores en la discretización espacial y temporal y errores en el cálculo de las derivadas, $\varepsilon_{\text{numérico}}$). En el proceso de minimización, el valor real no aparece por ser desconocido y sólo se puede utilizar la diferencia entre lo medido y lo calculado. Bajo el punto de vista del tratamiento estadístico teórico del problema, el error numérico no interviene al depender tan sólo de la precisión de la malla de elementos finitos utilizada, la discretización temporal y la precisión del ordenador con el que se trabaja.

A veces, se minimiza la estructura de error (Ledesma, 1987; Carrera, 1984) si se minimiza la expresión 4 de la sección 3.2.2. Ello introduce nuevos parámetros a identificar. En caso de no identificarla, es importante estudiar la influencia del grado de incertidumbre de las variables medidas en los resultados (Ferrante y Yeh, 1999). En Ledesma (1987), se demuestra

que puede desacoplarse la búsqueda del mínimo de la función objetivo para los parámetros, de la búsqueda del mínimo para la estructura de error, con lo que el método para identificarla consistirá en ir minimizando J para distintas estructuras de error hasta dar con la que proporciona el mínimo. A efectos de programación, permite organizar un código de identificación de parámetros y ampliarlo posteriormente para la identificación de estructuras de error, iterando sobre el anterior. Desgraciadamente, el tiempo de computación pasa de n a $n \times m$ donde n es el número medio de iteraciones necesarias para resolver el problema de identificación de parámetros y m las iteraciones necesarias para resolver el problema de la estructura de error. El tiempo de computación puede hacer inviable la resolución del problema de identificación de estructuras de error en el caso de un problema complejo con un número elevado de parámetros.

Si se mide una sola variable y la varianza de todas las medidas (σ^2) es la misma, ésta se puede calcular siguiendo la expresión (Wiggins, 1972):

$$\sigma^2 = \frac{J}{n - m}$$

donde J es la función objetivo calculada en el mínimo, n el número de lecturas y m el número de parámetros.

Los errores del modelo dan lugar a toda una teoría de identificación de modelos (Carrera, 1986). El modelo óptimo se suele elegir en función de las diferencias entre los valores medidos y calculados y el número de parámetros utilizado por éste. Así se hace un balance entre la complejidad del modelo y su precisión.

El error del modelo y la no normalidad de los errores de las medidas pueden ser estimados a nivel cualitativo: la función objetivo a minimizar, si se trabaja con el criterio de Markov (máxima verosimilitud sin información previa y con medidas independientes), es una suma de cuadrados de variables aleatorias gaussianas adimensionalizadas. La distribución de dicha suma es una χ^2 con tantos grados de libertad como sumandos: $\chi^2 = X_1^2 + X_2^2 + \dots + X_n^2$, donde X_i^2 es una variable aleatoria normal de media 0 y varianza 1.

En esta tesis, la variable aleatoria es una suma de cuadrados que dependen de p parámetros desconocidos (Bevington, 1969), ésta es una chi cuadrado con $n-p$ grados de libertad, donde n es el número de medidas y p el número de parámetros.

La esperanza matemática de una distribución chi cuadrado con $n-p$ grados de libertad es $n-p$, esto significa que si la hipótesis de normalidad es correcta y el modelo se ajusta bien a la realidad, la función objetivo con variables adimensionalizadas será aproximadamente $n-p$. El que el valor de la función objetivo sea mayor que $n-p$ puede ser debido a tres motivos:

- El modelo no reproduce bien la realidad.
- Los errores cometidos en las medidas son mayores de lo supuesto inicialmente.
- Los errores no son variables aleatorias gaussianas.

Los errores de medida se pueden cuantificar con bastante precisión siguiendo el procedimiento que se explica seguidamente. Para comprobar si los instrumentos de medida utilizados tienen errores que siguen una función de distribución gaussiana, se puede medir sucesivas veces una misma cantidad y seguidamente hacer un test de Kolmogorov-Smirnov.

Si el valor de la función objetivo es menor que $n-p$, puede significar que se está infravalorando la calidad de la información de las medidas al asignarles varianzas demasiado grandes.

Los errores de medida pueden ser:

-Errores accidentales: se cometen por un uso incorrecto de los aparatos de medida o por un incorrecto procesamiento de los datos: Error al leer la medida del instrumento, confundir un punto de lectura por otro, incorrecta calibración del aparato, uso del aparato fuera del intervalo en que fue calibrado, confusión de ensayos...

-Errores sistemáticos: se producen siempre y están asociados al aparato de medida (pérdida de la calibración con el uso), a procedimientos de ensayo incorrectos, diseños inadecuados de las células de ensayo, pérdida de eficacia de aislamientos hidráulicos o de calor, etc.

Los errores accidentales suelen ser fáciles de detectar cuando producen resultados ilógicos. Por el contrario, los errores sistemáticos son más difíciles de detectar y sólo se pueden reducir siguiendo un método de ensayo sistemático y controlando periódicamente los instrumentos de medida y control. También puede ser útil medir variables con distintos tipos de

transductor. Hay que tener en cuenta que muchos aparatos de medida pierden la calibración con el tiempo y se generan unos errores que no siguen una distribución gaussiana. Si estos errores son importantes, la hipótesis de normalidad en los errores de medida es incorrecta.

Las variables medidas pueden ser la humedad, la temperatura, los desplazamientos y las tensiones. El error total cometido en la medida de las tres últimas variables se debe al error que se produce debido a la precisión limitada del instrumento de medida (termopar para la temperatura, LVDT, micrómetro, calibre o pie de rey para los desplazamientos y transductores de presión o células de carga para las tensiones) más el error de posición que se produce al instalar el transductor en la muestra. La varianza total se calcula con la ecuación: $\sigma_{variable}^2 = \sigma_{aparato}^2 + (\delta v / \delta x) \sigma_{distancia}^2$ (Hollenbeck y Jensen, 1998), donde el primer término es el error del aparato de medida. $\delta v / \delta x$ es la derivada de la variable respecto a la posición de medida, y se multiplica por la desviación típica del aparato que mide la posición del transductor. De este modo, los puntos donde la variable varía más tienen un error de medida mayor.

La derivada de una variable respecto a la posición de medida se calcula numéricamente con la siguiente expresión:

$$\left[\frac{\delta v}{\delta x} \right]_i = \left[\frac{v_{i+1} - v_i}{x_{i+1} - x_i} \right] \times \left[\frac{x_i - x_{i-1}}{x_{i+1} - x_{i-1}} \right] + \left[\frac{v_i - v_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} \right] \times \left[\frac{x_{i+1} - x_i}{x_{i+1} - x_{i-1}} \right]$$

Donde v_{i+1} y v_{i-1} son el valor de la variable en los puntos a ambos lados del punto donde se valora la derivada y x_{i+1} y x_{i-1} la posición de dichos puntos. Como puede verse, es una media ponderada entre la derivada hacia adelante y hacia atrás, dando más peso a la que se calcula con el punto más cercano al punto donde se valora la derivada. Para los puntos extremos, se adopta la derivada hacia adelante (en el origen de coordenadas en la probeta) o hacia atrás (extremo opuesto al origen de coordenadas).

En el caso de la humedad, el error de medida de la balanza no proporciona directamente el error de medida de ésta, sino que debe calcularse siguiendo la teoría de propagación de errores: Al ser la humedad un cociente entre dos diferencias de pesadas, se tiene:

$$\sigma_{humedad} = 2 \times \sigma_{balanza} \times \left[\frac{(t + s + a) - (t + s)}{((t + s) - t)^2} + \frac{1}{(t + s) - t} \right], \text{ donde } t \text{ significa la tara del recipiente}$$

donde está el suelo al medir la humedad, s es el peso de suelo, a el peso de agua y σ_{balanza} es la desviación típica del peso medido con la balanza. Puede verse que a mayor cantidad de suelo utilizado, menor error cometido.

3.4.2.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Como se ha dicho anteriormente, el enfoque probabilístico del problema tiene muchas ventajas en el análisis de los resultados, ya que permite tener información a posteriori sobre la precisión con que se calculan los parámetros y sus relaciones.

En un entorno suficientemente pequeño del mínimo calculado, se pueden aproximar las variables como funciones lineales de los parámetros. Asintóticamente (al aumentar el número de medidas), el estimador de máxima verosimilitud sigue una distribución Gaussiana. Bajo la hipótesis de normalidad, la función de distribución de los parámetros queda definida por su media y su varianza. La media es estimador en sí misma. Respecto a la varianza, se puede demostrar (Bury, 1975) que una cota inferior de la misma es la inversa de la matriz de información de Fisher (F) definida como:

$$F_{ij} = \frac{1}{2} E \left[\frac{\partial^2 S}{\partial \beta_i \partial \beta_j} \right]$$

donde S es el logaritmo de la verosimilitud y β_i el componente i -ésimo del vector donde se encuentran los parámetros del modelo p y los parámetros estadísticos θ , las varianzas en este caso. E representa la esperanza matemática.

En Carrera (1984), se parte la matriz \mathbf{F} en cuatro submatrices, tal como se indica a continuación:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{pp} & \mathbf{I}_{p\theta} \\ \mathbf{I}_{\theta p} & \mathbf{I}_{\theta\theta} \end{bmatrix}$$

donde,

$$\mathbf{I}_{ppij} = \frac{1}{2} E \left[\frac{\partial^2 S}{\partial p_i \partial p_j} \right], \quad \mathbf{I}_{p\theta ij} = \mathbf{I}_{\theta p ij} = \frac{1}{2} E \left[\frac{\partial^2 S}{\partial p_i \partial \theta_j} \right], \quad \mathbf{I}_{\theta\theta ij} = \frac{1}{2} E \left[\frac{\partial^2 S}{\partial \theta_i \partial \theta_j} \right]$$

se demuestra también que no se puede dar una expresión general para los términos $\mathbf{I}_{\theta\theta}$ ni $\mathbf{I}_{p\theta}$. Esto, junto al hecho que interese sólo la matriz de covarianzas de los parámetros del modelo, permite tratar a θ_i como si estuvieran fijos en su óptimo, de este modo, $\mathbf{F}=\mathbf{I}_{pp}$.

Despreciando los términos de segundo orden y derivando S, se tiene:

$$I_{ppij} = E \left[\sum_r \sum_s \frac{\partial v_r}{\partial p_i} C_{xrs}^{-1} \frac{\partial v_s}{\partial p_j} + C_{pij}^{-1} \right], \text{ donde } \frac{\partial v_r}{\partial p_i} \text{ es el } r\text{-ésimo término del Jacobiano (matriz de}$$

sensibilidad) y C_p es la matriz de covarianzas de los parámetros a priori (información previa). De lo anterior, la cota inferior de la matriz de covarianzas obtenida será: $C_p = (\mathbf{A}' C_x^{-1} \mathbf{A} + C_p^{0-1})^{-1}$, donde \mathbf{A} es la matriz de sensibilidad. Este término debe calcularse para poder realizar la minimización, por lo que se obtiene en el proceso de cálculo de manera natural sin tener que hacer cálculos adicionales (si se usa el algoritmo de Levenbert-Marquardt, sólo hay que restar μ en los elementos de la diagonal).

Los elementos de la diagonal de la matriz C_p , proporcionan una cota inferior del error cometido al hacer la estimación. Puesto que el valor de los parámetros que se identifican pueden variar órdenes de magnitud se adimensionaliza, calculando:

$$\lambda_{pii} = \frac{\sqrt{c_{pii}}}{p_i}$$

De este modo, se puede conocer qué parámetros se identifican mejor. Aquellos que tengan λ menor, son los que se estiman con mayor precisión, ya que tienen un menor error relativo.

Otro aspecto importante a destacar es la correlación entre parámetros (coeficiente de correlación). Éste se calcula según la expresión:

$$\rho_{ij} = \frac{c_{pij}}{\sqrt{c_{pii}} \times \sqrt{c_{pij}}}$$

Este coeficiente varía entre -1 y 1 . Un valor cercano a -1 significa que cuando un parámetro crece, el otro disminuye y si el coeficiente se acerca a 1 , significa que cuando un parámetro crece, el otro también. Valores cercanos a cero indican escasa correlación.

La interpretación geométrica de estos resultados está clara en caso de estimar sólo dos parámetros. En un entorno suficientemente pequeño del mínimo, se puede aproximar la función objetivo a un paraboloides, con el mínimo situado en su vértice. Si ambos parámetros tienen el mismo peso en los resultados del ensayo, la elipse degenerará en una circunferencia y se tendrá que ambos parámetros tienen el mismo valor de λ_p . Bajo el punto de vista algebraico, se tendrá que los dos valores propios de la matriz C_p son idénticos, los vectores propios siguen los ejes donde se han definido los parámetros y el coeficiente de correlación sería nulo.

Si los valores propios son distintos pero el coeficiente de correlación sigue siendo nulo, se tiene una elipse cuyos ejes son los que definen los parámetros y su magnitud el valor propio correspondiente a cada vector propio. El caso en que la elipse degenera en un valle (un valor propio tendiendo a cero), indica que el parámetro asociado a este eje es inidentificable. Hay varios trabajos realizados sobre la identificabilidad del problema (Mous, 1993; Medina, 1993; Carrera y Neuman, 1986).

Lo que ocurre generalmente es que el coeficiente de correlación es no nulo. En este caso, la interpretación geométrica es que la elipse tiene los ejes orientados en unas direcciones distintas a las de los ejes que definen los parámetros. El coeficiente de correlación es una medida del ángulo que forman los ejes de la elipse con los ejes de coordenadas y su orientación. En el caso de que el coeficiente de correlación sea -1 o 1 , los ejes de la elipse están inclinados 45 grados respecto a los ejes de los parámetros (figura 3.4.2.5.1). Como en el caso anterior, puede ocurrir que uno de los valores propios tienda a cero. En este caso, ocurre que existirá una indeterminación, por haber un número infinito de combinaciones entre los dos parámetros que resuelven el problema.

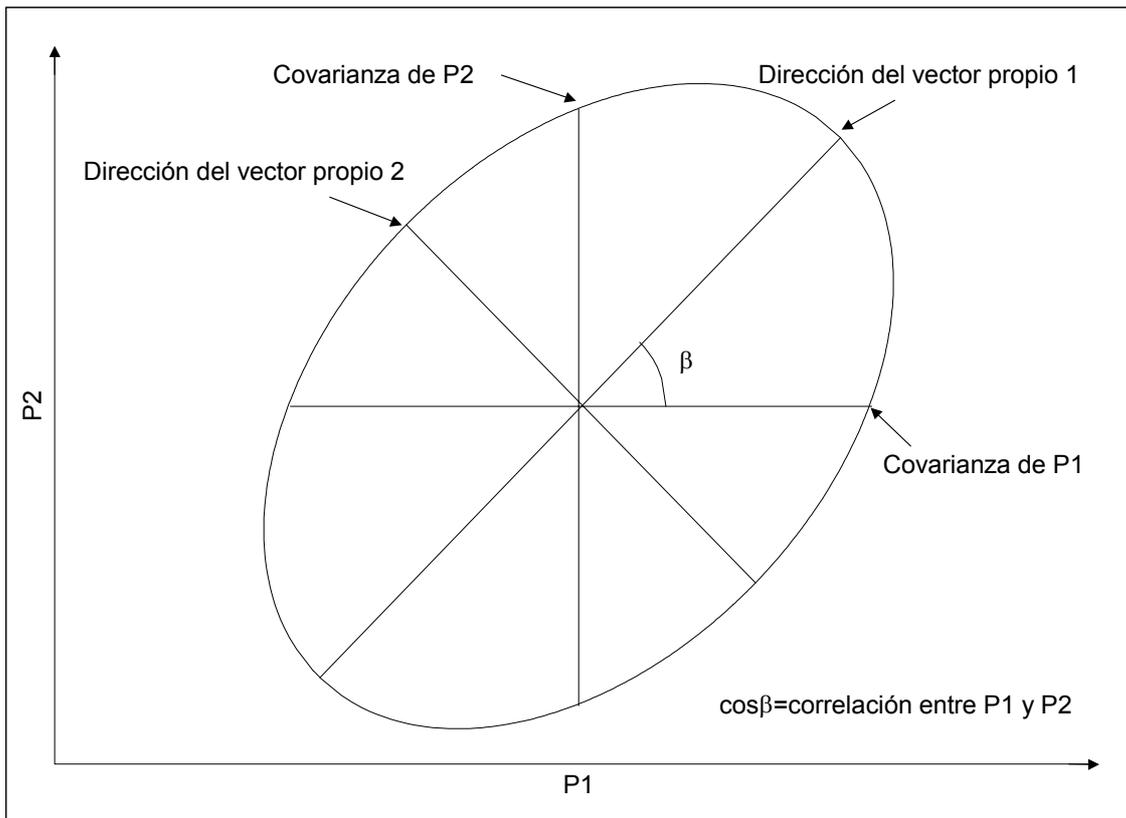


Figura 3.4.2.5.1 Interpretación geométrica de la matriz de covarianzas de los parámetros.

Es importante saber hasta qué punto la hipótesis de linealidad en un entorno del mínimo es válida. La no linealidad suele transformar el problema de identificación en un problema irresoluble debido a que a partir de un entorno muy cercano al mínimo, la función objetivo deja de semejarse a un paraboloides con tantas dimensiones como parámetros a identificar. La trayectoria de búsqueda del mínimo explicada anteriormente es óptima cuando la función objetivo es cuadrática, en cuyo caso se llega al mínimo con una sola iteración. Es de esperar que si la función a la que se busca el mínimo deja de ser cuadrática en un entorno muy pequeño alrededor de éste, el algoritmo de búsqueda será poco eficiente. Un ejemplo está en la determinación de la permeabilidad intrínseca, que es un parámetro que varía en órdenes de magnitud, siendo el problema muy no lineal con respecto a ésta. La determinación de este parámetro con las técnicas comentadas anteriormente es casi imposible. En estos casos se debe reparametrizar, estimando el valor resultante de aplicar una función determinada al parámetro inidentificable. En el caso de la permeabilidad, lo que se hace es identificar su logaritmo. En hidrogeología, este proceso es habitual cuando se estiman transmisividades. Geométricamente, lo que sucede es que la función objetivo en el mínimo no es un paraboloides sino que toma otra

forma que puede hacer imposible la calibración del modelo. Las figuras 3.4.2.5.2 y 3.4.2.5.3 representan la función objetivo del problema de identificación de la permeabilidad saturada y el exponente de la ley de permeabilidad relativa λ ($k_{r1} = S_e^\lambda$), a partir de los resultados experimentales de un ensayo de infiltración. La función objetivo se define como $\sum_{i=1}^n (\omega_m - \omega(k_0, \lambda))^2$, donde ω_m es la humedad medida y $\omega(k_0, \lambda)$ es la humedad calculada, donde k_0 es la permeabilidad intrínseca y λ el exponente de la ley de permeabilidad relativa. Se puede apreciar cómo la reparametrización mejora considerablemente la calibración al mejorar la convergencia y al disponer de una mejor información a posteriori por ser correcta la hipótesis de linealidad.

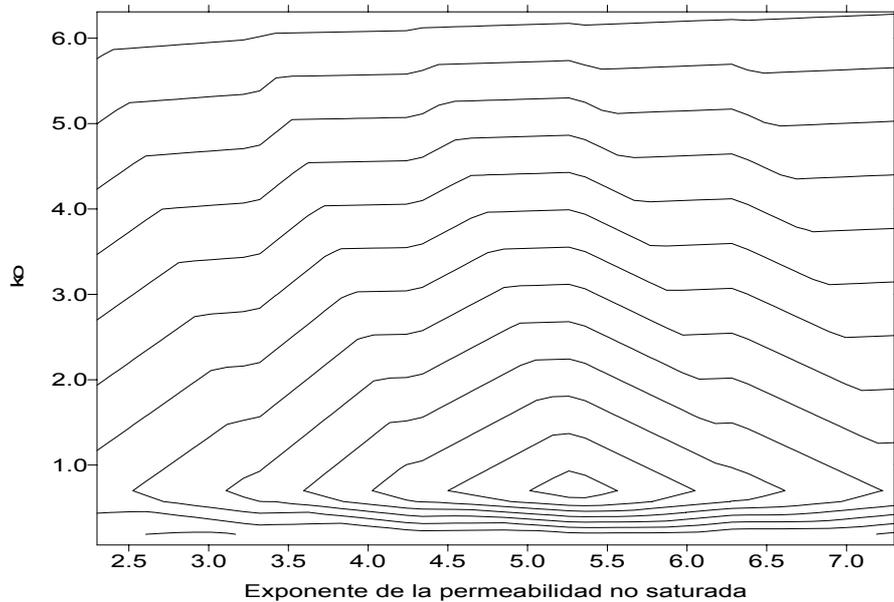


Figura 3.4.2.5.2. Función objetivo estimando sobre k_0

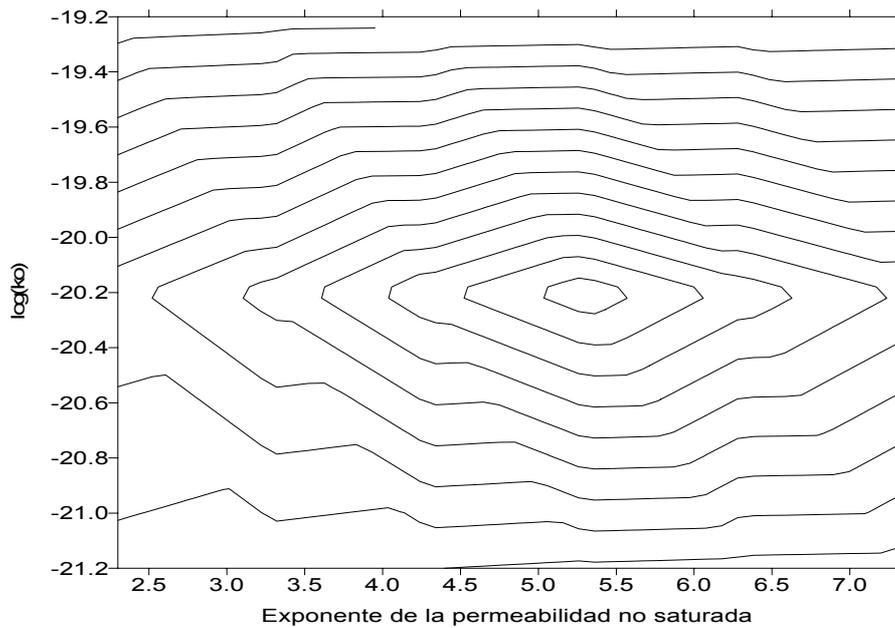


Figura 3.4.2.5.3. Función objetivo estimando sobre $\log(k_0)$

La verificación de la hipótesis de linealidad se puede hacer dibujando los contornos de la función objetivo una vez se conoce el mínimo (figuras 3.4.2.5.2 y 3.4.2.5.3), este método requiere un gran tiempo de computación puesto que es preciso resolver el problema directo muchas veces para poder interpolar satisfactoriamente la función objetivo. Por otra parte, si se estiman más de dos parámetros, no se puede dibujar esta función al tratarse de una superficie en un espacio $p+1$ dimensional, donde p es el número de parámetros a identificar. Un método que evita estos dos inconvenientes es el descrito en Beck y Arnold (1995).

Hay que remarcar que el objetivo buscado en esta tesis ha sido poder realizar una estimación de parámetros a partir de datos del laboratorio y poder comparar de forma cualitativa la calidad de unos resultados respecto a otros y las relaciones entre parejas de los mismos. Este estudio cualitativo enlaza con el estudio de los ensayos a partir del análisis de las ecuaciones del modelo. Esto permite comprobar las hipótesis realizadas a priori respecto a la posibilidad de estimar un parámetro o conocer las relaciones que hay entre ellos. No siempre estas relaciones son evidentes e, incluso a veces, la intuición da un resultado contrario al que se obtiene de un análisis más detallado.

3.4.3 ESTRUCTURA DEL CÓDIGO DE IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS

El código desarrollado está formado por una serie de programas FORTRAN activados de forma secuencial por un archivo de comandos del sistema operativo VMS, ya que se trata de usar CODE_BRIGHT como subrutina. El sistema está implementado para leer y escribir en el formato adecuado para que este último pueda trabajar. En la figura 3.4.3.1 se muestra el diagrama de flujo del sistema utilizado. El programa de instrucciones de VMS que gestiona todo el proceso es COMANDOS.COM. El sistema se puede implementar en cualquier otro sistema operativo (Unix, Windows) puesto que las instrucciones de VMS que utiliza son muy sencillas.

Como se ha dicho en la sección anterior, en la matriz de sensibilidad están incluidas las derivadas de las variables respecto a los parámetros en cada punto de medida. Puesto que no se conocen las funciones que relacionan las variables con los parámetros, estas derivadas deben calcularse de manera aproximada utilizando el método de las diferencias finitas. Será el usuario quien determine el cociente incremental y el tipo de diferencias finitas a usar (hacia delante, hacia atrás o centradas). En este trabajo se han usado diferencias finitas hacia adelante.

La preparación de los archivos de entrada de datos para ejecutar CODE_BRIGHT, se hace desde un programa de lectura-escritura (SUPER.EXE). La creación de los subdirectorios necesarios, copia de archivos de entrada de datos para CODE_BRIGHT y activación de este último se realiza desde un archivo de comandos (EXECUTE.COM) creado con el programa (LOGICO1.EXE).

Una vez ejecutado CODE_BRIGHT, es necesario leer sus resultados. Esto se hace desde el programa LECTOR.EXE. El proceso de cálculo, tal y como se ha indicado anteriormente, es iterativo. El cálculo de la matriz de sensibilidad y el siguiente valor del vector de parámetros se hace por medio del algoritmo de Levenberg-Marquardt o Gauss-Newton de minimización. Estos procesos los realiza otro programa (DERIVCAL.EXE) que acabará creando un archivo igual que el que empezó el proceso pero con los parámetros actualizados. Después de cada iteración, el sistema comprueba si se cumplen los requisitos de convergencia con un programa aparte (CONVERGENCIA.EXE). Generalmente, en este trabajo se han impuesto condiciones de convergencia imposibles de alcanzar con el fin de que el sistema siguiera iterando a pesar de haber llegado al mínimo. De este modo, se podía verificar de manera empírica la estabilidad del método.

El código no sólo permite estimar los parámetros, sino que también puede estimar su logaritmo. Este procedimiento es útil para parámetros que, como la permeabilidad, tienen una variación de algunos órdenes de magnitud. También es posible estimar parámetros que definen las condiciones de contorno, lo cual puede ser útil para el caso de ensayos donde se inyecta calor, agua o gas a una muestra y se quieren estudiar las posibles fugas, o para verificar alguna condición de contorno.

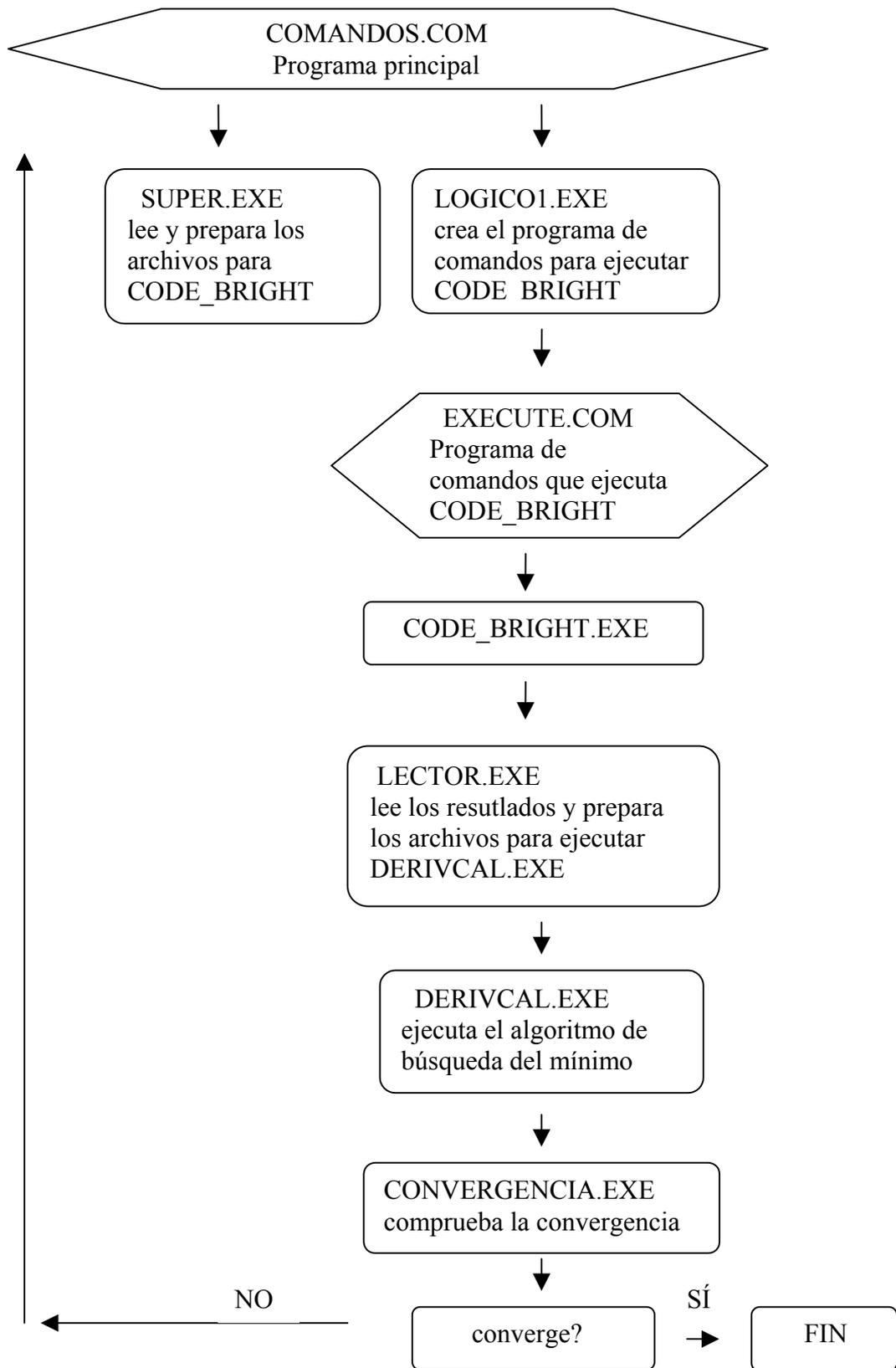


Figura 3.4.4.1. Diagrama de flujo del método de identificación de parámetros desarrollado

4. CARACTERIZACIÓN DEL SUELO UTILIZADO

En este capítulo se describirá la procedencia del material utilizado en los ensayos y se describirán también sus propiedades básicas, incluyendo los resultados de los ensayos convencionales de caracterización realizados en el laboratorio durante el desarrollo de esta tesis.

4.1- ANTECEDENTES

En 1987 comenzó un proyecto financiado por la UE (FI-IW-0191E), participado por ENRESA con la colaboración de CIEMAT. En él, se fijaron tres objetivos: Conocer la disponibilidad en España de arcillas idóneas como material de relleno y sellado para repositorios de residuos radioactivos de alta actividad, estudiar la posibilidad de utilizar arcillas ilíticas como alternativa a las arcillas esmectíticas para minimizar el desequilibrio mineralógico en ambiente granítico y estudiar las mezclas de arcilla y roca granítica molturada como material de relleno (Villar, 2000).

Realizada la prospección de materiales arcillosos en España, tras analizar muestras procedentes de diversas procedencias, se eligió el yacimiento del Cortijo de Archidona (Cabo de Gata, Almería). Los detalles del proceso de selección pueden encontrarse en Villar (2000).

4.1.1 CARACTERÍSTICAS DEL YACIMIENTO

El yacimiento está situado en una zona afectada por vulcanismo cenozoico de tipo adesítico-dacítico. La mayor parte de los materiales volcánicos están afectados por procesos de alteración epigenética posteriores al vulcanismo, de carácter neumatolítico e hidrotermal, en relación con una intensa fracturación (Villar, 2000). La explotación se configura como una corta cuyos hastiales están compuestos por rocas estériles y la bentonita aflora exclusivamente en la base (figura 4.1.1).

La descripción del yacimiento y el proceso de homogeneización y secado en la corta, el tratamiento en la fábrica, envasado y muestreo están descritos en Villar et al., 1997. A continuación se reseña brevemente este procedimiento.

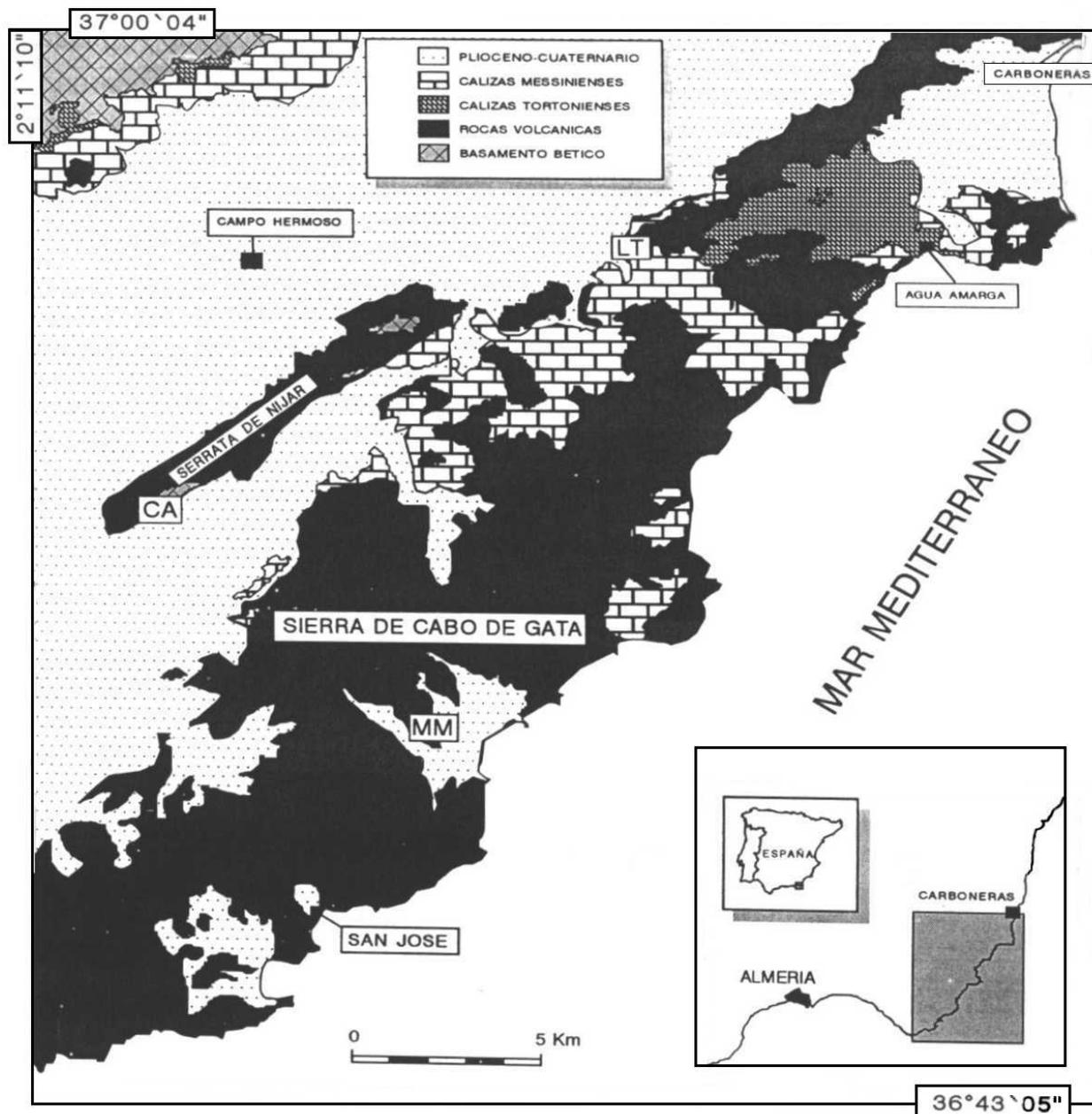


Figura 4.1 Mapa geológico de la zona del cabo de Gata (tomada de Villar, 2000)

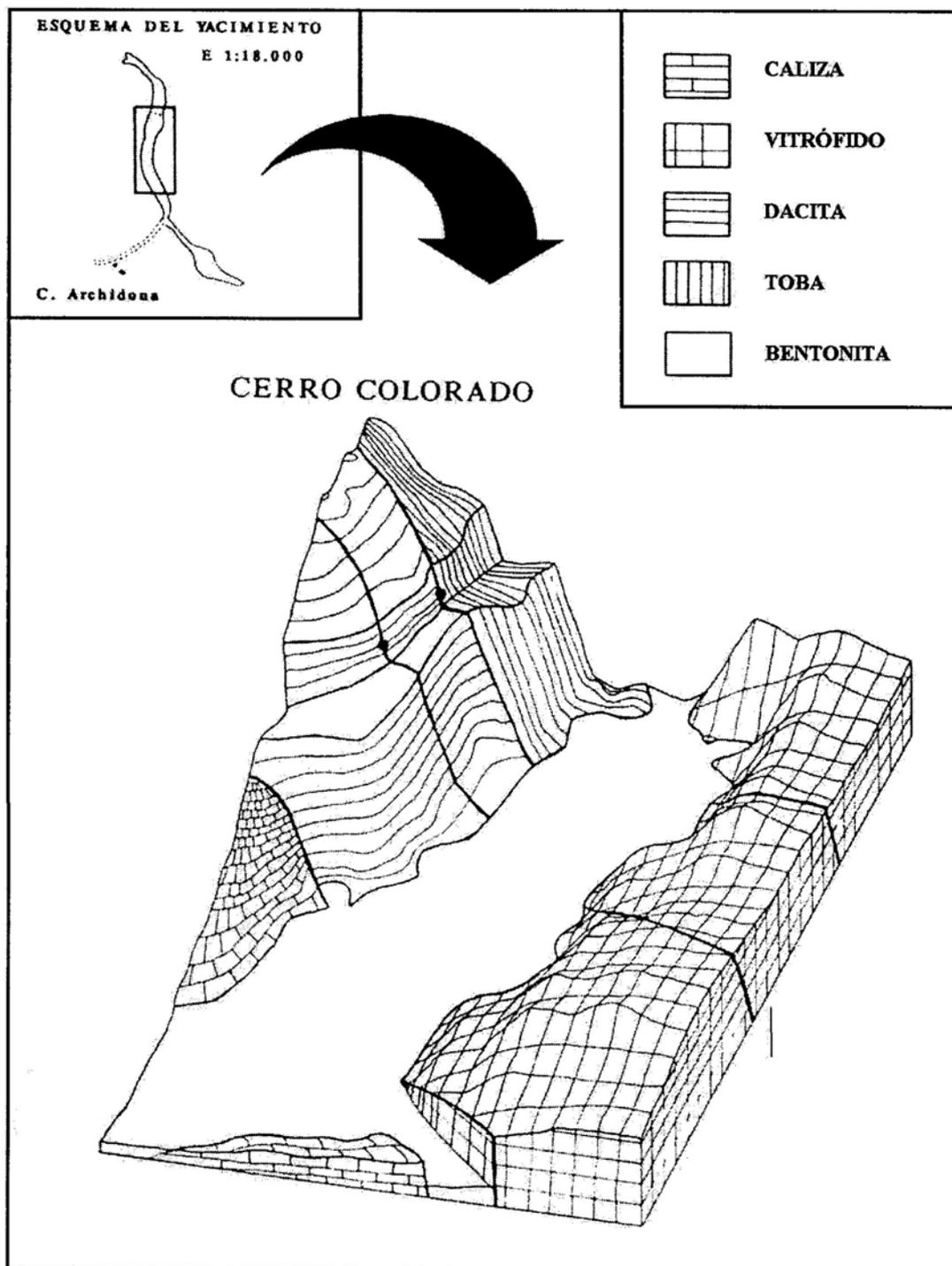


Figura 4.1.1 Esquema del yacimiento del Cortijo de Archidona (tomado de Villar, 2000)

En primer lugar se acondicionó y allanó una superficie, a la que se transportó el material desde la pila de acopio. Se extendió en una sola parva con un espesor uniforme de aproximadamente 0.30 m. La homogenización consistió en arar y voltear el material con máquinas de cadenas, desmenuzar de terrones y mezclar el material resultante por medio de

rotavátor, retirada manual de los cantos volcánicos y secado natural durante un día. Este sistema permite reducir los terrones de la parva. El procedimiento se repitió cuatro veces.

El tratamiento en la fábrica consistió en desmenuzar el material mediante un desmenuzador de palas hasta obtener un tamaño máximo de 10 cm. Este material ya fraccionado se transportó, mediante un alimentador lineal, a un desintegrador de rodillos lisos y rodillos con cuchillas, en el que se obtuvo un producto granulado con tamaño máximo de 5 cm. Posteriormente, el material pasó a un desecador rotatorio hasta alcanzar una humedad final de 13 ± 2 %. El sistema de clasificación constaba de dos partes: alimentación y cribado. La alimentación se efectuaba mediante un elevador de calgilonos y tolva con trampilla regulable. El cribado se realizaba mediante un tamiz con malla de 5 mm. El sistema de envasado consistía en una tolva de recepción de material, desde donde se realizó el llenado de grandes bolsas impermeables. El peso final de las mismas era de 1300 kg. Durante el envasado se tomó una muestra de 8-10 kg por cada 2.5 toneladas. Fueron denominadas 70-IMA-3-4-1 a 70-IMA-3-4-119. En el laboratorio de CIEMAT se mezcló la mitad del contenido de cada bolsa hasta formar una sola muestra homogénea denominada 70-IMA-3-4-0. Con cinco sacos de 20 kg de material procedente de esta muestra homogénea se han realizado los ensayos de esta tesis doctoral.

4.1.2 IDENTIFICACIÓN BÁSICA

Los límites de Atterberg obtenidos según las normas UNE son 92.9 para el límite líquido y 46.6 para el límite plástico, lo que indica un índice de plasticidad de 46.3. La curva granulométrica obtenida también según las normas UNE a partir de muestras procedentes de cada una de las cinco sacas que habían sido enviadas al laboratorio de geotecnia donde se realizó esta tesis puede verse en la figura 4.1.2.1. El porcentaje medio estimado de tamaño inferior a 2 micras es del orden del 45%, el contenido medio de tamaño limo (entre 2 y 74 micras) del 42% y el porcentaje medio de tamaño arena del 13%. Hay que señalar que probablemente el proceso de dispersión de partículas indicado en las Normas resulte insuficiente en este material y el contenido de partículas finas sea mayor que el obtenido en estos ensayos. El peso específico obtenido según las normas UNE es de 2.72 g/cm^3 . La humedad de la arcilla después del envasado era del 14.5% (Villar et al., 1997). La superficie externa específica, obtenida mediante técnicas de adsorción de gases (BET), es de $30 \text{ m}^2/\text{g}$

(Villar et al., 1997), muy baja para una bentonita con un contenido de montmorillonita superior al 90%, y la superficie específica total es de 640 m²/g (Villar et al., 1997).

El porcentaje de fracción menor que 1.4 μm, el límite líquido y la superficie específica aumentan si se somete a las muestras a una serie de ciclos de aumento-disminución de temperatura, esto se debe a una desagregación de partículas arcillosas, lo que se traduce en un aumento de superficies reactivas accesibles (Villar, 2000).

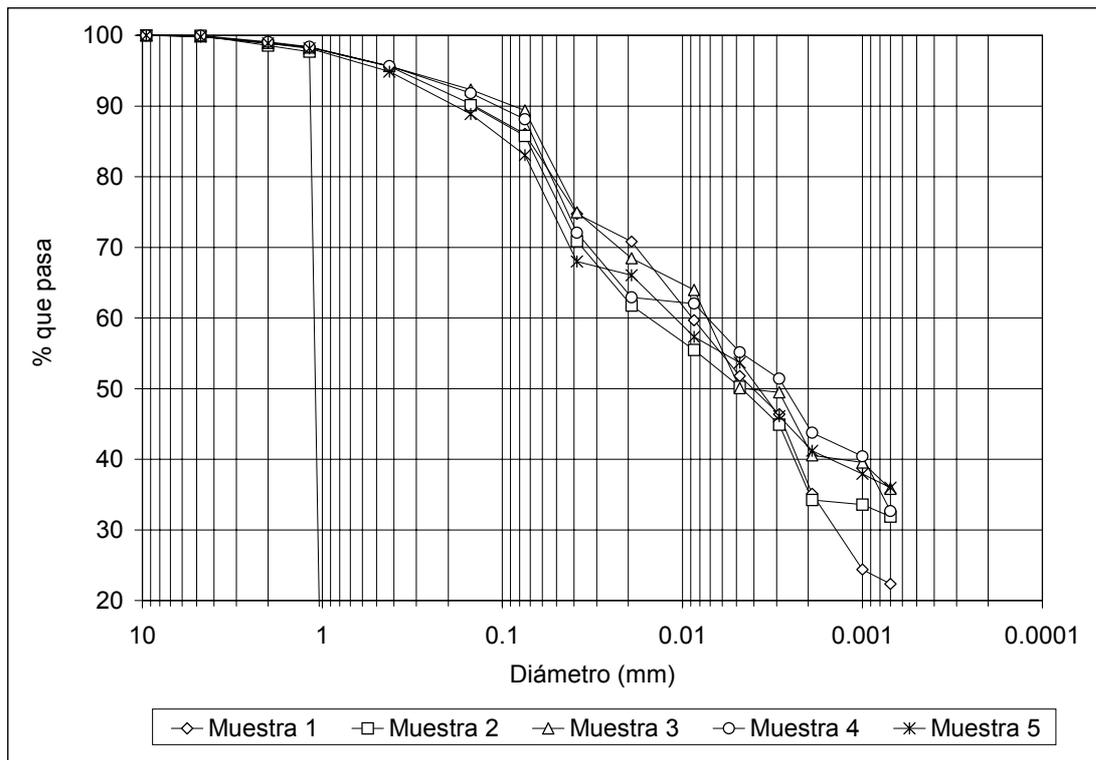


Figura 4.1.2.1 Curva granulométrica

4.1.3 CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA Y QUÍMICA

La caracterización mineralógica está descrita en Villar (2000), en esta tesis tan solo se describirán sus resultados de forma resumida. La caracterización se ha realizado por difracción de rayos X con muestras secadas a 60°C y molidas hasta un tamaño de grano inferior a 63 micras. Los minerales accesorios se determinaron por medio de un microscopio electrónico de barrido, acoplado a un sistema de análisis de rayos X dispersivo de energía, después de haber sido identificados y separados mediante un microscopio estereoscópico.

Los resultados obtenidos muestran que el material está constituido un 92 ± 3 % de esmectita, un 2 ± 1 % de cuarzo, un 2 ± 1 % de plagioclasa y un 2 ± 1 % de cristobalita. El feldespató potásico, la tridimita y la calcita aparecen usualmente como trazas.

Entre los minerales accesorios que aparecen se encuentran: fosfatos (apatito, xenotima, monacita), óxidos (ilmenita, magnetita), micas (sericita, biotita, biotita cloritizada), piroxenos, anfíboles y pirita. Todos ellos proceden de la roca volcánica original y representan en conjunto una proporción inferior al 1 %. Los sulfatos, la halita, el carbono orgánico y las fases amorfas también aparecen, sin llegar a constituir entre todos más de un 1 %.

4.2 CURVA DE RETENCIÓN

La curva de retención proporciona el grado de saturación que tiene un suelo cuando está sometido a una determinada succión. Esta curva es fundamental para la descripción del comportamiento de un suelo no saturado.

La curva de retención se determinó por medio de la técnica de imponer una succión determinada al suelo y medir posteriormente su humedad. El grado de saturación se calculó midiendo las dimensiones de la muestra y conociendo el peso específico de las partículas. La succión se impuso con el método de control de la humedad relativa ambiental. Este método consiste en colocar una muestra compactada (figura 4.2.3.2) en un recipiente hermético donde el vapor de agua de su interior está en equilibrio con una disolución. En función del soluto disuelto y su concentración, se puede imponer un intervalo teórico de succiones entre 1.0 MPa y 1000 MPa. Estas disoluciones pueden ser de un ácido, base, sal o producto orgánico, bien saturadas o bien a una concentración conocida. Con ácido sulfúrico se pueden obtener intervalos de succiones que varían entre los 3 y 1000 MPa (Gmitro y Vermeulen, 1964). Sin embargo, algunos autores sitúan el umbral de utilización de esta técnica en 10 MPa (Delage et al, 1998). El uso de sales y bases saturadas proporciona un intervalo de succión situado entre 2.7 MPa con sulfato de cobre pentahidratado hasta los 385 MPa del hidróxido de sodio (Lide, 1998). El polietilenglicol (PEG) es un producto orgánico que impone succiones bajas si se controla su concentración en agua. Williams and Shaykewich (1969), (en Atienza, 1999), dedujeron una relación entre la concentración de PEG 20000 en agua con la humedad relativa impuesta en el ambiente que la rodea con un psicrómetro, según esta curva, con una

concentración de 0.3 gPEG/gH₂O se impone una succión de 1 MPa. Sin embargo, la técnica de imposición de humedad relativa con este sistema debe ser estudiada con mayor profundidad. En esta tesis se ha utilizado la concentración mencionada para intentar fijar una succión de 1.0 MPa. La succión impuesta por medio de la técnica de humedad relativa controlada con una disolución acuosa es muy sensible a los cambios de temperatura cuando la succión a imponer es muy baja. Por tanto, hay que tener en cuenta en el análisis de resultados obtenidos en este intervalo de succión, que la fiabilidad en el valor de la succión impuesta será pequeña.

El método de imposición de succión elegido para obtener la curva de retención a temperatura ambiente, fue el de utilizar sales o hidróxidos saturados en el intervalo de 3-400 MPa. La ventaja que tiene este método respecto al de utilizar solutos con concentración conocida (ácido sulfúrico y cloruro de sodio principalmente), es que se evita el error producido al medir la concentración del soluto disuelto y el error al relacionarla con la presión de vapor impuesta, puesto que se debe interpolar una función que relacione la succión con la concentración de soluto en la disolución. Sin embargo, para obtener la curva de retención en función de la temperatura, se decidió utilizar el ácido sulfúrico como soluto a distintas concentraciones porque las relaciones disponibles de presión de vapor alrededor de la disolución - sal saturada no se pueden utilizar cuando la temperatura aumenta. En la tabla 4.2.1 se presentan las sales utilizadas y la succión que imponen en función de la temperatura (Lide, D.R., 1998). En la tabla 4.2.2 se presenta la concentración de ácido sulfúrico en una disolución acuosa en función de su densidad y su temperatura (Perry, 1993); en la tabla 4.2.3, la humedad relativa en el entorno de una disolución acuosa de ácido sulfúrico en función de la temperatura y la concentración de ácido en agua (Gmitro y Vermeulen, 1964).

Sal	Intervalo T (°C)	RH 25°C (%)	Succ 25°C (MPa)	A (%)	B (°K)	g de soluto/100g H ₂ O a 20°C	g de soluto/100g H ₂ O a 30°C
NaOH H ₂ O	15-60	6	385.77	5.48	27	109.00	119.00
LiBr 2H ₂ O*	10-30	6	385.77	0.23	996	168.10	193.26
ZnBr ₂ 2H ₂ O*	5-30	8	346.33	1.69	455	449.45	528.93
KOH 2H ₂ O	5-30	9	330.17	0.014	1924	112.00	126.00
LiCl H ₂ O*	20-65	11	302.66	14.53	-75	82.78	86.05
CaBr ₂ 6H ₂ O	11-22	16	251.28	0.17	1360	74.50	102.00
LiI 3H ₂ O*	15-65	18	235.13	0.15	1424	161.10	170.27
CaCl ₂ 6H ₂ O*	15-25	29	169.74	0.11	1653	143.90	170.27
MgCl ₂ 6H ₂ O	5-45	33	152.02	29.26	34	54.50	57.50
NaI 2H ₂ O*	5-45	38	132.67	3.62	702	177.01	191.55
Ca(NO ₃) ₂ 4H ₂ O	10-30	51	92.33	1.89	981	129.30	152.60
Mg(NO ₃) ₂ 6H ₂ O	5-35	53	87.05	25.28	220	66.50	84.75
NaBr 2H ₂ O	0-35	58	74.69	20.49	308	90.84	98.41
NH ₄ NO ₃	10-40	62	65.55	3.54	853	192.00	241.80
KI	5-30	69	50.88	29.35	254	143.90	152.53
SrCl ₂ 6H ₂ O	5-30	71	46.96	31.58	241	52.51	57.31
NaNO ₃	10-40	74	41.29	26.94	302	88.00	96.00
NaCl	10-40	75	39.45	69.2	25	36.00	36.30
NH ₄ Cl	10-40	79	32.32	35.67	235	37.20	41.40
KBr	5-25	81	28.89	40.98	203	65.02	70.65
(NH ₄) ₂ SO ₄	5-40	81	28.89	62.06	79	75.40	78.00
KCl	5-25	84	23.91	49.38	159	34.03	37.06
Sr(NO ₃) ₂ 4H ₂ O	5-25	85	22.28	28.34	328	69.49	88.68
BaCl ₂ 2H ₂ O	5-25	90	14.45	69.99	75	35.70	38.20
CsI	5-25	91	12.93	70.77	75	76.06	94.55
KNO ₃	0-50	92	11.43	43.22	225	31.60	45.80
K ₂ SO ₄	10-50	97	4.18	86.75	34	11.11	12.97

Tabla 4.2.1. Succiones impuestas por disoluciones de sales saturadas. $RH(\%)=A*\exp(B/T)$. En la segunda columna se indica el intervalo de temperaturas donde es válida la aproximación anterior; en las dos últimas, la cantidad de soluto necesaria para saturar la disolución a 20 y 30°C (Lide, 1998). El * junto a algunas sales significa que la solubilidad presentada es la de la sal sin hidratar.

Temperatura °C

Porcentaje en peso de H₂SO₄

%	0	10	15	20	25	30	40	50	60	80
1	1.0074	1.0068	1.006	1.0051	1.0038	1.0022	0.9986	0.9944	0.9895	0.9779
2	1.0147	1.0138	1.0129	1.0118	1.0104	1.0087	1.005	1.0006	0.9956	0.9839
3	1.0219	1.0206	1.0197	1.0184	1.0169	1.0152	1.0113	1.0067	1.0017	0.99
4	1.0291	1.0275	1.0264	1.025	1.0234	1.0216	1.0176	1.0129	1.0078	0.9961
5	1.0364	1.0344	1.0332	1.0317	1.03	1.0281	1.024	1.0192	1.014	1.0022
6	1.0437	1.0414	1.04	1.0385	1.0367	1.0347	1.0305	1.0256	1.0203	1.0084
7	1.0511	1.0485	1.0469	1.0453	1.0434	1.0414	1.0371	1.0321	1.0266	1.0146
8	1.0585	1.0556	1.0539	1.0522	1.0502	1.0481	1.0437	1.0386	1.033	1.209
9	1.066	1.0628	1.061	1.0591	1.0571	1.0549	1.0503	1.0451	1.0395	1.273
10	1.0735	1.07	1.0681	1.0661	1.064	1.0617	1.057	1.0517	1.046	1.338
11	1.081	1.0773	1.0753	1.0731	1.071	1.0686	1.0637	1.0584	1.0526	1.0403
12	1.0886	1.0846	1.0825	1.0802	1.078	1.0756	1.0705	1.0651	1.0593	1.0469
13	1.0962	1.092	1.0898	1.0874	1.0851	1.0826	1.0774	1.0719	1.0661	1.0536
14	1.1039	1.0994	1.0971	1.0947	1.0922	1.0897	1.0844	1.0788	1.0729	1.0603
15	1.1116	1.1069	1.1045	1.102	1.0994	1.0968	1.0914	1.0857	1.0798	1.0671
16	1.1194	1.1145	1.112	1.1094	1.1067	1.104	1.0985	1.0927	1.0868	1.074
17	1.1272	1.1221	1.1195	1.1168	1.1141	1.1113	1.1057	1.0998	1.0938	1.0809
18	1.1351	1.1298	1.1271	1.1243	1.1215	1.1187	1.1129	1.107	1.1009	1.0879
19	1.143	1.1375	1.1347	1.1318	1.129	1.1261	1.1202	1.1142	1.1081	1.095
20	1.151	1.1453	1.1424	1.1394	1.1365	1.1335	1.1275	1.1215	1.1153	1.1021
21	1.159	1.1531	1.1501	1.1471	1.1441	1.141	1.1349	1.1288	1.1226	1.093
22	1.167	1.1609	1.1579	1.1548	1.1517	1.1486	1.1424	1.1362	1.1299	1.1166
23	1.1751	1.1688	1.1657	1.1626	1.1594	1.1563	1.15	1.1437	1.1373	1.239
24	1.1832	1.1768	1.1736	1.1704	1.1672	1.164	1.1576	1.1512	1.1448	1.1313
25	1.1914	1.1848	1.1816	1.1783	1.175	1.1718	1.1653	1.1588	1.1523	1.388
26	1.1996	1.1929	1.1896	1.1862	1.1829	1.1796	1.173	1.1665	1.1599	1.1463
27	1.2078	1.201	1.1976	1.1942	1.1909	1.1875	1.1808	1.1742	1.1676	1.1539
28	1.216	1.2091	1.2057	1.2023	1.1989	1.1955	1.1887	1.182	1.1753	1.1616
29	1.2243	1.2173	1.2138	1.2104	1.2069	1.2033	1.1966	1.1898	1.1831	1.1693
30	1.2326	1.2255	1.222	1.2185	1.215	1.2115	1.2046	1.1977	1.1909	1.1771
31	1.2409	1.2338	1.2302	1.2267	1.2232	1.2196	1.2126	1.2057	1.1988	1.1849
32	1.2493	1.2421	1.2385	1.2349	1.2314	1.2278	1.2207	1.2137	1.2068	1.1928
33	1.2577	1.2504	1.2468	1.2432	1.2396	1.236	1.2289	1.2218	1.2148	1.2008
34	1.2661	1.2588	1.2552	1.2515	1.2479	1.2443	1.2371	1.23	1.2229	1.2088
35	1.2746	1.2672	1.2636	1.2599	1.2563	1.2526	1.2454	1.2383	1.2311	1.2169
36	1.2831	1.2757	1.272	1.2684	1.2647	1.261	1.2538	1.2466	1.2394	1.2251
37	1.2917	1.2843	1.2805	1.2769	1.2732	1.2695	1.2622	1.255	1.2477	1.2334
38	1.3004	1.2929	1.2891	1.2855	1.2818	1.278	1.2707	1.2635	1.2561	1.2418
39	1.3091	1.3016	1.2978	1.2941	1.2904	1.2866	1.2793	1.272	1.2646	1.2503
40	1.3179	1.3103	1.3065	1.3028	1.2991	1.2953	1.288	1.2806	1.2732	1.2589
41	1.3268	1.3191	1.3153	1.3116	1.3079	1.3041	1.2967	1.2893	1.2819	1.2675
42	1.3357	1.328	1.3242	1.3205	1.3167	1.3129	1.3055	1.2981	1.2907	1.2762
43	1.3447	1.337	1.3332	1.3294	1.3256	1.3218	1.3144	1.307	1.2996	1.285
44	1.3538	1.3461	1.3423	1.3384	1.3346	1.3308	1.3234	1.316	1.3086	1.2939
45	1.363	1.3553	1.3515	1.3476	1.3437	1.3399	1.3325	1.3251	1.3177	1.3029
46	1.3724	1.3646	1.3608	1.3569	1.353	1.3492	1.3417	1.3343	1.3269	1.312
47	1.3819	1.374	1.3702	1.3663	1.3624	1.3586	1.351	1.3435	1.3362	1.3212
48	1.3915	1.3835	1.3797	1.3758	1.3719	1.368	1.3604	1.3528	1.3455	1.3305
49	1.4012	1.3931	1.3893	1.3854	1.3814	1.3775	1.3699	1.3623	1.3549	1.3399

Tabla 4.2.2 ../..

Temperatura °C

Porcentaje en peso de H₂SO₄

	0	10	15	20	25	30	40	50	60	80
50	1.411	1.4029	1.399	1.3951	1.3911	1.3872	1.3795	1.3719	1.3644	1.3494
51	1.4209	1.4128	1.4088	1.4049	1.4009	1.397	1.3893	1.3816	1.374	1.359
52	1.431	1.4228	1.4188	1.4148	1.4109	1.4069	1.3991	1.3914	1.3837	1.3687
53	1.4412	1.4329	1.4289	1.4248	1.4209	1.4169	1.4091	1.4013	1.3936	1.3785
54	1.4515	1.4431	1.4391	1.435	1.431	1.427	1.4191	1.4113	1.4036	1.3884
55	1.4619	1.4535	1.4491	1.4453	1.4412	1.4372	1.4293	1.4214	1.4137	1.3984
56	1.4724	1.464	1.4598	1.4557	1.4516	1.4475	1.4396	1.4317	1.4239	1.4085
57	1.483	1.4746	1.4703	1.4662	1.4621	1.458	1.45	1.442	1.4342	1.4187
58	1.4937	1.4852	1.4809	1.4768	1.4726	1.4685	1.4604	1.4524	1.4446	1.429
59	1.5045	1.4959	1.4916	1.4875	1.4832	1.4791	1.4709	1.4629	1.4551	1.4393
60	1.5154	1.5067	1.5024	1.4983	1.494	1.4898	1.4816	1.4735	1.4656	1.4497
61	1.5264	1.5177	1.5133	1.5091	1.5048	1.5006	1.4923	1.4842	1.4762	1.4602
62	1.5375	1.5287	1.5243	1.52	1.5157	1.5115	1.5031	1.495	1.4869	1.4708
63	1.5487	1.5398	1.5354	1.531	1.5267	1.5225	1.514	1.5058	1.4977	1.4815
64	1.56	1.551	1.5465	1.5421	1.5378	1.5335	1.525	1.5167	1.5086	1.4923
65	1.5714	1.5623	1.5578	1.5533	1.549	1.5446	1.5361	1.5277	1.5195	1.5031
66	1.5828	1.5736	1.5691	1.5646	1.5602	1.5558	1.5472	1.5388	1.5305	1.514
67	1.5943	1.585	1.5805	1.576	1.5715	1.5671	1.5584	1.5499	1.5416	1.5249
68	1.6059	1.5965	1.592	1.5874	1.5829	1.5785	1.5697	1.5611	1.5528	1.5359
69	1.6176	1.6081	1.6035	1.5989	1.5944	1.5899	1.5811	1.5724	1.564	1.547
70	1.6293	1.6198	1.6151	1.6105	1.6059	1.6014	1.5925	1.5838	1.5753	1.5582
71	1.6411	1.6315	1.6268	1.6221	1.6175	1.613	1.604	1.5952	1.5867	1.569
72	1.6529	1.6433	1.6385	1.6338	1.6292	1.6246	1.6155	1.6067	1.5981	1.5806
73	1.6648	1.6551	1.6503	1.6456	1.6409	1.6363	1.6271	1.6182	1.6095	1.5919
74	1.6768	1.667	1.6622	1.6574	1.6526	1.648	1.6387	1.6297	1.6209	1.6031
75	1.6888	1.6789	1.674	1.6692	1.6644	1.6597	1.6503	1.6412	1.6322	1.6142
76	1.7008	1.6908	1.6858	1.681	1.6761	1.6713	1.6619	1.6526	1.6435	1.6252
77	1.7128	1.7026	1.6976	1.6927	1.6878	1.6829	1.6734	1.664	1.6547	1.6361
78	1.7247	1.7144	1.7093	1.7043	1.6994	1.6944	1.6847	1.6751	1.6657	1.6469
79	1.7365	1.7261	1.7209	1.7158	1.7108	1.7058	1.6959	1.6862	1.6766	1.6575
80	1.7482	1.7376	1.7323	1.7272	1.7221	1.717	1.7069	1.6971	1.6873	1.668
81	1.7597	1.7489	1.7435	1.7383	1.7331	1.7279	1.7177	1.7077	1.6978	1.6782
82	1.7709	1.7599	1.7544	1.7491	1.7437	1.7385	1.7281	1.718	1.708	1.6882
83	1.7815	1.7704	1.7649	1.7594	1.754	1.7487	1.7382	1.7279	1.7179	1.6979
84	1.7916	1.7804	1.7748	1.7693	1.7639	1.7585	1.7479	1.7375	1.7274	1.7072
85	1.8009	1.7897	1.7841	1.7786	1.7732	1.7678	1.7571	1.7466	1.7364	1.7261
86	1.8095	1.7983	1.7927	1.7872	1.7818	1.7763	1.7657	1.7552	1.7449	1.7245
87	1.8173	1.8061	1.8006	1.7951	1.7897	1.7842	1.7736	1.7632	1.7529	1.7324
88	1.8243	1.8132	1.8077	1.8022	1.7968	1.7914	1.7809	1.7705	1.7602	1.7397
89	1.8306	1.8195	1.8141	1.8087	1.8033	1.7979	1.7874	1.777	1.7669	1.7464
90	1.8361	1.8252	1.8198	1.8144	1.8091	1.8038	1.7933	1.7829	1.7729	1.7525
91	1.841	1.8302	1.8248	1.8195	1.8142	1.809	1.7986	1.7883	1.7783	1.7581
92	1.8453	1.8346	1.8293	1.824	1.8188	1.8136	1.8033	1.7932	1.7832	1.7633
93	1.849	1.8384	1.8331	1.8279	1.8227	1.8176	1.8074	1.7974	1.7876	1.7681

Tabla 4.2.2. Densidad (g/cm³) de una disolución de ácido sulfúrico en función de la temperatura (°C) y tanto por ciento en peso respecto al agua (peso de ácido/(peso de ácido+peso de agua), Perry, 1993).

		Temperatura (°C)							
		0	10	20	30	40	50	60	80
Porcentaje en peso de H₂SO₄ (%)	2	0.67	0.73	0.83	0.92	0.99	1.03	1.06	0.97
	4	1.58	1.68	1.81	1.92	2.01	2.08	2.10	2.04
	6	2.93	3.05	3.20	3.34	3.48	3.59	3.69	3.77
	8	4.50	4.64	4.81	5.00	5.20	5.37	5.54	5.82
	10	6.21	6.37	6.58	6.80	7.05	7.29	7.53	7.97
	12	8.01	8.20	8.45	8.73	9.02	9.30	9.57	10.14
	14	9.94	10.19	10.48	10.79	11.11	11.42	11.73	12.35
	16	12.07	12.36	12.69	13.02	13.36	13.70	14.00	14.64
	18	14.47	14.91	15.14	15.51	15.85	16.19	16.51	17.14
	20	17.22	17.57	17.93	18.30	18.66	18.99	19.30	19.91
	22	20.41	20.76	21.13	21.50	21.85	22.16	22.46	23.06
	24	24.11	24.45	24.81	25.16	25.50	25.80	26.09	26.68
	26	28.41	28.71	29.04	29.37	29.67	29.97	30.22	30.84
	28	33.35	33.62	33.90	34.18	34.46	34.72	34.97	35.56
	30	39.01	39.21	39.43	39.66	39.90	40.13	40.34	40.93
	32	45.40	45.53	45.68	45.85	46.03	46.21	46.38	46.98
	34	52.61	52.64	52.71	52.82	52.93	53.06	53.16	53.70
	36	60.64	60.59	60.60	60.60	60.64	60.68	60.71	61.17
	38	69.56	69.42	69.33	69.28	69.21	69.15	69.12	69.43
	40	79.41	79.20	79.03	78.85	78.69	78.54	78.40	78.53
42	90.25	89.98	89.73	89.45	89.19	88.91	88.61	88.54	
44	102.14	101.84	101.51	101.15	100.76	100.33	99.91	99.57	
46	115.20	114.86	114.45	113.98	113.49	112.93	112.36	111.69	
48	129.54	129.18	128.70	128.16	127.54	126.82	126.05	125.08	
50	145.24	144.87	144.35	143.76	143.00	142.16	141.19	139.90	
52	162.49	162.16	161.61	160.92	160.03	159.06	157.94	156.28	
54	181.46	181.16	180.58	179.84	178.86	177.71	176.43	174.44	
56	202.36	202.10	201.52	200.74	199.67	198.40	196.89	194.56	
58	225.45	225.20	224.66	223.80	222.66	221.20	219.59	216.92	
60	250.95	250.78	250.25	249.26	248.02	246.46	244.70	241.69	
62	279.08	279.02	278.53	277.56	276.17	274.48	272.43	269.13	
64	310.38	310.39	309.85	308.83	307.27	305.44	303.13	299.45	
66	345.10	345.17	344.50	343.37	341.81	339.57	337.13	332.76	
68	383.56	383.53	382.93	381.63	379.91	377.43	374.62	369.67	
70	426.32	426.28	426.29	424.22	422.09	419.10	415.82	409.86	
72	473.55	474.03	472.85	471.18	468.32	465.15	461.35	454.09	
74	526.53	526.72	525.35	522.79	519.81	515.96	511.36	502.69	
76	585.25	585.31	583.09	580.14	576.59	571.81	566.08	536.29	
80	720.92	719.48	1026.36	711.30	705.24	698.62	690.21	676.61	
85	937.50	933.40	924.27	914.23	903.66	891.56	879.20	858.67	
90	1179.25	1167.07	1153.61	1139.25	1124.45	1109.32	1093.93	1068.93	
94	1377.92	1366.94	1354.67	1340.85	1326.49	1310.81	1295.26	1269.04	
98	1679.04	1675.80	1669.81	1661.42	1651.65	1640.48	1627.37	1608.75	

Tabla 4.2.3. Valores de la succión (MPa) para diversas temperaturas (°C) y porcentaje de sulfúrico (peso de ácido/(peso de ácido+peso de agua), Gmitro y Vermeulen, 1964).

El problema principal que plantea este método es el cambio de temperatura en el laboratorio, el cual, puede alterar la humedad relativa que impone una sal saturada o el ácido

sulfúrico a una determinada concentración. Se ha cuantificado este efecto. Si la succión se impone con una sal saturada, la relación entre la succión impuesta y la temperatura es lineal y depende mucho del tipo de sal utilizada para imponer la succión.

La relación entre la humedad relativa (HR) que imponen estas sales y la temperatura (T) es del tipo $HR(\%) = A \times \exp\left(\frac{B}{T}\right)$. Según la ley psicrométrica, la succión s se expresa como

$$s = -\frac{R \times T \times \rho_L}{M_\omega} \times \ln(HR), \text{ donde } R \text{ es una constante de los gases y es igual a } 8.314 \text{ J/molK,}$$

M_ω es la masa molar del agua y ρ_L la densidad del líquido. Si se calcula la derivada de la succión respecto de la temperatura, se tiene:

$$\frac{\partial s}{\partial T} = \frac{\partial}{\partial T} \left(-\frac{R \times T \times \rho_L}{M_\omega} \times \ln\left(A \times \exp\left(\frac{B}{T}\right)\right) \right) = -\frac{R \times \rho_L}{M_\omega} \times \ln(A)$$

Según la relación anterior, si se utiliza sulfato de potasio para imponer la succión, el aumento de temperatura provocará un aumento de 0.066 MPa/°C, si se utiliza cloruro de sodio, el aumento es de 0.17 MPa/°C y si se utiliza hidróxido de sodio hidratado, el aumento es de 1.34 MPa/°C. De lo anterior se deduce que para succiones por debajo de los 10 MPa, hay que elegir un tipo de sal que sea poco sensible a los cambios de temperatura cuando impone la succión de una muestra. Para comprobarlo, se puede utilizar la expresión anterior. En esta tesis se utilizó sulfato de potasio para imponer la succión más baja. A 22°C impone 3.65 MPa y un cambio de temperatura de un grado significa cambiar la succión a 3.58 o 3.72 MPa, dependiendo que disminuya o aumente la temperatura. Este cambio de succión se consideró asumible.

En el caso de utilizar ácido sulfúrico, se ha comprobado que la relación entre la humedad relativa que impone una disolución determinada y la temperatura puede asimilarse a una recta cuya pendiente se puede calcular en intervalos de 10°C con la información disponible, de este modo, se tiene que $RH = A \times T + B$. Si se calcula la derivada de la succión respecto de la temperatura, se tiene:

$$\frac{\partial s}{\partial T} = \frac{\partial}{\partial T} \left(-\frac{R \times T \times \rho_L}{M_\omega} \times \ln(A \times T + B) \right) = -\frac{R \times \rho_L}{M_\omega} \times \ln(HR) - \frac{R \times T \times \rho_L}{M_\omega} \times \frac{1}{HR} \times A$$

En la tabla siguiente, se puede ver la variación de succión impuesta con la temperatura. Para succiones bajas, este efecto es mayor.

% peso de ácido sulfúrico	Succión (MPa)	$\partial s / \partial T$ (MPa/°C)
a 10 %	6.58	1.07
a 20 %	17.93	0.65
a 30 %	39.42	0.29
a 40 %	79.03	0.04
a 50 %	144.35	-0.04
a 60 %	250.25	0.00
a 70 %	426.29	0.07
a 80 %	1026.36	0.10
a 90 %	1153.67	0.05

Tabla 4.2.4 Variación de la succión con la temperatura

El procedimiento a seguir para realizar este ensayo se encuentra descrito en el procedimiento del proyecto FEBEX 70-UPC-G-0-03.

4.2.1 CURVA DE RETENCIÓN SIN CONFINAMIENTO A 22 °C

En estos ensayos no se coarta el movimiento de la muestra, permitiéndole hinchar o retraer libremente según ésta absorba o expulse agua. También se midieron los cambios de volumen con el fin de conocer los cambios de densidad y grado de saturación.

Los ensayos se han realizado en desecadores y en envases herméticos donde se imponía una humedad relativa con sales saturadas. Las muestras tenían unas dimensiones de 22 mm de diámetro por 21 mm de altura aproximadamente. Los desecadores, de mayor tamaño que los envases pero menos eficaces para aislar, se usaron tan sólo para estabilizar las muestras a una succión aproximada de 392 MPa impuesta con NaOH para empezar una trayectoria de secado - mojado, y de una succión aproximada de 3.7 MPa con K₂SO₄ para empezar una trayectoria de mojado - secado. Como puede verse en los gráficos 4.2.1.1 y 4.2.1.2, los puntos iniciales del grupo de muestras del desecador no siguen bien la curva de retención dado que los desecadores utilizados no eran herméticos. Aunque la succión de la muestra era sólo aproximada, los puntos se consideran suficientemente válidos para asegurar que se van a seguir las trayectorias deseadas. El tiempo de permanencia de las muestras en ambiente con humedad relativa controlada era de un mínimo de 30 días. Este tiempo se fijó a raíz de que en los ensayos

edométricos presentados en CEC (1994), se tardaba del orden de tres semanas en estabilizar la succión de las muestras en atmósfera controlada, en un recipiente con una relación superficie de evaporación/volumen de aire menor que el utilizado para obtener la curva de retención.

Se han realizado tres trayectorias distintas cuyos resultados pueden verse en los gráficos adjuntos. La densidad seca inicial promedio era de 1.64 g/cm^3 con una desviación típica de 0.0215 y la humedad inicial de 12.53 % con una desviación típica de 0.36 %. En la primera, las muestras se llevaron a una succión de aproximadamente 382 MPa impuesta por una disolución de NaOH y, finalmente, se humedecieron llevándolas a succiones menores. Los resultados de esta trayectoria se pueden apreciar en la figura 4.2.1.1. En la segunda trayectoria, las muestras se llevaron a una succión de aproximadamente 3.7 MPa impuesta por una disolución de K_2SO_4 saturada en agua dentro de un desecador; posteriormente estas muestras se secaron llevándolas a succiones mayores. En la figura 4.2.1.2 se muestran los resultados obtenidos.

De los resultados obtenidos, se pueden deducir las siguientes relaciones:

$\omega (\%) = (45,1 \rho_{d0} - 39,2) - (18,7 \rho_{d0} - 20,6) \log_{10} s$, donde ρ_{d0} es la densidad seca inicial de la muestra expresada en g/cm^3 y s su succión expresada en MPa.

$\rho_d = 1,15 s^{0,13} \rho_{d0}^{-0,15}$, donde ρ_{d0} es la densidad seca inicial de la muestra expresada en g/cm^3 .

$S_r (\%) = \frac{\rho_s \rho_d \omega(\rho_{d0}, s)}{\rho_w (\rho_s - \rho_d)}$, donde ω es la humedad de la muestra calculada a partir de la

relación anterior, ρ_s es la densidad de las partículas, ρ_d es la densidad seca de la muestra calculada a partir de la relación anterior y ρ_w es la densidad del agua, que se supone que es 1.0 g/cm^3 . Esta última relación se dibuja en las figuras 4.2.1.1 y 4.2.1.2.

En la tercera trayectoria, las muestras se llevaron a succiones diversas; después la muestra se humedeció si inicialmente se había secado y se secó en caso contrario; en la figura 4.2.1.3 pueden apreciarse los resultados obtenidos. Estas trayectorias de secado - mojado y mojado - secado se realizaron para observar la histéresis de este suelo.

Otro aspecto interesante a estudiar es la evolución de la densidad seca de las muestras ante cambios de succión; en la figura 4.2.1.4 se observa este fenómeno para las dos primeras trayectorias. La humedad y la densidad seca se han calculado a partir de los datos finales.

En la figura 4.2.1.5 se muestra la relación entre la deformación volumétrica y la succión y se la compara con una relación de tipo $\varepsilon_v = \alpha \times \ln\left(\frac{s}{\beta}\right)$.

En el caso de humedecimiento tras secado, unos parámetros que se aproximan satisfactoriamente a los resultados experimentales obtenidos han sido $\alpha=-0.27$ y $\beta=130$ MPa, que es la succión inicial de las muestras.

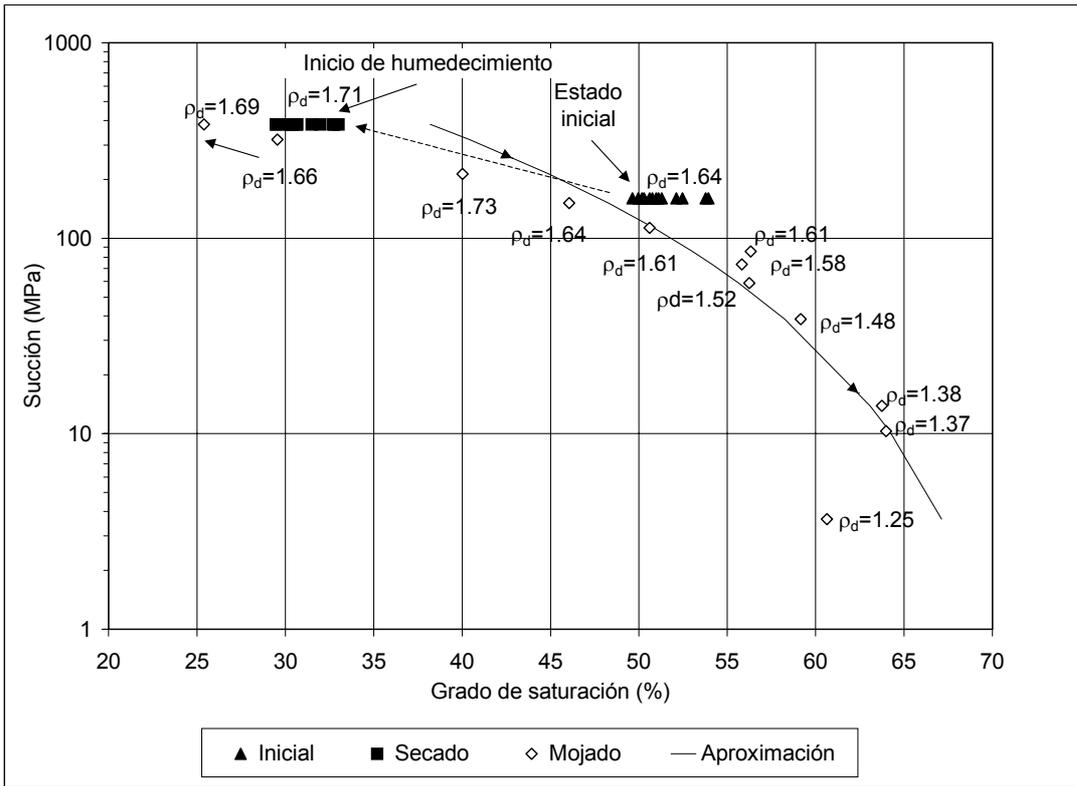


Figura 4.2.1.1 Trayectoria de humedecimiento tras secado

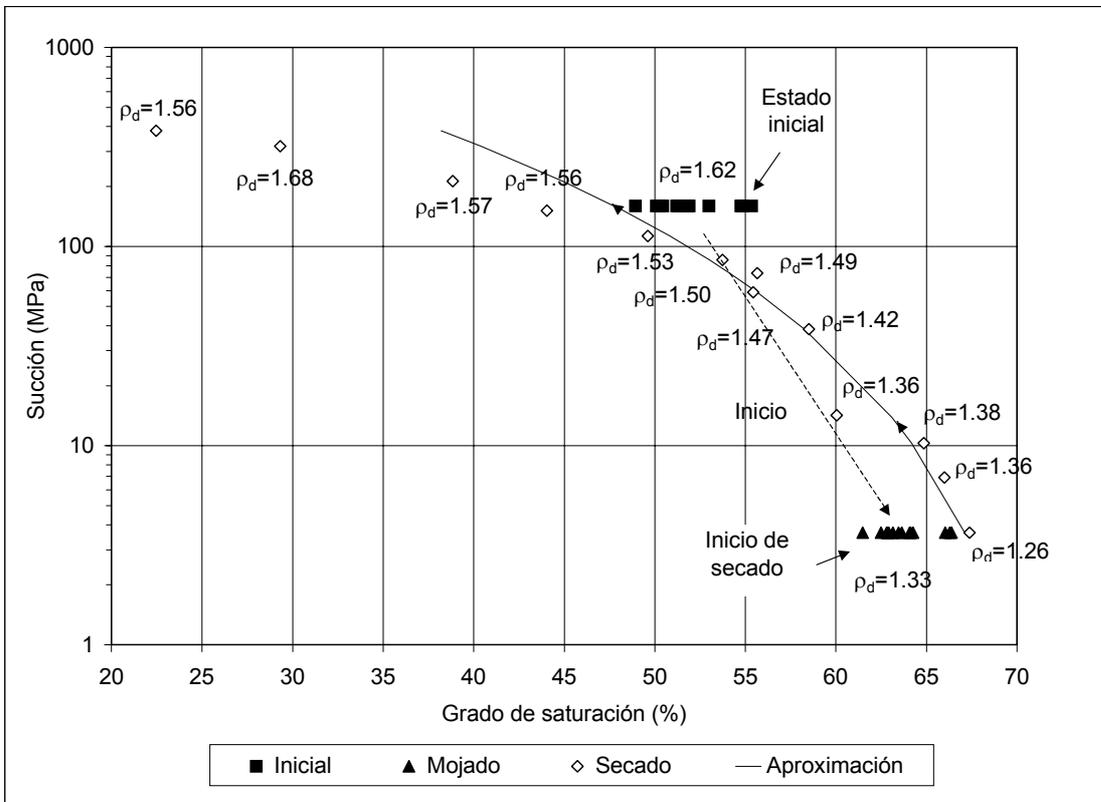


Figura 4.2.1.2 Trayectoria de secado tras humedecimiento

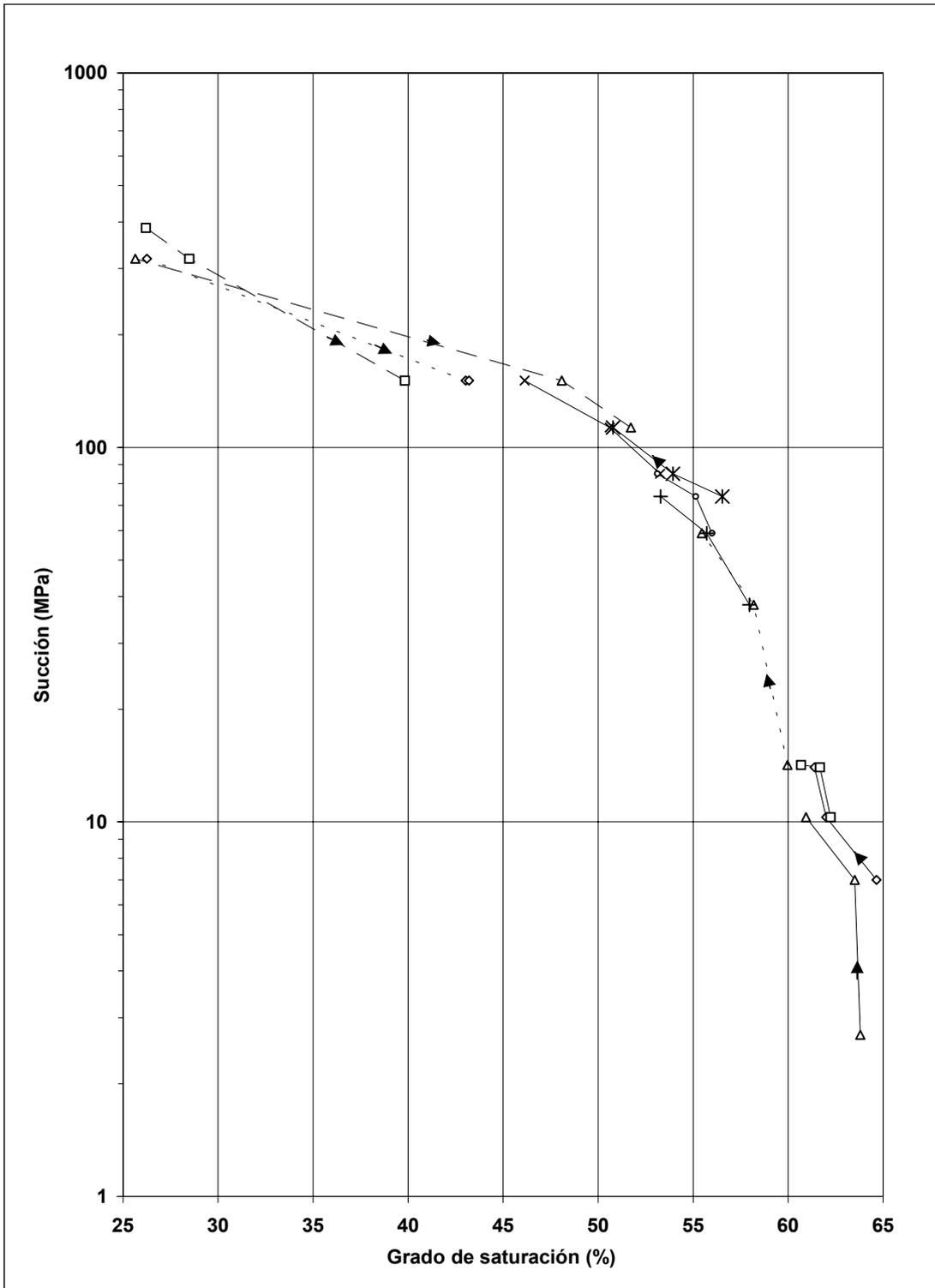


Figura 4.2.1.3 Curva de retención con histéresis. Densidad seca inicial: 1.64 g/cm^3 . Humedad inicial: 12.3 %.

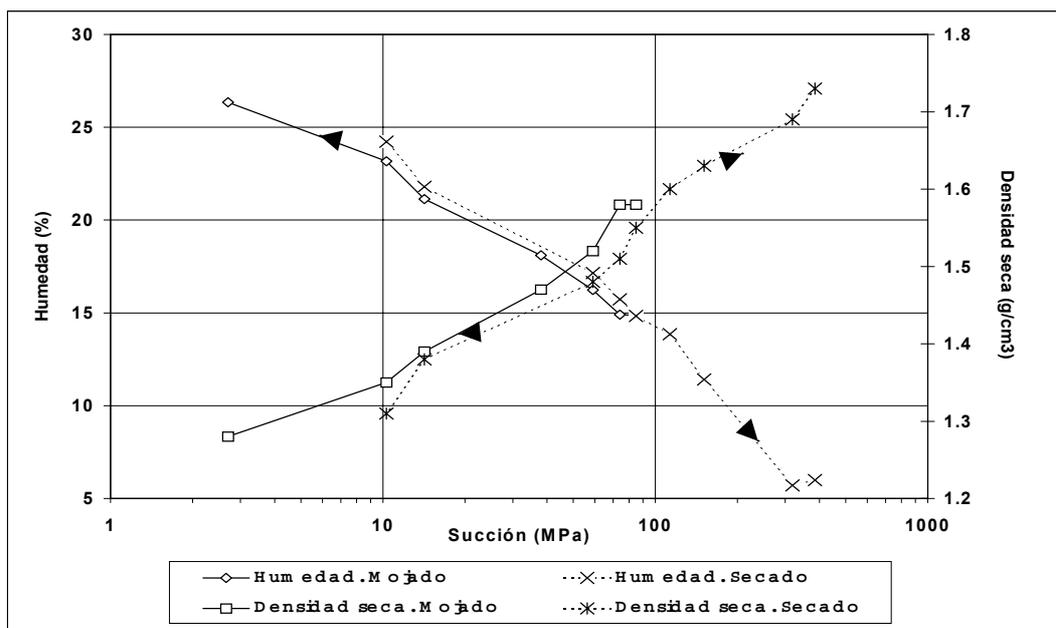


Figura 4.2.1.4 Evolución de la densidad seca y la humedad en función de la succión impuesta para las trayectorias de secado y humedecimiento.

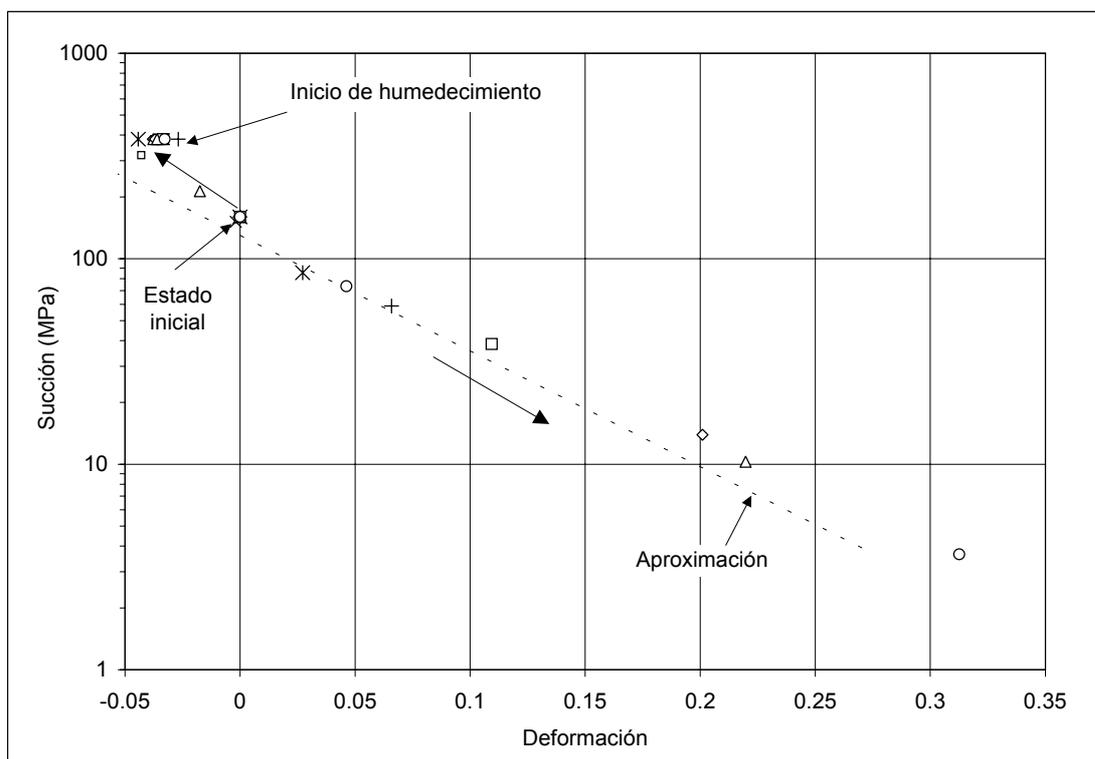


Figura 4.2.1.5 Evolución de la deformación volumétrica con la succión para la trayectoria de humedecimiento tras secado.

4.2.2 CURVA DE RETENCIÓN SIN CONFINAMIENTO A VARIAS TEMPERATURAS

Se realizó una serie de ensayos para obtener la curva de retención en función de la temperatura. Estos ensayos se hicieron con muestras pequeñas (cilindros de 15 mm de diámetro por 12.5 mm de altura), por lo que no se pudo medir con precisión el cambio de volumen. Un aspecto importante a destacar es que las correlaciones que dan la humedad relativa en función de la disolución de sal saturada utilizadas para los ensayos descritos anteriormente, no son válidas para las temperaturas a las que se realizó este ensayo, por lo que la humedad relativa se impuso con disoluciones acuosas de ácido sulfúrico a distintas concentraciones. Esta técnica tiene el inconveniente de generar compuestos volátiles que pueden perturbar el ensayo, esta situación se agrava más cuanto mayor es la temperatura de la disolución; no obstante, los resultados no parecen estar influenciados por la presencia de estos compuestos. También hay que destacar que se debe hacer un control muy riguroso de la temperatura debido a que cuando se pretende imponer succiones bajas (por debajo de 10 MPa según algunos autores); pequeños cambios de temperatura implican cambios importantes en la succión que impone la disolución. Se siguieron dos trayectorias distintas de temperatura en función de la densidad seca inicial. Con muestras que tenían una densidad seca inicial de 1.55 g/cm^3 , se partió de temperatura ambiente (22° C), y posteriormente fueron calentadas a 40° , 57° y 72° C para, finalmente, enfriarlas hasta 27° C . Con muestras que tenían una densidad seca inicial de 1.63 y 1.73 g/cm^3 , se partió de temperatura ambiente como el caso anterior y se calentaron a 72° C y, posteriormente, se enfriaron hasta 27° C .

En las figuras 4.2.2.1 y 4.2.2.2 pueden verse los resultados obtenidos. El aumento de la temperatura se manifiesta como un aumento de la cantidad de agua existente en el suelo para una succión dada. Esto puede ser debido a un aumento en el volumen de poros provocado por la dilatación térmica, que incluye una parte irreversible y otra de menor cuantía de tipo reversible. El aumento de la temperatura en la tensión superficial conduce a succiones menores para un mismo grado de saturación en caso de calentamiento del suelo, por lo que puede deducirse que en este primer calentamiento, el efecto del cambio de volumen predomina sobre el efecto de cambio de tensión superficial. La posterior disminución de temperatura se traduce en un incremento adicional de la humedad del suelo a una succión dada. En este caso, el cambio de volumen debido al enfriamiento es menor y el efecto de la tensión superficial pasa a ser predominante.

Otros autores sí han encontrado cambios sistemáticos en la curva de retención cuando varía la temperatura. Estos cambios se asocian a la dependencia de la tensión superficial con la temperatura (She y Sleep, 1998; Hopmans y Dane, 1986), expansión térmica del aire (Chahal, 1965) o la influencia de la temperatura en el coeficiente de mojado (She and Sleep, 1998).

Romero (1999), analiza la influencia del cambio de la tensión superficial debido a la temperatura en la curva de retención. Para ello, utiliza la siguiente expresión:

$$\left(\frac{\partial s(w)}{\partial T} \right)_w = \frac{s(w)}{\sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial T} + \frac{s(w)}{\cos \theta_w} \frac{\partial (\cos \theta_w)}{\partial T}$$

Si se estudia la relación anterior, se puede observar que la curva de retención varía con la temperatura debido a la disminución de la tensión superficial y al aumento del ángulo de contacto agua - partícula (θ_w) con la temperatura. Ambas propiedades disminuyen la succión para un mismo grado de saturación. Los resultados experimentales presentados por Romero, 1999; She y Sleep, 1998 y Hopmans y Dane, 1986 confirman este hecho y además, aducen que la disminución de la tensión superficial con la temperatura no es suficiente para explicar la disminución de la succión. Los resultados experimentales obtenidos en esta tesis indican un comportamiento opuesto, con un aumento de la succión con la temperatura para un mismo grado de saturación. Los resultados presentados por Villar (2000) cuando compara la curva de retención a volumen constante obtenida para una temperatura de 20°C y 40°C en este mismo material, indican la misma tendencia que la encontrada en esta tesis. Este hecho se podría explicar porque el ensayo ha sido realizado con cambio de volumen libre y este material es muy expansivo, por lo que la curva de retención obtenida no es comparable con la obtenida por los autores citados anteriormente. De todos modos, los resultados obtenidos no son determinantes al encontrar resultados contradictorios en succiones altas. Este hecho revela que se debe profundizar la investigación de la relación entre la curva de retención y la temperatura de este material y en las condiciones experimentales.

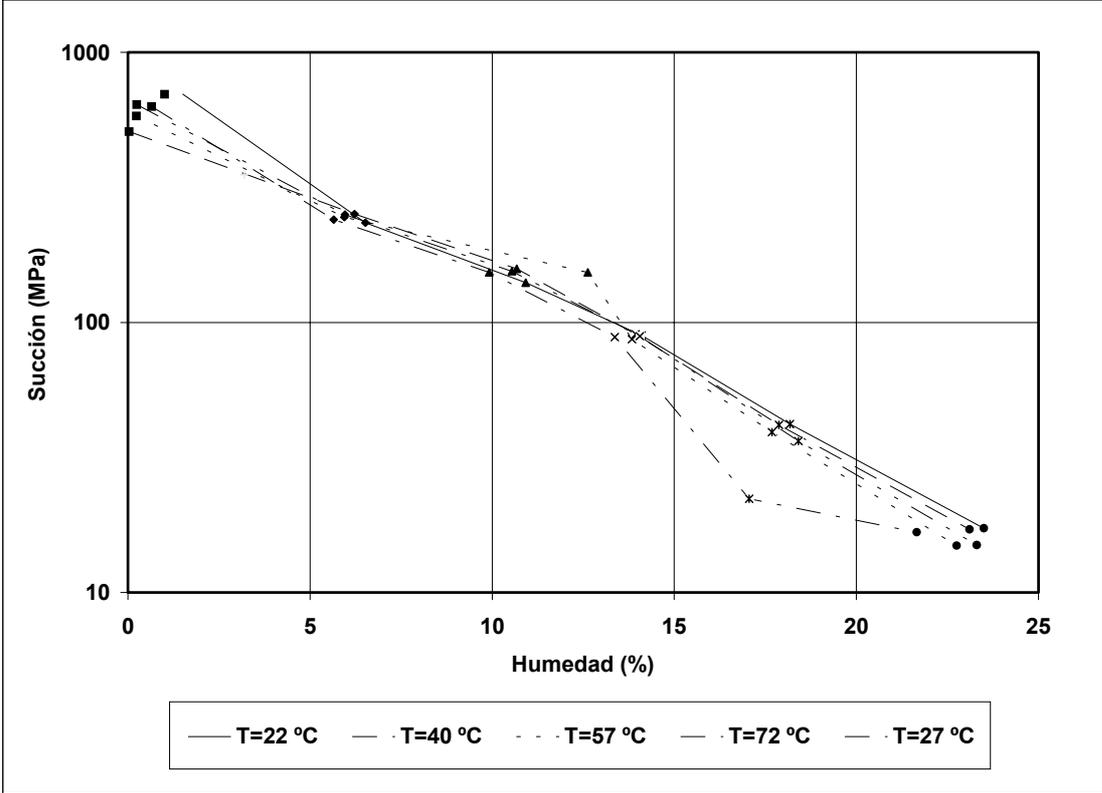


Figura 4.2.2.1 Densidad seca inicial=1.55 ± 0.03 g/cm³. Humedad inicial=12.58 ± 0.3 %

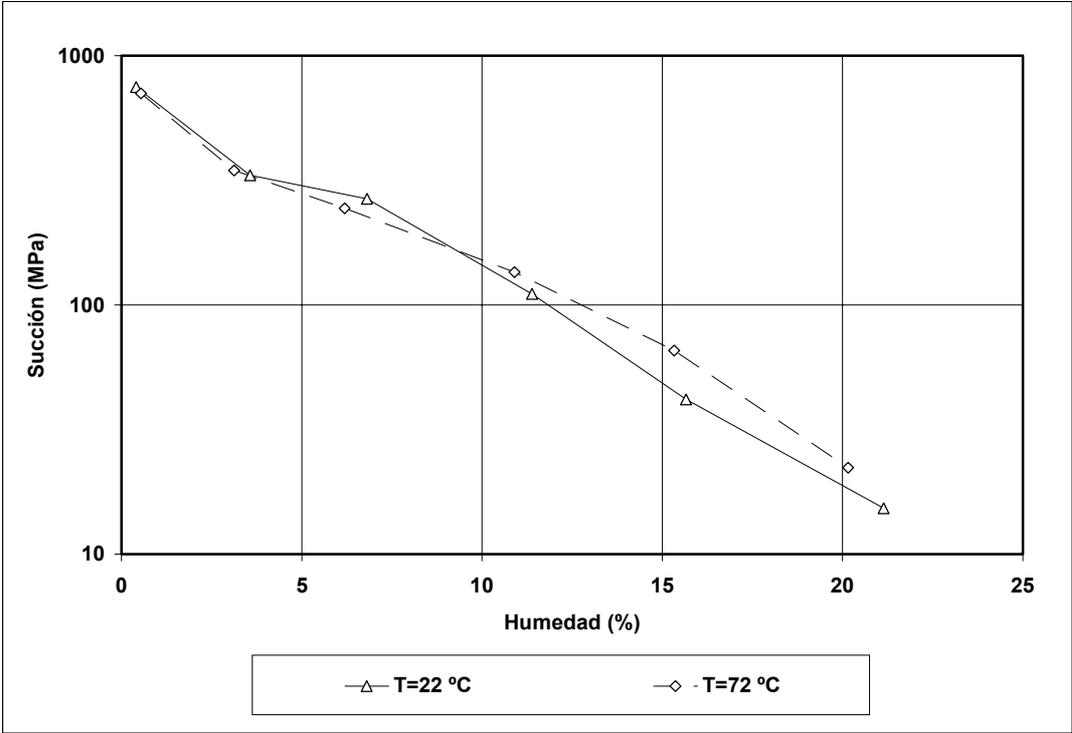


Figura 4.2.2.2 Densidad seca inicial=1.63 ± 0.03 g/cm³. Humedad inicial=12.95 ± 0.3 %

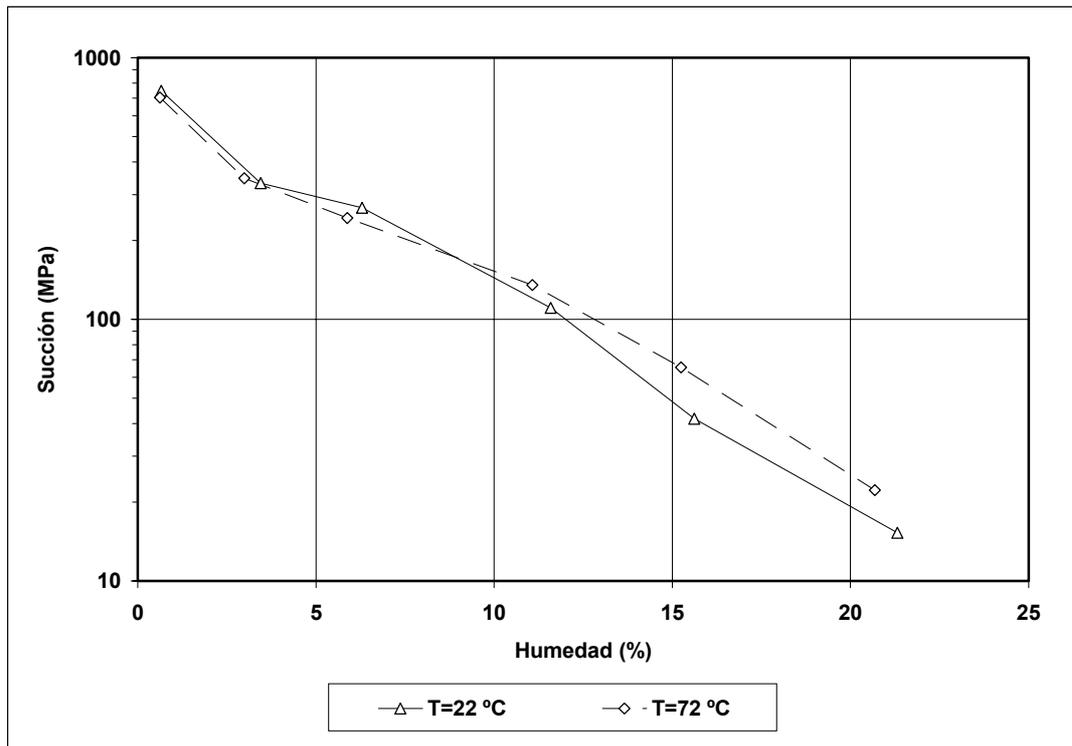


Figura 4.2.2.3 Densidad seca inicial= $1.73 \pm 0.03 \text{ g/cm}^3$. Humedad inicial= $13.10 \pm 0.3 \%$

4.2.3 CURVA DE RETENCIÓN A VOLUMEN CONSTANTE

Esta curva de retención se puede hallar con edómetros con succión controlada manteniendo nulo el cambio de volumen cuando se disminuye la succión de la muestra, con lo que se puede hallar también el valor de la presión de hinchamiento para cada escalón de imposición de succión. Este método tiene serios inconvenientes: el número de palancas y células edométricas es limitado y pueden ser necesarios para otros ensayos (trayectorias de secado - humedecimiento y carga - descarga controladas). Por esta razón y con el fin de optimizar los recursos del laboratorio, se diseñó un equipo nuevo. Dicho equipo consiste básicamente en un molde de bronce sinterizado cuyo croquis se adjunta en la figura 4.2.3.1; dicho molde impide las deformaciones de la muestra al ser rígido pero permite el paso de vapor de agua al ser poroso.

Un punto muy importante es asegurar que no hay deformaciones, para ello, las muestras se compactan en un molde de dimensiones tales que la muestra entre lo más ajustada posible en el molde sinterizado donde se hará el ensayo. Tal como se indica en la figura 4.2.3.3,

el molde consta de dos piezas simétricas que se enfrentarán, introduciendo la muestra en el interior de la cavidad que forman; seguidamente se colocan dos perfiles metálicos galvanizados que se aprietan contra el molde con tornillos de acero inoxidable (figura 4.2.3.4). La elección de estos materiales, tanto en el molde como en los perfiles, se debe al riesgo de corrosión que tienen al trabajar en el interior de recipientes donde hay un ambiente con una humedad alta. Seguidamente se introduce el conjunto dentro de recipientes donde hay una disolución acuosa saturada de una sal determinada (figura 4.2.3.5); esto permite imponer la humedad relativa ambiental y, por tanto, la succión en las muestras. Los recipientes con las muestras se dejan durante un mínimo de un mes en el laboratorio con temperatura controlada y, finalmente, se determina la humedad abriendo los moldes de bronce y extrayendo suelo con un cincel, ya que al intentar hinchar, el suelo queda pegado al molde y no se puede extraer la muestra entera.

En la figura 4.2.3.6 se puede ver la trayectoria de mojado con muestras con distintas densidades secas y con una humedad inicial igual a la higroscópica en el laboratorio, que aproximadamente es del 13.5% con unas densidades secas iniciales de 1.59, 1.65 y 1.71 g/cm³. Como puede verse en la figura, a mayor densidad seca inicial mayor grado de saturación para una misma succión. Esto se debe a que el tamaño de los poros saturados es similar para ambas muestras cuando la succión es la misma, sin embargo, cuando la densidad seca es menor hay un volumen superior de poros que no están saturados. En la figura 4.2.3.7 se presentan dos trayectorias distintas. Una se realizó con muestras compactadas con la humedad higroscópica del laboratorio con una densidad seca de 1.65 g/cm³, posteriormente se equilibraron a aproximadamente 392 MPa en un desecador, las muestras retrajeron. Finalmente, las muestras se introdujeron en el molde de bronce y se las sometió a humedades relativas mayores, con lo que hincharon hasta ocupar todo el volumen (densidad seca=1.59 g/cm³). La otra trayectoria partió de muestras compactadas con suelo en polvo previamente secado hasta una succión aproximadamente de 392 MPa en un desecador con una densidad seca de 1.67 g/cm³. Como en el caso anterior, a medida que las muestras se humedecen, la diferencia entre grados de saturación aumenta para una misma succión. Puede verse también que para una succión por encima de 100 MPa, el comportamiento de ambas trayectorias es similar, esto se debe a que el cambio de volumen todavía no es importante y la curva de retención con volumen constante y con cambio de volumen libre es muy similar (Lloret et al., 1999).

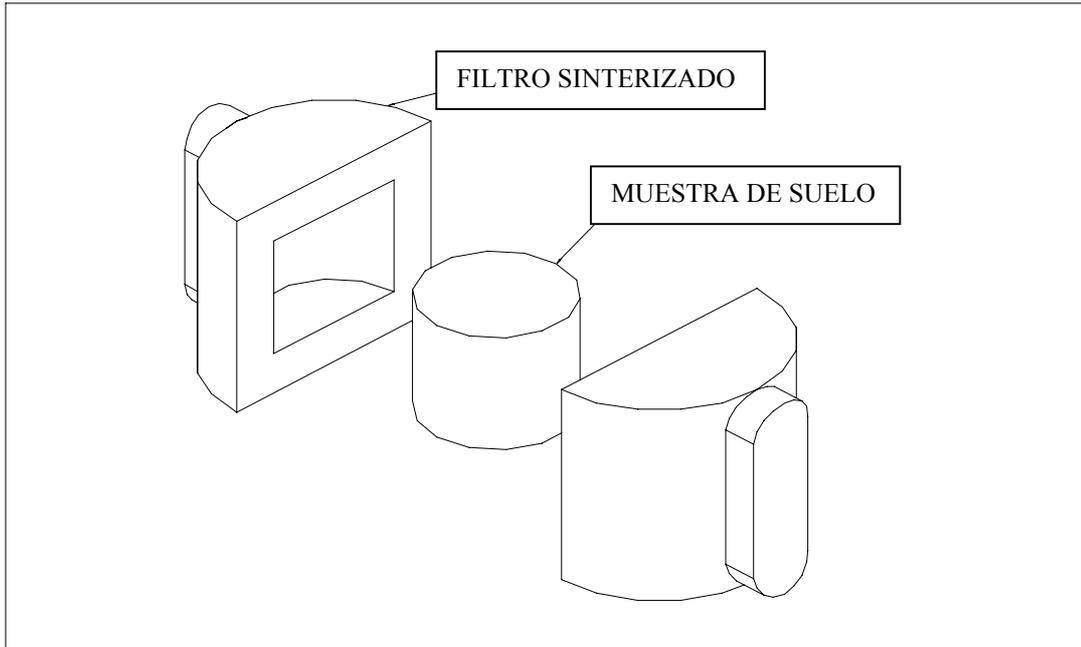


Figura 4.2.3.1 Esquema del molde usado para el ensayo de curva de retención a volumen constante.



Figura 4.2.3.2 Vaso compactador de muestras de 15 mm de diámetro por 12 mm de altura.

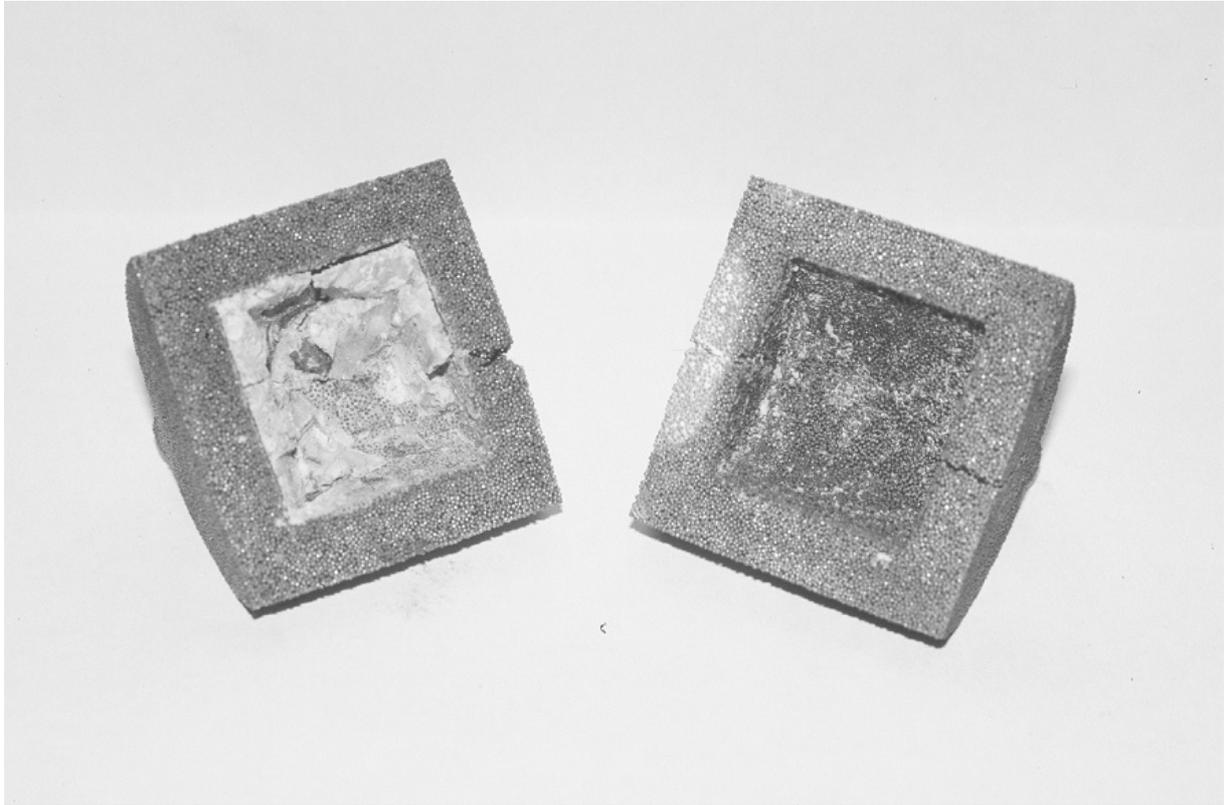


Figura 4.2.3.3 Molde de esferas de bronce sinterizado que impide deformaciones

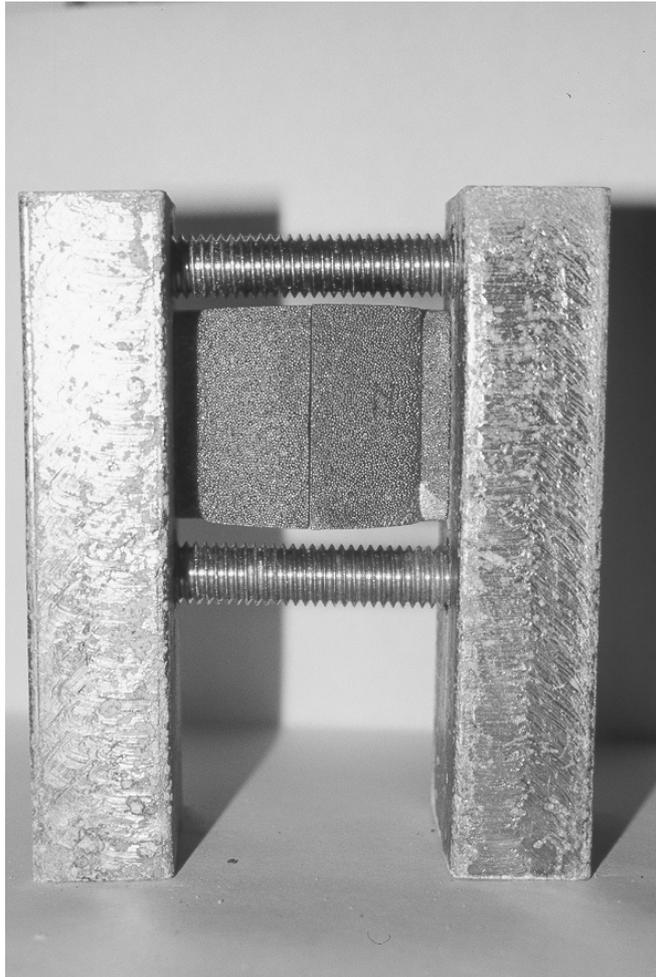


Figura 4.2.3.4 Fijación del molde



Figura 4.2.3.5 Molde en el interior del recipiente con la disolución

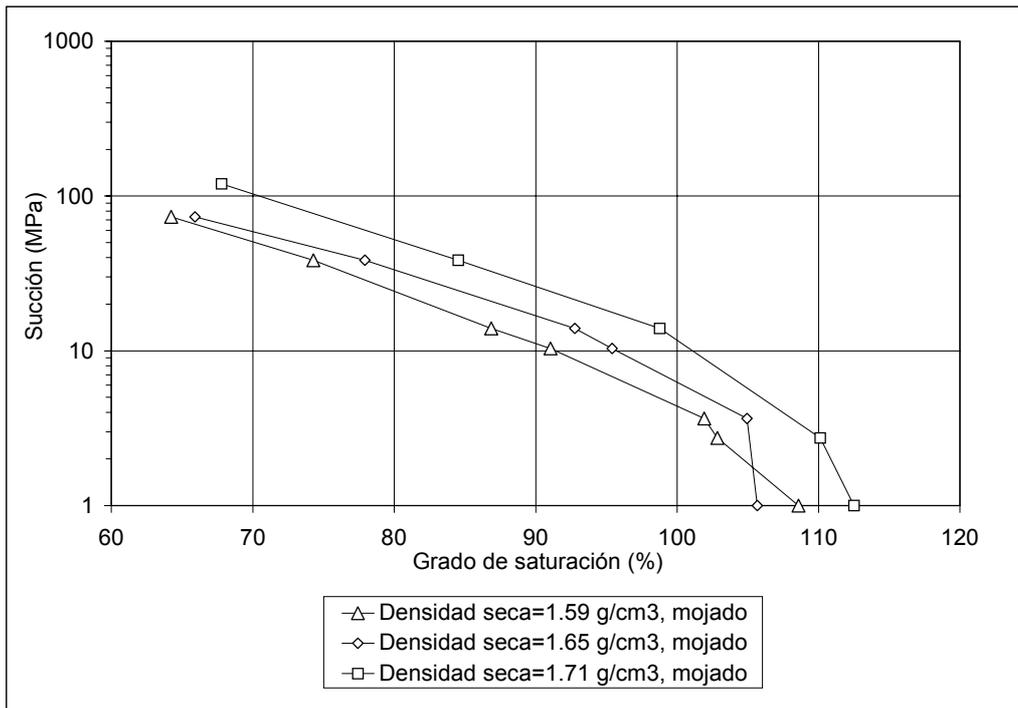


Figura 4.2.3.6 Ensayo de curva de retención a volumen constante. Humedecimiento desde la humedad inicial (13.5 % aprox.).

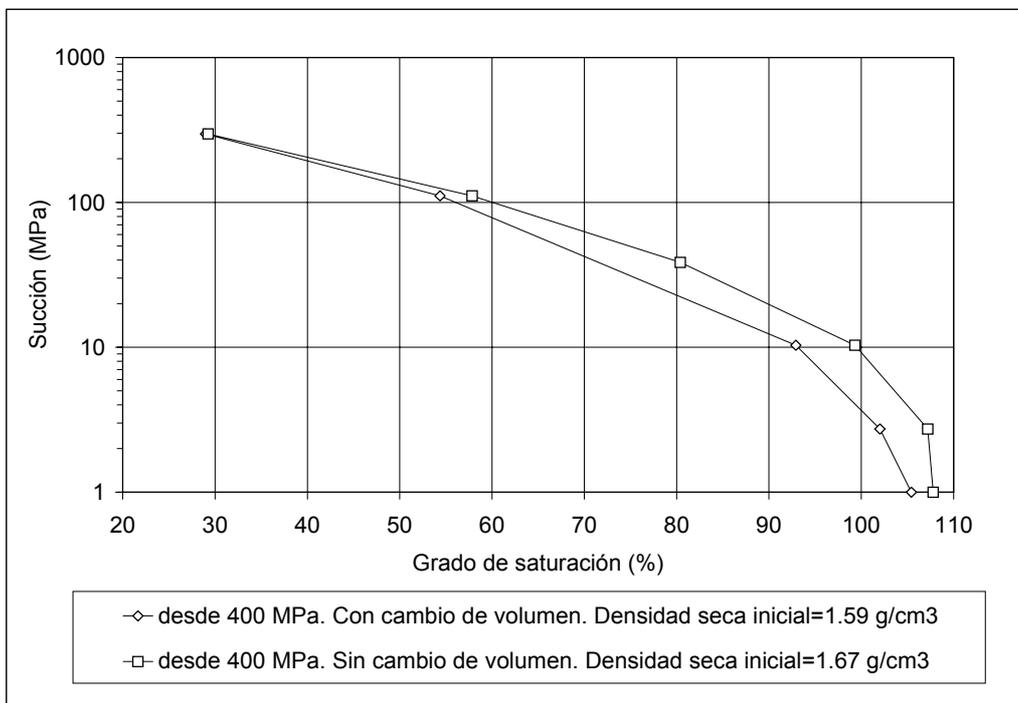


Figura 4.2.3.7 Ensayo de curva de retención a volumen constante. Humedecimiento desde una succión inicial de 392 MPa.

Como puede observarse, el grado de saturación estimado al final del ensayo es superior a uno. Esto puede ser debido a que pese a las medidas tomadas para evitar deformaciones de la muestra, ésta acaba por hacerlo. Otro aspecto que puede influir es el hecho que la densidad del agua en el interior de la arcilla no sea 1 g/cm^3 sino superior (Martin, 1962). Este hecho hace que el volumen de agua que se calcula a partir del que se evapora de la arcilla en el horno, sea mayor que el ocupado por el agua en el interior del suelo, suponiendo que la densidad del agua es 1 g/cm^3 cuando podría ser superior, dando valores del grado de saturación superiores a uno (Villar, 2000).

Con este equipo se ensayó también una trayectoria de mojado y posterior secado para estudiar la histéresis. Las muestras se llevaron a saturación introduciendo la muestra en un recipiente con agua destilada y posteriormente se secaron en recipientes con atmósfera controlada, las dos muestras que se secaron por encima de la succión inicial se extrajeron enteras del molde, por lo que no se puede considerar que no cambiaron de volumen (línea a trazos del gráfico). En la figura 4.2.3.8 puede verse la curva de retención obtenida. Junto a ésta se representa una curva con la trayectoria de solo mojado. Se puede distinguir una cierta histéresis al tener la rama de secado una succión ligeramente superior que la rama de mojado a un mismo grado de saturación.

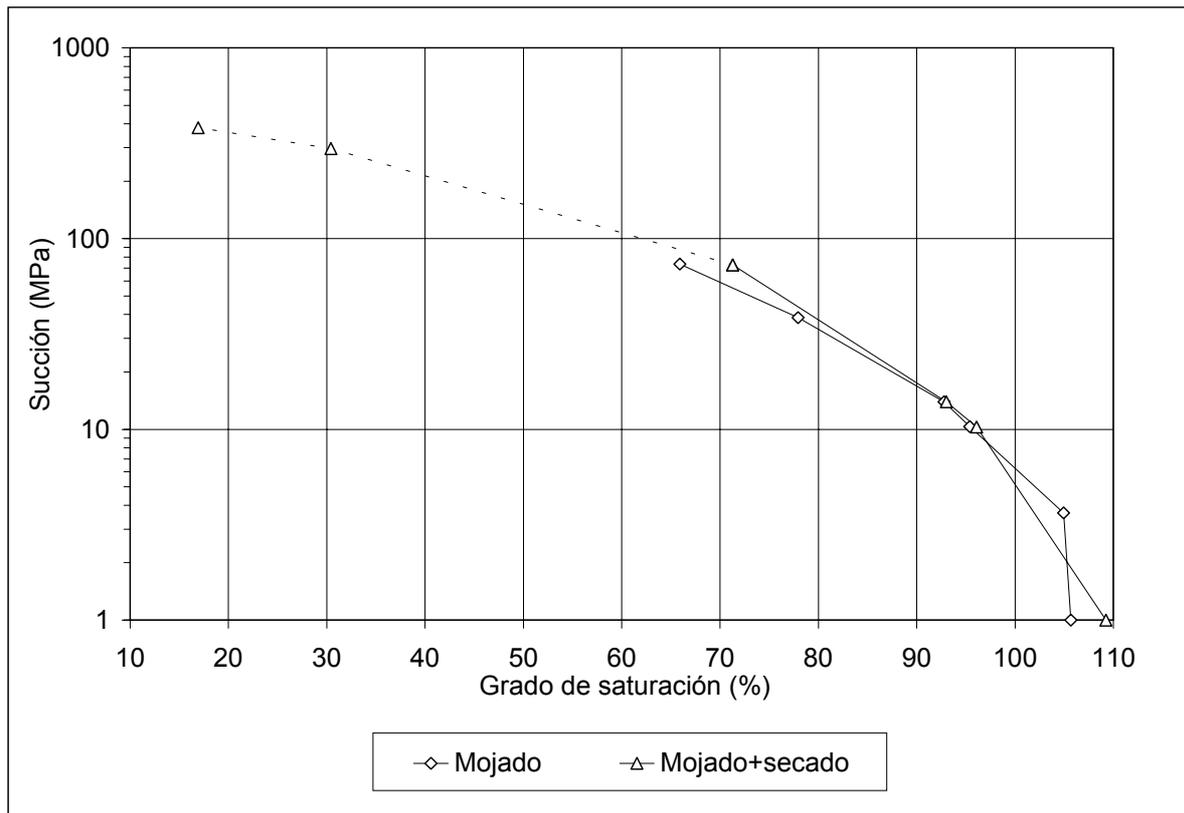


Figura 4.2.3.8 Curva de retención con ciclo de mojado - secado a volumen constante. Densidad seca de 1.65 g/cm³

En la figura 4.2.3.9 se representa la humedad de las muestras en función de la succión en trayectorias de humectación para varias densidades secas. Puede observarse que para succiones elevadas, el cambio de humedad es prácticamente el mismo para todas las muestras. Esto se debe a que para estos niveles de succión, el agua que se incorpora a la muestra lo hace a los agregados de arcilla (microporosidad). Hasta humedades cercanas al 20 %, todo el agua del suelo está retenida en la microestructura (la superficie específica real del suelo es muy grande) y por tanto, la relación succión – humedad no depende del volumen de poros total (densidad seca). El peso de agua se incrementa más cuando la densidad seca es mayor ya que el suelo contiene más agregados, sin embargo, el peso de suelo es también mayor, por lo que la relación $\Delta W_w/W_s$, donde ΔW_w es el incremento de peso de agua en la muestra y W_s es el peso de suelo seco, permanece constante. Cuando el agua empieza a llenar los macroporos, la humedad en las muestras con menor densidad seca inicial crece más que para las muestras con densidad seca mayor, tal como se observa en la figura.

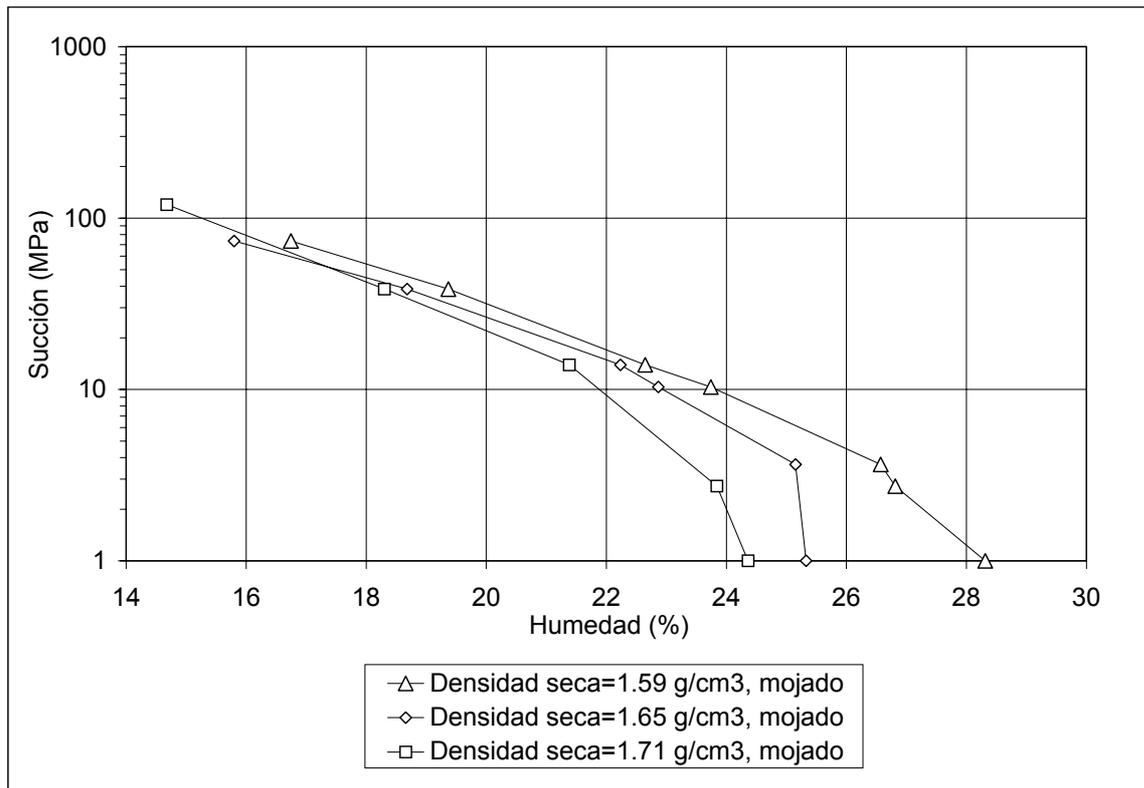


Figura 4.2.3.9 Curva de retención con ciclo de mojado - secado a volumen constante para varias densidades secas iniciales.

Es interesante comparar la curva de retención obtenida a volumen constante con la obtenida con hinchamiento libre (figura 4.2.3.10). No coinciden debido a que las densidades secas iniciales de cada una difieren ligeramente, pero es interesante observar que las tendencias coinciden hasta que la succión alcanza un valor de unos 20 MPa aproximadamente. A partir de este momento, la muestra que no tiene coaccionado su hinchamiento aumenta su humedad mientras que la otra muestra no la aumenta.

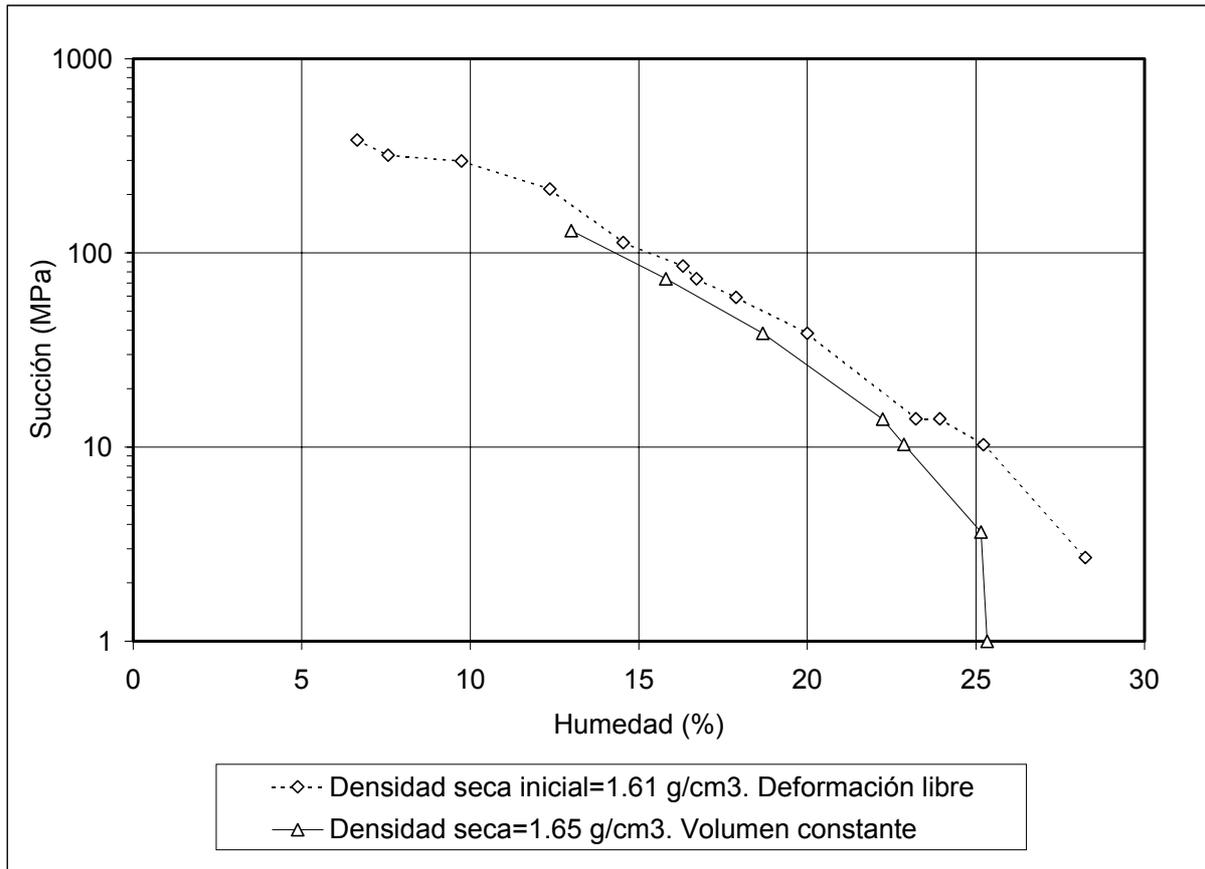


Figura 4.2.3.10 Relación entre la succión y la humedad en trayectorias de secado y humedecimiento con deformación libre y humedecimiento en volumen constante.

Si se comparan las curvas de la succión - grado de saturación (figura 4.2.3.11). Las diferencias son mucho más acusadas, esto es debido a que el material hincha desde que se empieza a humedecer y su comportamiento no es comparable al de la muestra que tiene el cambio de volumen coaccionado. Este hecho pone de manifiesto que en arcillas expansivas, la curva de retención se debe obtener teniendo en cuenta las condiciones de deformación a las que está sometido el material.

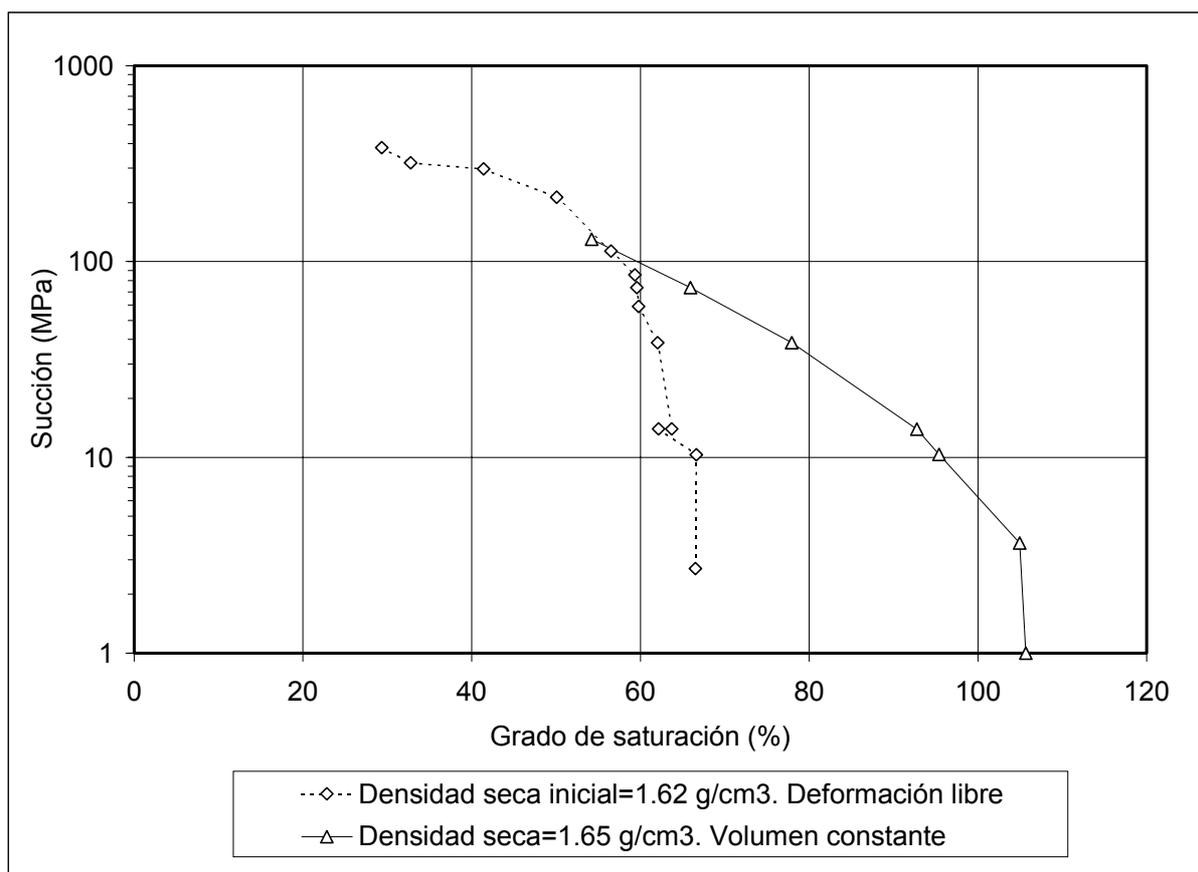


Figura 4.2.3.11 Relación entre la succión y el grado de saturación en trayectorias de secado y humedecimiento con deformación libre y humedecimiento a volumen constante.

Si se supone que cuando el grado de saturación medido está por encima de la unidad se está en condiciones de saturación, se pueden interpolar expresiones analíticas para la curva de retención que se aproximen a los valores medidos. Se han deducido los parámetros de la curva de retención, expresada como:

$$S_e = \left(\frac{1}{1 + ((P_g - P_l) / P)^{1/(1-\lambda)}} \right)^\lambda \left(1 - \frac{P_g - P_l}{P_s} \right)^{\lambda_s}$$

cuando la densidad seca de las muestras es de 1.65 g/cm³. Esta ecuación está descrita en el capítulo 2. Para densidades secas de 1.59 y 1.71 g/cm³, la ecuación de Van Genuchten (1980), se aproxima de manera satisfactoria a los resultados experimentales. En la tabla 4.2.3.1 pueden verse los parámetros obtenidos. En la figura 4.2.3.12, se puede deducir que la presión de entrada de aire, relacionada con el parámetro P_0 , aumenta con la densidad seca.

γ_d (g/cm ³)	P_0 (MPa)	λ	S_{rl}	S_{ls}	P_s (MPa)	λ_s
1.59	13	0.2	0.01	1	-	-
1.65	35	0.3	0.01	1	4000	1.5
1.71	40	0.25	0.01	1	-	-

Tabla 4.3.2.1 Parámetros de las ecuaciones de las curvas de retención que se han ajustado a los ensayos de laboratorio.

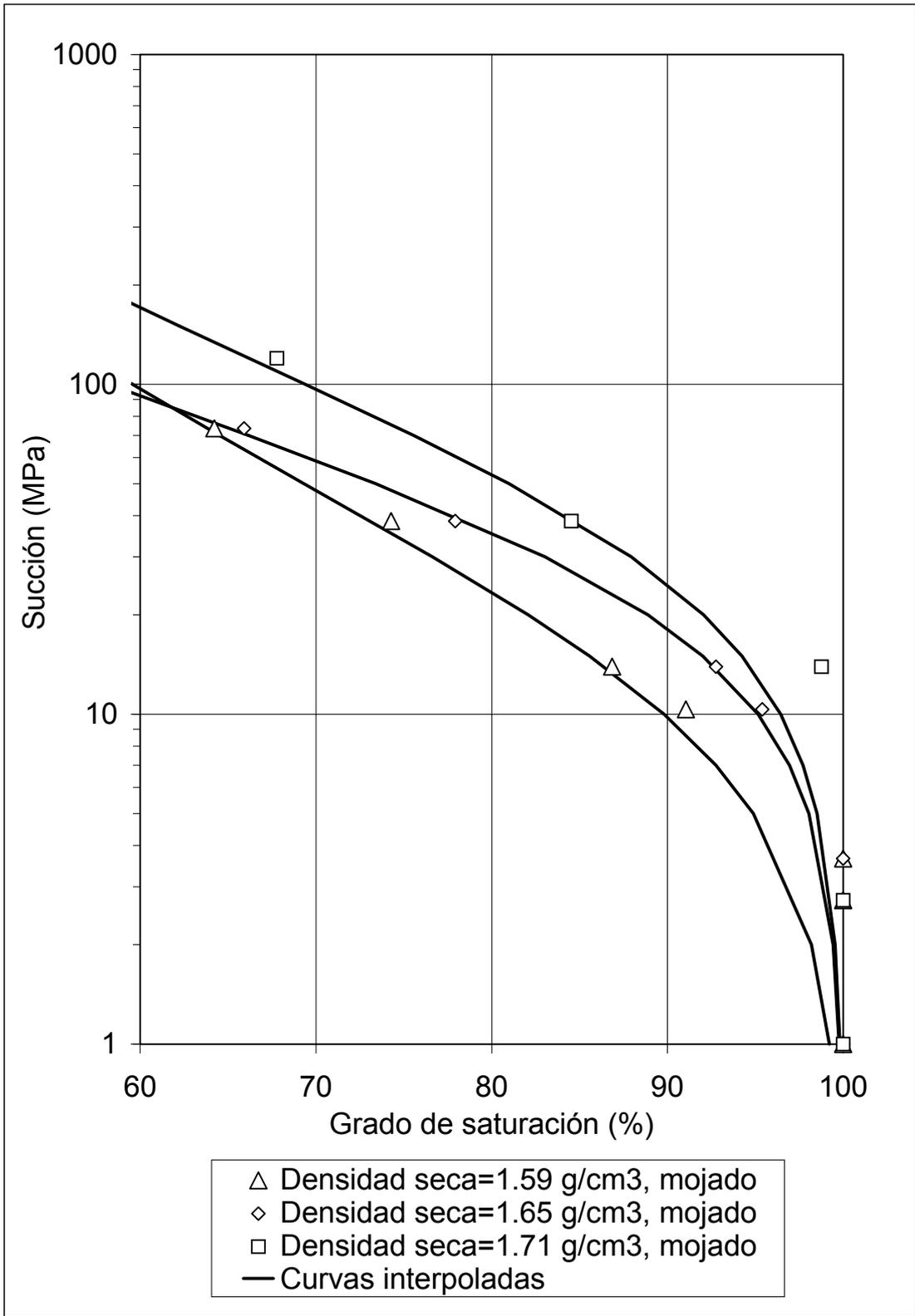


Figura 4.2.3.12 Medidas experimentales de la curva de retención a volumen constante incluyendo las curvas de retención interpoladas.

4.3 ENSAYOS DE HINCHAMIENTO BAJO CARGA

Se realizaron varios ensayos con muestras compactadas a diferentes densidades secas (entre 1.47 y 1.89 g/cm³) y con contenidos de agua iniciales de 11.7 ± 1.1 % (humedad en equilibrio con el aire del laboratorio). Las muestras eran de 50 mm de diámetro con una altura inicial de 10 mm. Estas muestras se saturaron a tensión vertical constante y con deformaciones radiales nulas en edómetros convencionales. Durante la inundación de la muestra, se midieron los desplazamientos verticales.

En la figura 4.3.1 se muestra la relación entre la carga vertical aplicada y la deformación medida para distintas humedades y distintas densidades secas iniciales. La relación que puede obtenerse a partir de los datos experimentales es la siguiente:

$$\varepsilon \approx -0.4693 - 0.1935 \log_{10} \sigma + 0.3659 \rho_d$$

Donde σ es la tensión vertical en MPa y ρ_d la densidad seca inicial en g/cm³.

La figura 4.3.2 muestra los cambios volumétricos debidos a la aplicación de la carga vertical. El índice de poros resultante tras la saturación está relacionado con la tensión vertical que se impone con la siguiente expresión:

$$e = 0.842 - 0.327 \log_{10} \sigma \text{ (MPa)}$$

Como puede apreciarse, la presión de hinchamiento de la muestra, entendida en este contexto como aquella en la que no se produce cambio de volumen al inundar la muestra, aumenta a medida que aumenta la densidad seca inicial, este hecho es lógico puesto que al aumentar la densidad, aumenta el número de partículas arcillosas que se hidratan cuando entran en contacto con el agua y se expanden. También contribuye el hecho de que el tamaño de poro es menor y, por tanto, hay menos espacio disponible que ocupar en el seno de la muestra.

Un parámetro importante como es la presión de hinchamiento puede deducirse a partir de los resultados obtenidos: varía entre poco menos de 3 MPa con una densidad seca de 1.5

g/cm^3 hasta más de 10 MPa para una densidad de 1.9 g/cm^3 . Con una densidad seca de 1.7 g/cm^3 , se tiene una presión de hinchamiento de 8 MPa aproximadamente.

En las figuras 4.3.3-4.3.8 se muestra la evolución temporal de las deformaciones para varias densidades secas iniciales y varias tensiones verticales. Puede apreciarse que el cambio de volumen se estabiliza a los 10 días de empezar el ensayo. También puede observarse que las muestras con una densidad seca mayor tardan algo más en estabilizarse, debido a su menor permeabilidad.

En la figura 4.3.8 puede observarse como para cargas verticales suficientemente altas, al saturar la muestra se desarrolla un fenómeno de colapso.

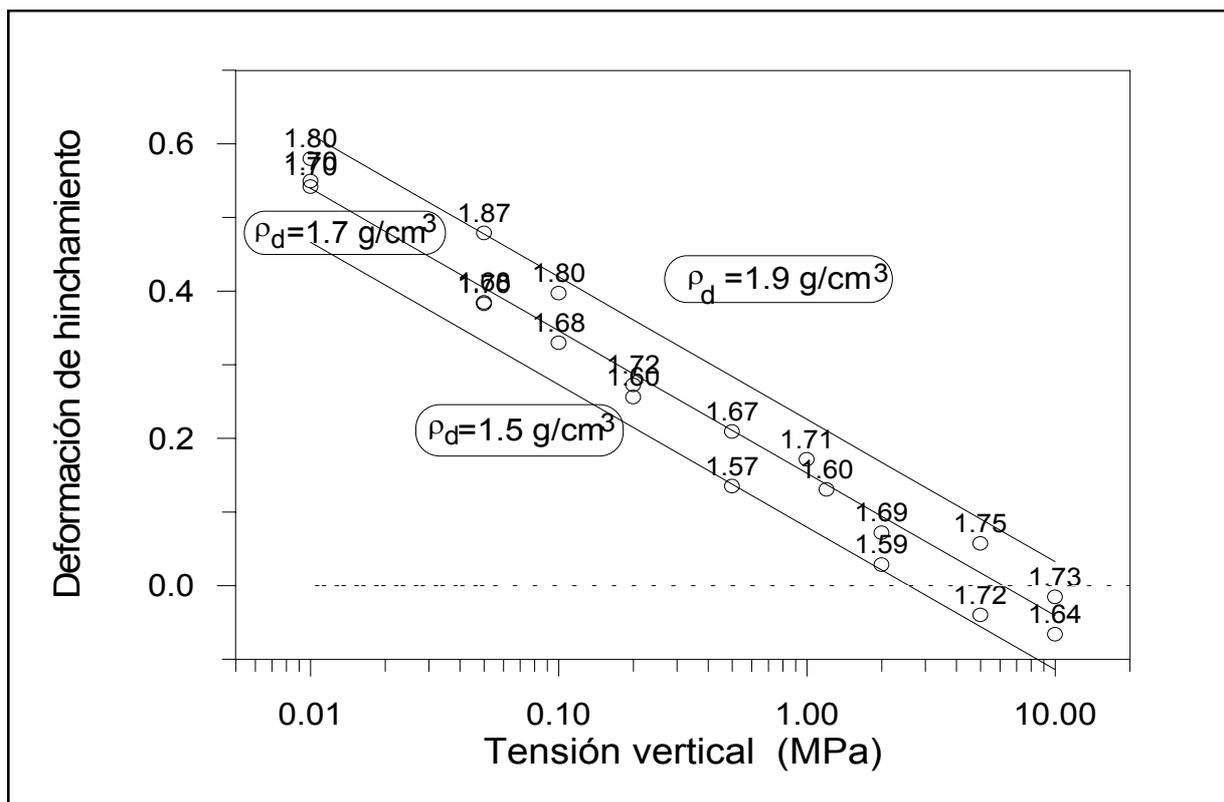


Figura 4.3.1 Relación entre la deformación al saturar la muestra y tensión vertical aplicada en el edómetro para varias densidades secas.

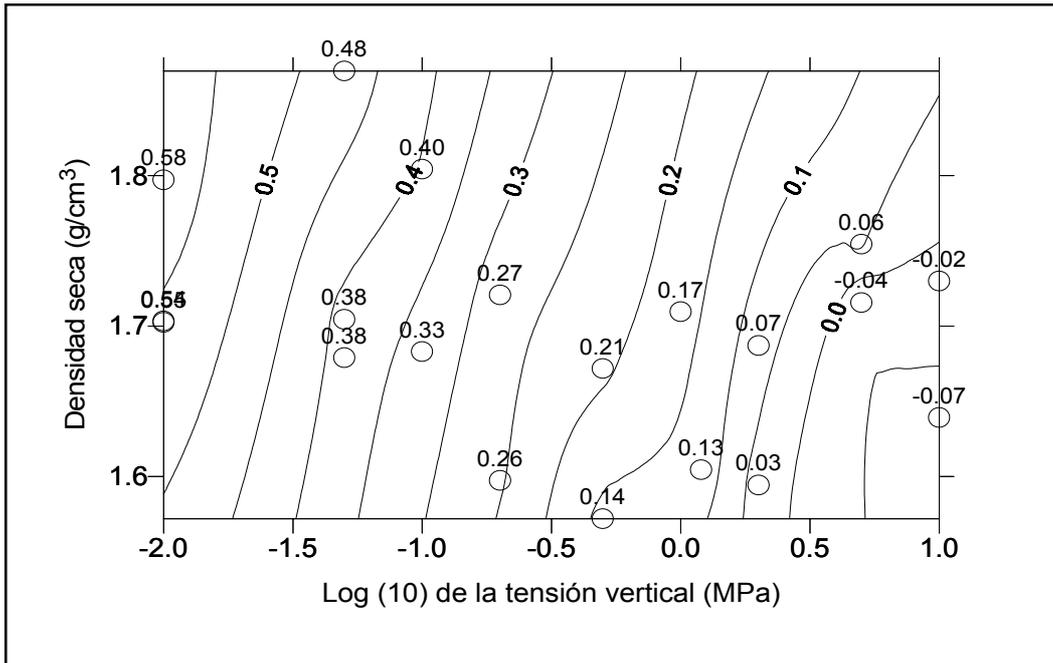


Figura 4.3.2 Relación entre la tensión vertical y densidad seca inicial y la deformación volumétrica unitaria para las trayectorias de aplicación de carga vertical y posterior saturación.

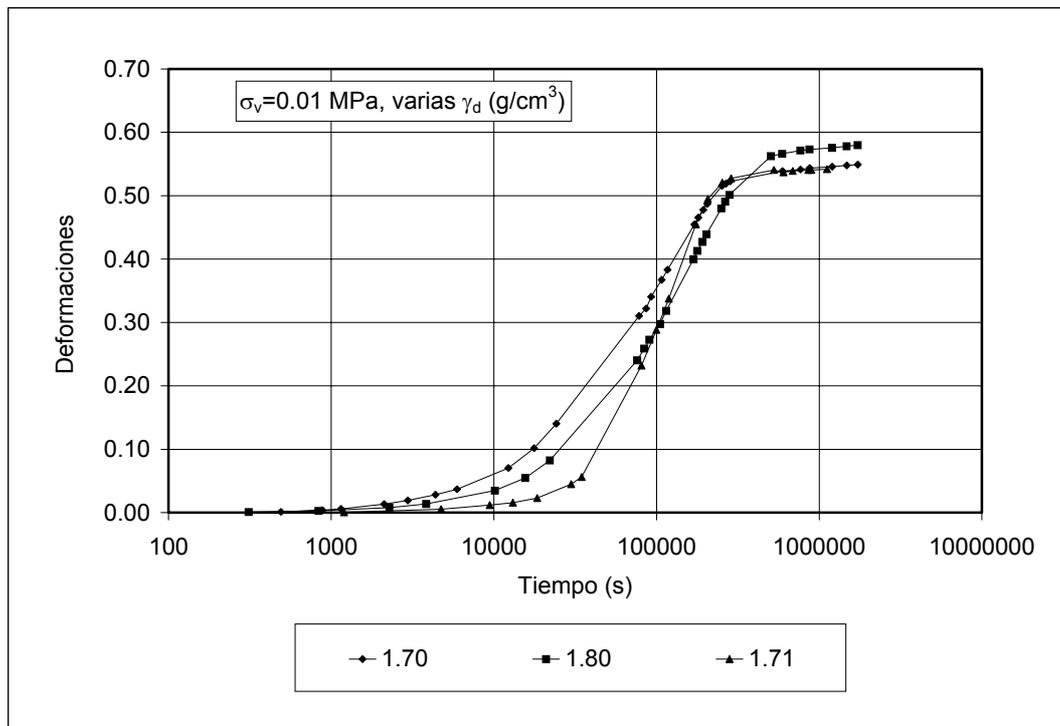


Figura 4.3.3 Evolución temporal de la deformación durante la saturación. Tensión vertical aplicada (σ_v)=0.01 MPa.

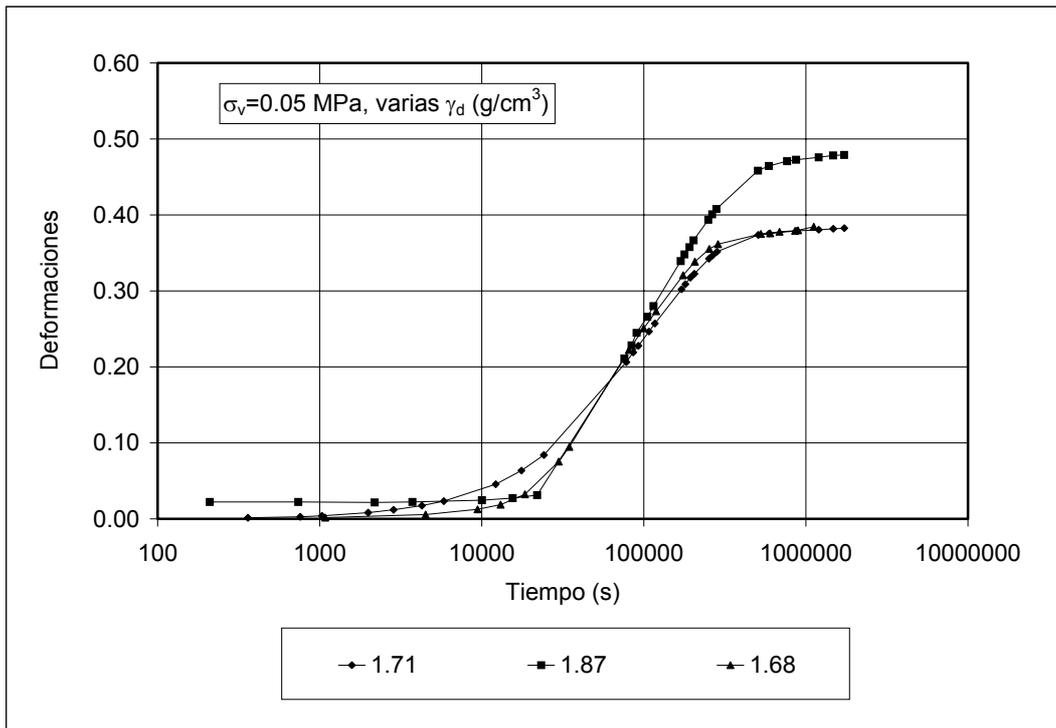


Figura 4.3.4 Evolución temporal de la deformación durante la saturación. Tensión vertical aplicada (σ_v)=0.05 MPa.

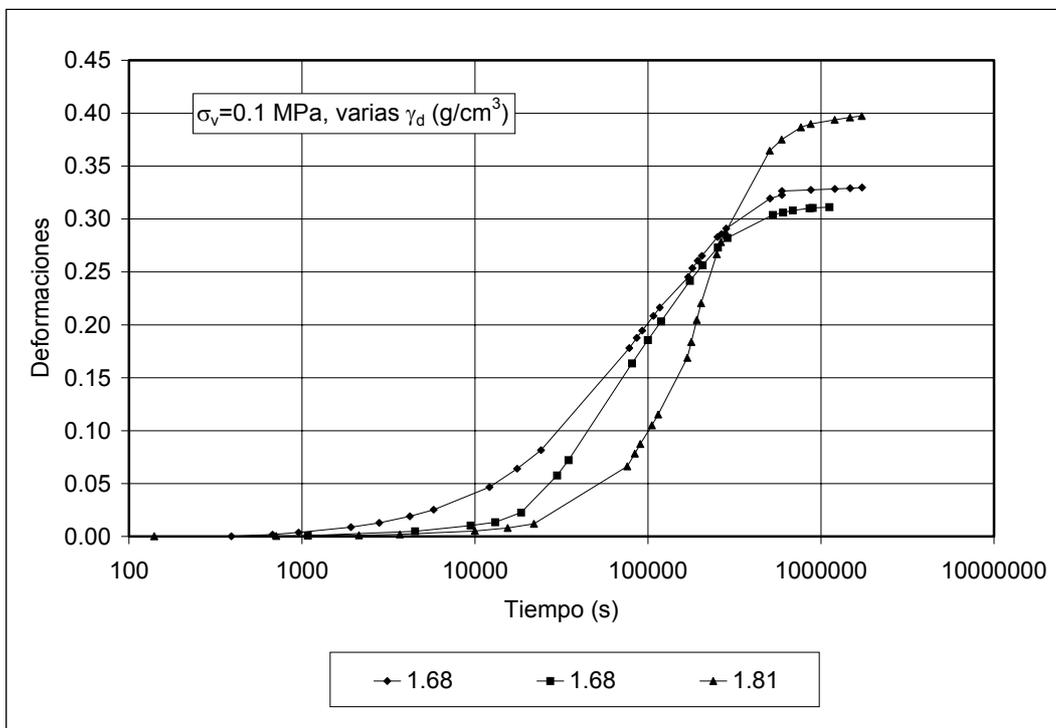


Figura 4.3.5 Evolución temporal de la deformación durante la saturación. Tensión vertical aplicada (σ_v)=0.1 MPa.

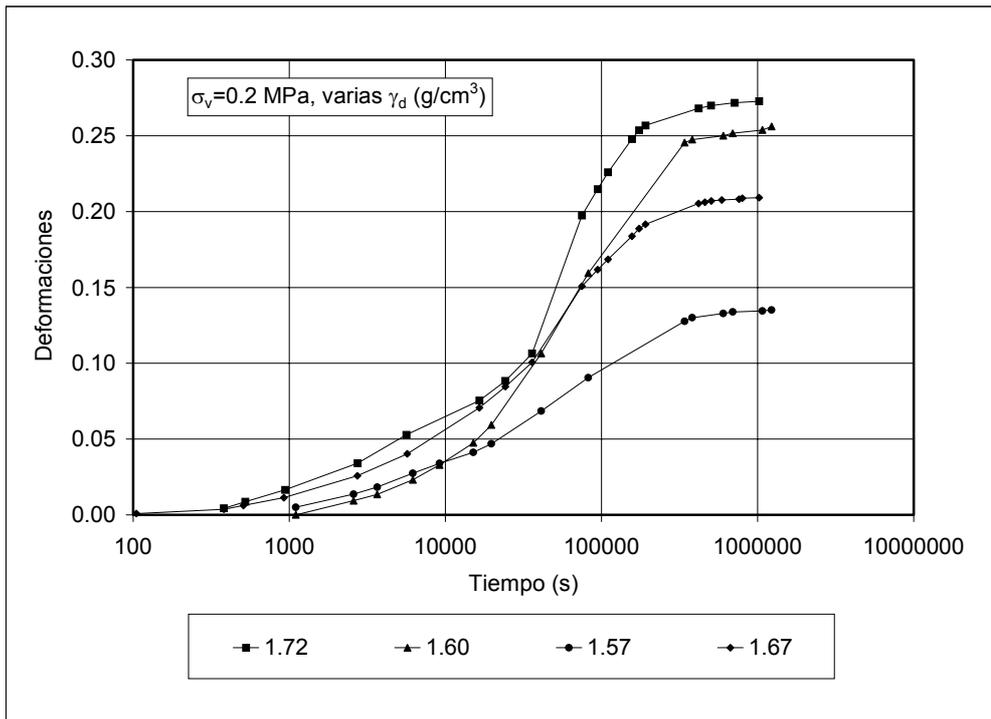


Figura 4.3.6 Evolución temporal de la deformación durante la saturación. Tensión vertical aplicada (σ_v)=0.2 y 0.5 MPa.

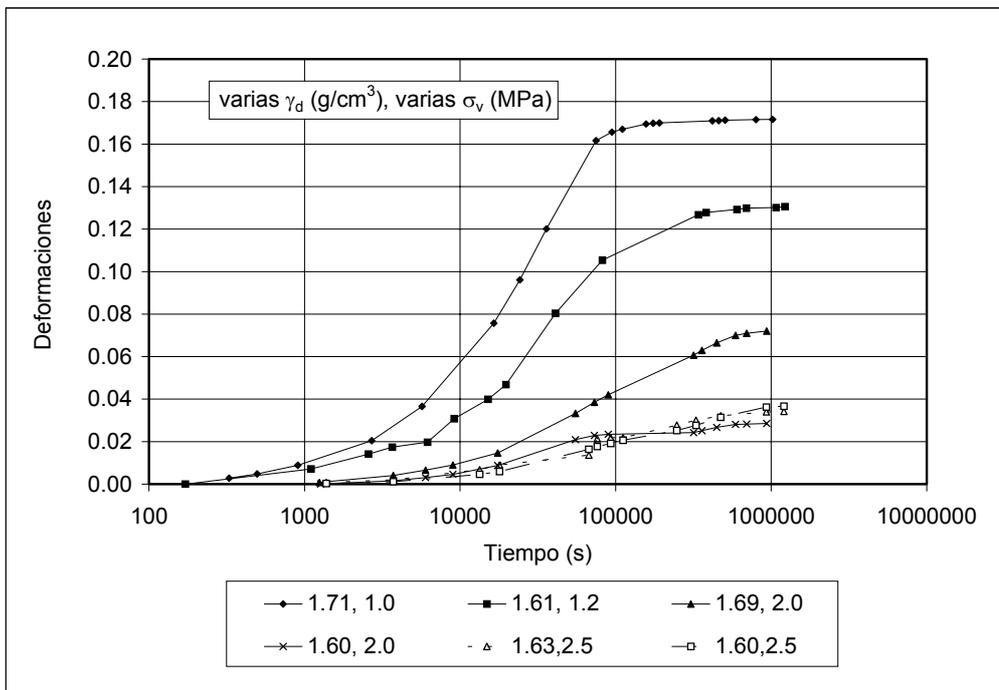


Figura 4.3.7 Evolución temporal de la deformación durante la saturación. Tensión vertical aplicada (σ_v)=1.0, 1.2, 2.0 y 2.5 MPa.

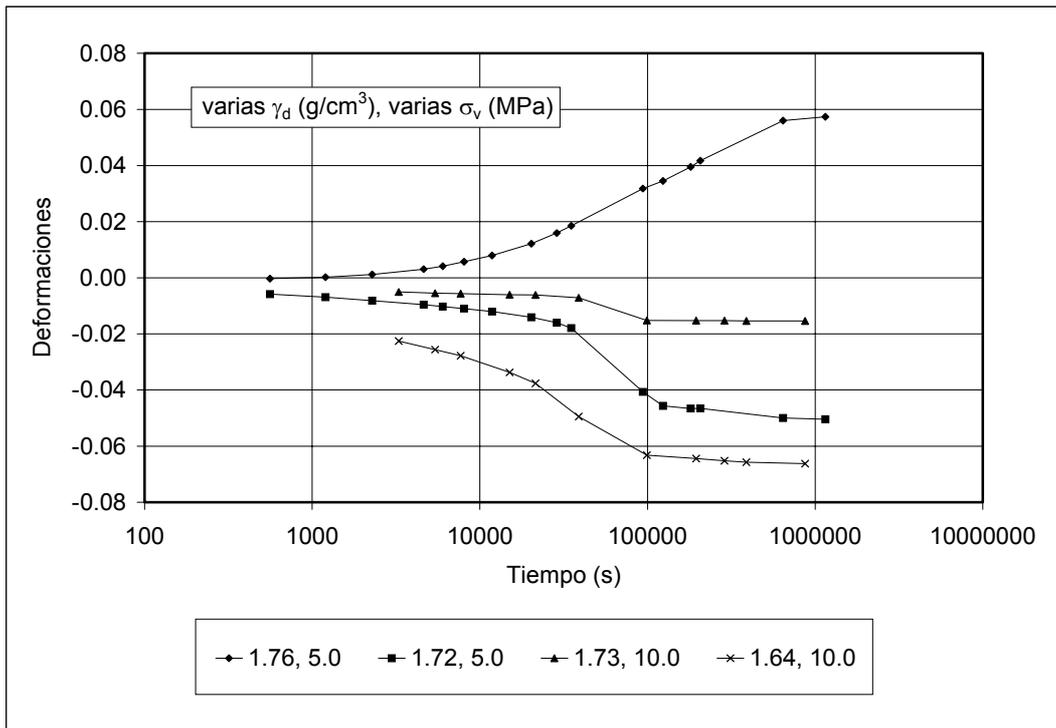


Figura 4.3.8 Evolución temporal de la deformación durante la saturación. Tensión vertical aplicada (σ_v)=5.0 y 10.0 MPa.

4.4 PERMEABILIDAD SATURADA

La permeabilidad saturada de la arcilla es un parámetro fundamental en el análisis del comportamiento hidráulico (evolución de las presiones de agua), térmico (transporte de calor por flujo advectivo de agua) y mecánico (tensiones generadas por la tendencia de la arcilla a hinchar cuando se satura). Se dispone de resultados de ensayos de medida directa realizados por Villar (2000). En esta sección se mencionarán dos metodologías distintas para encontrar la permeabilidad saturada.

4.4.1 MEDIDA DIRECTA

La permeabilidad saturada del agua ha sido medida en una muestra inicialmente compactada a una densidad seca de 1.76 g/cm^3 , cargada en una célula edométrica con una tensión vertical de 5 MPa y saturada. Después de saturar, el índice de poros resultante era de 0.65, finalmente se impuso un gradiente de presión de agua constante con una presión de 0.5 MPa en la parte inferior y de 0.05 MPa en la superior; las presiones se mantuvieron durante 10 días para obtener un flujo de agua estacionario a través del suelo. Durante este periodo, el

volumen de agua que entraba y salía fue medido. El desplazamiento vertical del suelo durante el ensayo de permeabilidad fue menor de 10 μm . La metodología de ensayo está descrita en el procedimiento del proyecto FEBEX 70-UPC-G-0-05.

Las presiones y el volumen de agua se midieron con dos sistemas de aplicación de presión y medida de volumen de agua que funcionan imponiendo la presión con ayuda de un motor paso a paso, el volumen de agua que entra o sale de la muestra se puede medir con una resolución de 1 mm^3 ; en la figura 4.4.1 se muestran los flujos de agua de entrada y salida. Si se calcula la permeabilidad a partir de la media del flujo de la entrada y salida de agua, se obtiene una permeabilidad de $6.9 \cdot 10^{-14}$ m/s.

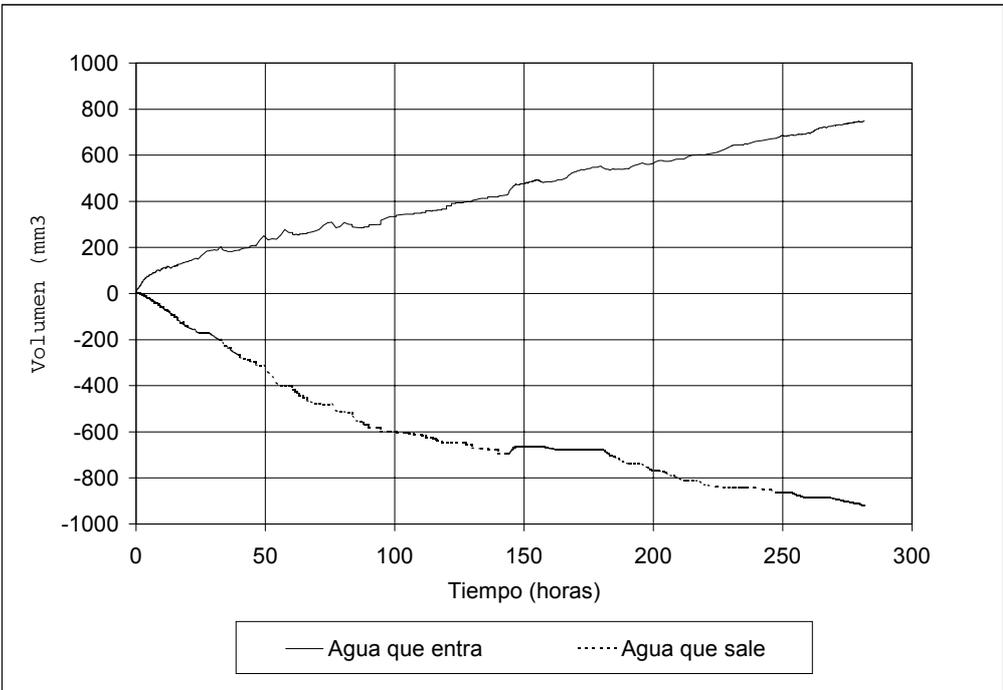


Figura 4.4.1 Evolución de la cantidad de agua que entra y sale de la muestra en mm^3 en un ensayo de medida directa de la permeabilidad saturada

4.4.2 MEDIDA INDIRECTA CON ENSAYOS EDMÉTRICOS

La permeabilidad saturada puede deducirse a partir de un ensayo edométrico. Se realizaron cuatro ensayos con cuatro muestras previamente utilizadas en ensayos de

hinchamiento bajo carga. Para la determinación de la permeabilidad saturada, se utilizó el modelo analítico que a continuación se describe:

$$\delta = \delta_0 + \frac{2H\Delta\sigma}{E_m} U(t, c_v, H) + 2HC_\alpha \log_{10}(t/t_{90})$$

$$c_v = \frac{kE_m}{\gamma_w}$$

Donde δ es el desplazamiento vertical de la muestra, δ_0 es el desplazamiento debido al acomodo del equipo, $2H$ es la altura de la muestra, $\Delta\sigma$ es el incremento de tensión vertical, E_m es el módulo edométrico, C_α es el coeficiente de consolidación secundaria, $U(t, C_v, H)$ es el grado de consolidación deducido de la teoría de Terzaghi, c_v es el coeficiente de consolidación, k es la permeabilidad saturada, γ_w es el peso específico del agua y t_{90} es el tiempo necesario para llegar al 90% de la consolidación primaria de la muestra, (se asume que para tiempos menores que t_{90} , la consolidación secundaria es despreciable).

Con un programa que minimiza el cuadrado de la suma de las diferencias entre los valores medidos y calculados con la hipótesis de comportamiento antes descrita, se pueden obtener los parámetros del modelo. La figura 4.4.2.1 muestra la deformación vertical medida y la mejor estimación obtenida para cada ensayo. La tabla 4.4.2.1 muestra los valores de los parámetros obtenidos para cada ensayo. ε_r es la media en valor absoluto de la diferencia entre las medidas y la aproximación analítica. Hay que señalar que la magnitud de estos errores es comparable a la resolución de los equipos de medida, lo que indica que el modelo utilizado reproduce bien los fenómenos que tienen lugar durante el ensayo.

La figura 4.4.2.2 muestra el efecto del índice de poros en la permeabilidad obtenida, incluyendo la medida directa. Se han incluido resultados de Villar (2000). Como puede apreciarse, la permeabilidad obtenida en esta tesis es algo mayor que la obtenida por Villar.

γ_d g/cm ³	e_i	σ_i MPa	σ_f MPa	c_v 10 ⁻³ cm ² /s	E_m MPa	k m/s	c_a 10 ⁻³	δ_0 μ m	ϵ_r μ m
1.15	1.42	0.01	0.1	4.39	44.2	$9.9 \cdot 10^{-10}$	3.26	597	6.6
1.12	1.47	0.01	0.1	4.47	49.0	$9.12 \cdot 10^{-10}$	3.37	446	12
1.37	1.04	0.2	1.0	0.0415	18.27	$2.27 \cdot 10^{-12}$	6.00	273	15.4
1.39	1.00	0.5	1.0	0.032	42.46	$7.53 \cdot 10^{-13}$	1.99	43	5.5

Tabla 4.4.2.1 Parámetros obtenidos en los ensayos edométricos

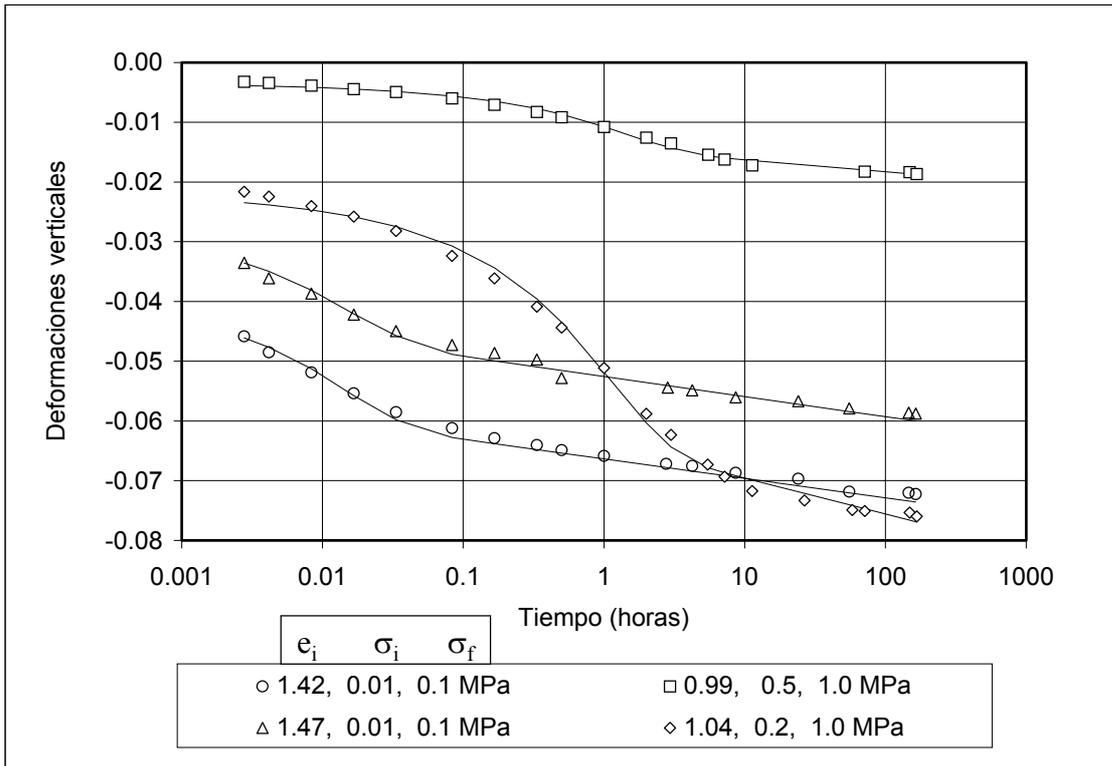


Figura 4.4.2.1 Evolución temporal medida de las deformaciones. La línea continua representa la aproximación numérica

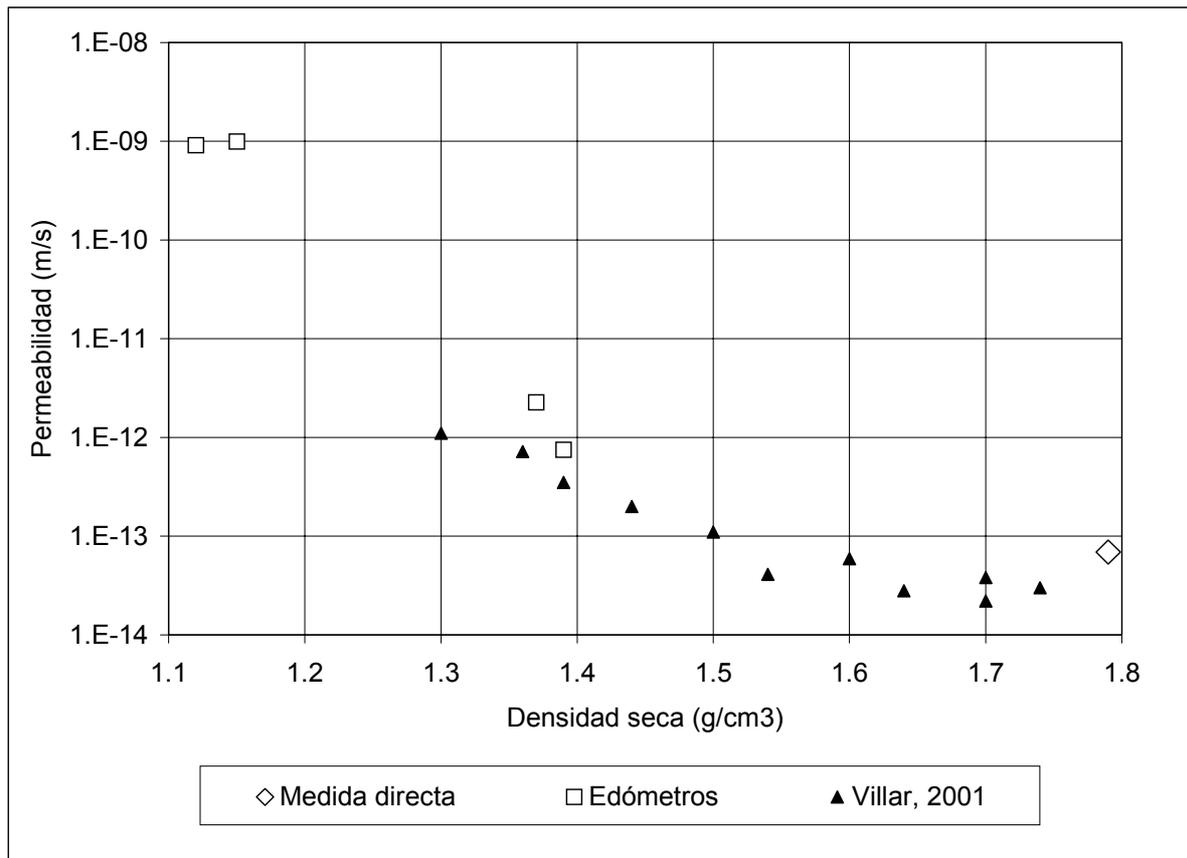


Figura 4.4.2.2 Permeabilidad en función de la densidad seca

4.5 ENSAYOS DE COLUMNA RESONANTE

El módulo de rigidez al corte controla las deformaciones elásticas que se producen en la bentonita sometida a un incremento de tensión de corte.

Con el objeto de estudiar el efecto de la saturación en la rigidez de la bentonita, las muestras se compactaron con una densidad seca comprendida entre 1.50 y 1.75 g/cm³, con grados de saturación de 0.15, 0.5 y 0.9 y se ensayaron con el equipo de columna resonante siguiendo el procedimiento del proyecto FEBEX 70-UPC-G-0-06 para obtener el módulo elástico de rigidez al corte G para pequeñas deformaciones tangenciales ($10^{-6} \leq \gamma \leq 10^{-4}$). Las dimensiones de las muestras eran 38 mm de diámetro y 76 mm de altura (figura 4.5.1). El tipo de columna resonante usado impone desplazamientos en un extremo y los fija en el otro (Drnevich, 1978; Anderson y Stokoe, 1978; Richart, 1970).



Figura 4.5.1 Muestra y vaso compactador (altura de la muestra de 76 mm y diámetro de 38 mm).

La figura 4.5.2 muestra la variación del módulo de corte con la deformación y la presión de confinamiento para el caso de grado de saturación igual a 0.5 y una densidad seca inicial de 1.62 g/cm^3 . La tabla 4.5.1 y la figura 4.5.3 muestran un resumen de los resultados. En la figura 4.5.4 se muestra una figura donde se relaciona la presión de confinamiento con el módulo de corte para varios grados de saturación manteniendo fija la densidad seca. En la figura 4.5.5 se muestra la relación entre el grado de saturación y el módulo de corte para varias presiones de confinamiento.

Los resultados obtenidos muestran que el módulo de rigidez aumenta al aumentar la presión de confinamiento. La dependencia del módulo de rigidez con la densidad seca no se ha podido constatar con claridad en esta serie de ensayos cuando era de esperar un aumento del módulo con la densidad seca (Xude Quian, 1993). Sin embargo, sí parece detectarse un aumento del módulo G con el grado de saturación. En la figura 4.5.3 puede observarse que el aumento del grado de saturación prevalece sobre el de la densidad seca en el aumento del módulo de corte. En la figura 4.5.5 se puede observar que la rigidez del suelo aumenta al aumentar el grado de saturación de la muestra hasta que a valores próximos a saturación, se produce una disminución brusca del módulo de corte.

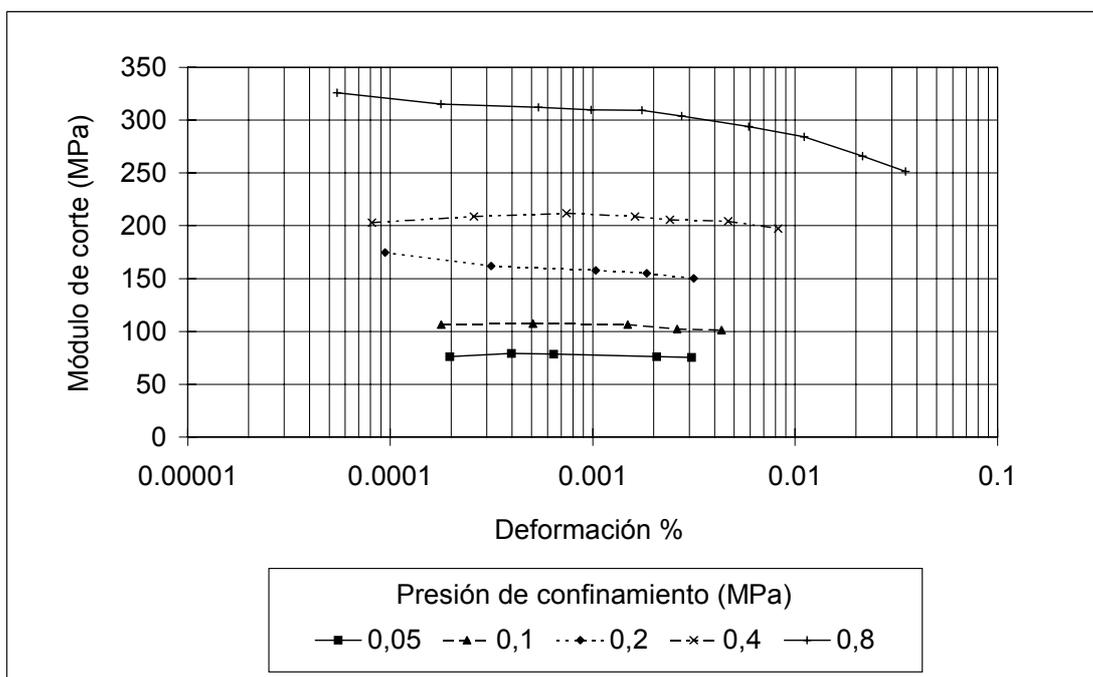


Figura 4.5.2 Módulo de corte en función de la deformación para varias presiones de confinamiento

γ_d g/cm ³	Humedad %	Sr %	e	Módulo de corte (MPa)				
				$\sigma_3 = 0.01$ MPa	$\sigma_3 = 0.1$ MPa	$\sigma_3 = 0.2$ MPa	$\sigma_3 = 0.4$ MPa	$\sigma_3 = 0.8$ MPa
1.58	14.73	54.13	0.757	140	207	245	300	370
1.67	13.63	56.67	0.668	211	223	270		
1.54	3.35	11.62	0.802	78	106	174	208	326
1.56	2.84	10.17	0.777	89	106	138		
1.62	24.57	95.32	0.717	240	270		331	336
1.66	21.25	87.21	0.677	252	296	370	429	502
1.65	4.67	18.97	0.685	74	90	137	190	310
1.72	10.40	47.00	0.615	200	219	293	381	429
1.68	3.74	15.96	0.652	61	89	141	200	290
1.62	12.71	49.51	0.713	122	180	240	299	387

Tabla 4.5.1 Resumen de resultados obtenidos con la columna resonante

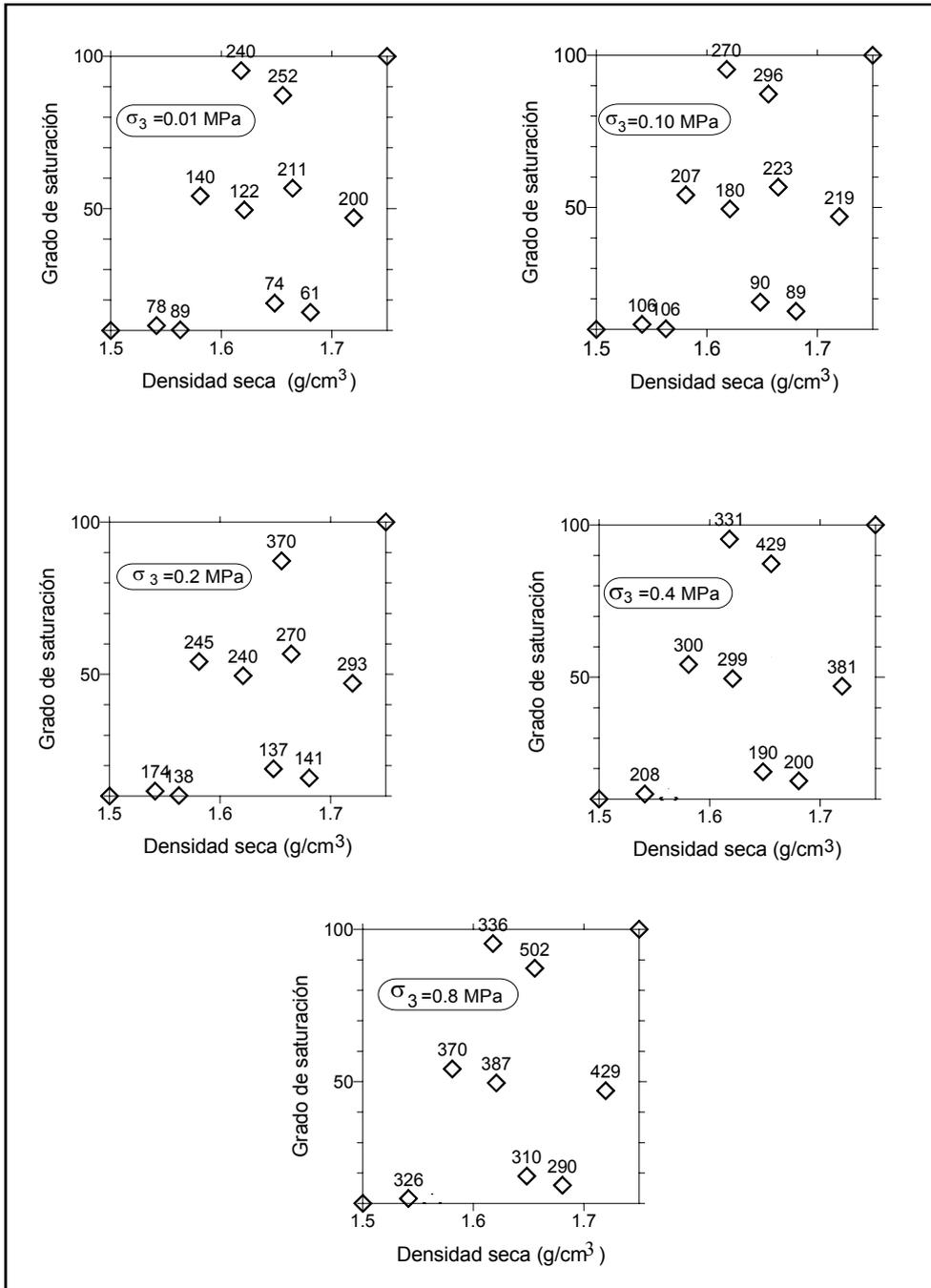


Figura 4.5.3 Módulo de corte a pequeñas deformaciones para varios grados de saturación y densidad seca

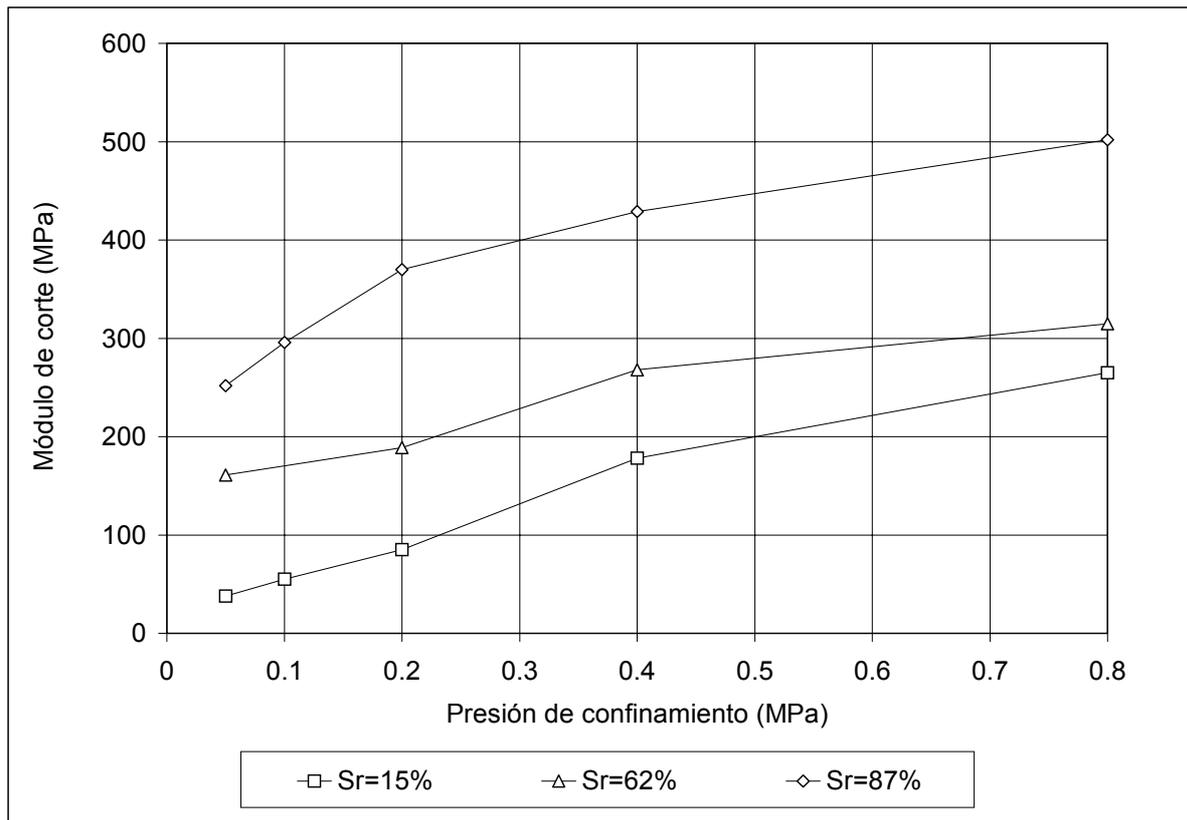


Figura 4.5.4 Relación entre la presión de confinamiento y el módulo de corte para distintos grados de saturación. Densidad seca=1.66 g/cm³

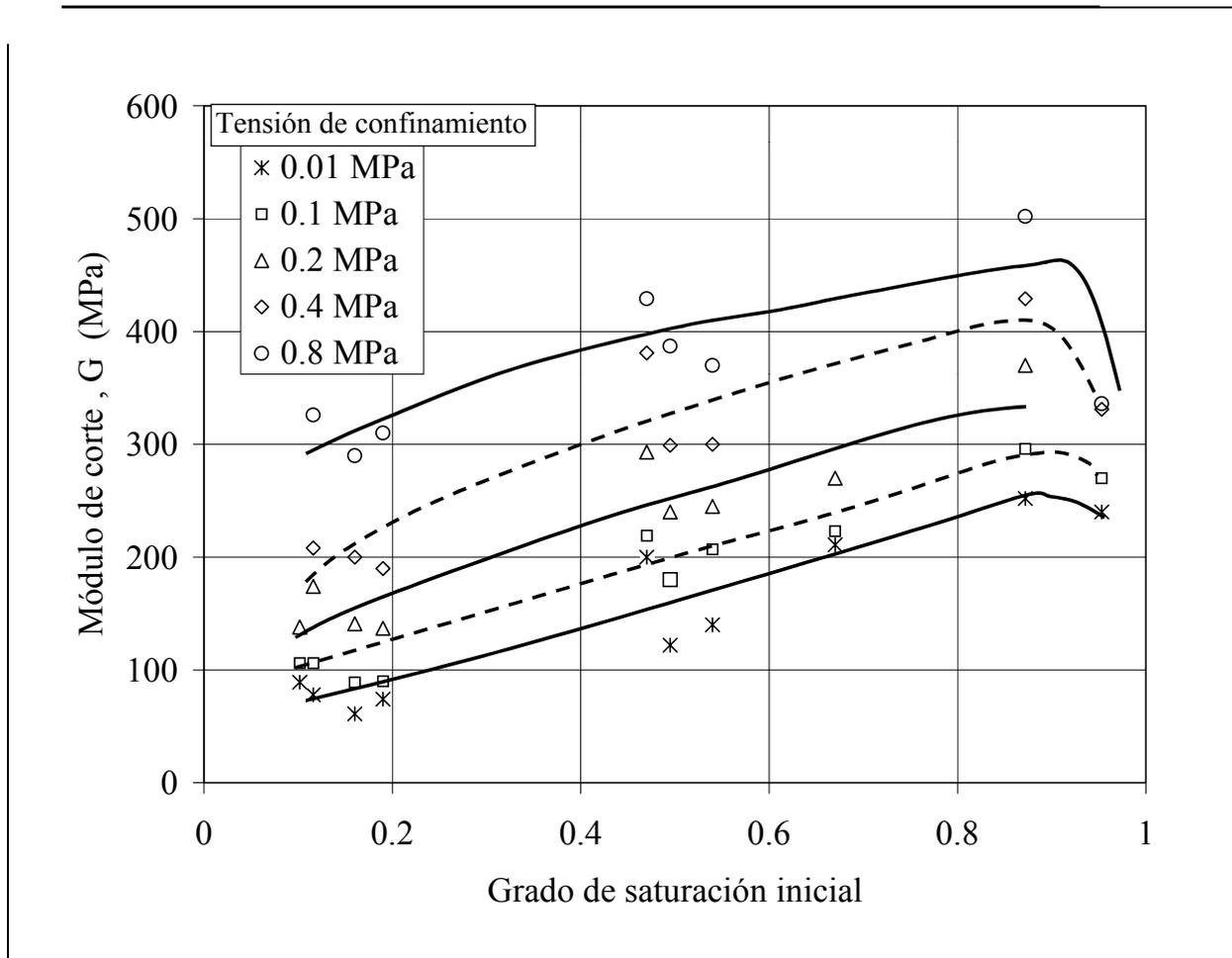


Figura 4.5.5 Relación entre el grado de saturación inicial y el módulo de corte para distintas presiones de confinamiento.

5. TÉCNICAS EXPERIMENTALES EMPLEADAS Y RESULTADOS OBTENIDOS

5.1 INTRODUCCIÓN

Dadas las especiales características del material a ensayar (una arcilla muy expansiva) y del problema a estudiar (comportamiento termo-hidro-mecánico), se hizo necesario utilizar una serie de técnicas experimentales no convencionales para caracterizar su comportamiento.

Los problemas que plantea este suelo son debidos a su baja permeabilidad y su gran expansividad, lo que significa que, en ensayos en los que se desee modificar la succión de manera controlada, se deberá contar con largos tiempos de espera hasta que la muestra de suelo alcance el equilibrio. Un modo de acelerar este tiempo es reducir el tamaño de la muestra. Esta operación puede hacerse sin modificar las características del suelo al tener un 93% de partículas con un tamaño inferior a 74 μm . Sin embargo, trabajar con muestras pequeñas implica cometer errores relativos mayores a la hora de medir sus dimensiones y al fijar su densidad inicial. Esto es importante, ya que las características de una arcilla expansiva están fuertemente ligadas a su densidad, por lo que hay que tener sumo cuidado a la hora de medir el volumen de las muestras.

La alta expansividad del material hace que cambios de humedad espúreos provoquen comportamientos inesperados del suelo. Sin embargo, en caso de producirse alguna anomalía durante el ensayo (por ejemplo, intrusión incontrolada de agua en la muestra), el suelo se hinchará o se retraerá de manera visible. De este modo, se podrán detectar fallos en un ensayo tan pronto como aparezcan comportamientos extraños, que serán bien visibles.

Las nuevas técnicas experimentales y equipos de ensayo desarrollados han consistido en un nuevo método de ensayo edométrico con succión controlada, un equipo para estudiar los cambios de volumen frente a cambios de temperatura y un equipo para estudiar el efecto hidromecánico del flujo de calor en una muestra. Como se verá posteriormente, este equipo permitió la medida de diversos parámetros con ayuda del análisis inverso.

En este capítulo se presenta la descripción de estos equipos y las medidas directas obtenidas junto con algunas conclusiones que pueden establecerse directamente a partir de éstas sin el empleo de retroanálisis de modelos numéricos.

5.2 ENSAYOS EDMÉTRICOS CON SUCCIÓN CONTROLADA

Estos ensayos se realizaron con el fin de estudiar el comportamiento mecánico de la arcilla. Las trayectorias seguidas servirán, además, para reproducir parcialmente las trayectorias de succión y tensión (aunque en condiciones isoterma) que, previsiblemente, se van a dar en los experimentos de maqueta e “in situ” del proyecto FEBEX. Son trayectorias que pueden ser de gran ayuda para la identificación de parámetros del modelo de los modelos numéricos que se emplean para interpretar dichos experimentos.

5.2.1 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO Y PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS

El elemento básico del equipo lo constituyen unas células edométricas de acero inoxidable ya utilizadas anteriormente para ensayos edométricos en muestras de agregados de sal, con el fin de estudiar los efectos de fluencia en esta material cuando está sometido a altas tensiones (Chumbe, 1997). En las figuras 5.2.1.1 y 5.2.1.2, puede verse el esquema del equipo. En las figuras 5.2.1.3 a 5.2.1.7 se presentan fotografías de la célula, las bancadas edométricas, el sistema de imposición de succión y la bancada edométrica donde se realizaron los ensayos con cambio volumétrico controlado (ensayos de presión de hinchamiento). La altura inicial de la muestra oscila entre 10 y 15 mm y el diámetro puede ser de 30 o 50 mm, dependiendo del tipo de célula usada; en las bases de la muestra se colocan sendas piedras porosas de bronce sinterizado. La compactación de las muestras se hace en las mismas células (procedimiento 70-UPC-G-0-04). Este procedimiento tiene el inconveniente de que la altura de la muestra debe cuantificarse a partir de medidas indirectas hechas con un pie de rey, con una resolución de 0.05 mm. La altura se deduce de la diferencia entre la profundidad del vaso compactador con las piedras porosas medido antes de compactar y la misma medida tras compactar. El error que se va a cometer al medir la altura puede llegar a ser de 0.10 mm al tenerse que hacer dos medidas y restar ambas (los errores son aditivos puesto que uno puede ser por exceso y el otro por defecto). Este hecho, unido a la relajación diferida que pueda tener la muestra tras la compactación, puede conducir a errores a la hora de interpretar los ensayos.

Es conveniente acotar el error que se va a producir en la medida de la densidad seca (γ_d), que al ser una medida indirecta, puede obtenerse utilizando la teoría de propagación de errores.

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V_T} = \frac{W_T / (1 + \omega)}{V_T} = \frac{((t + W_T) - (t)) / \left(1 + \frac{((t'+s + a) - (t'+s))}{((t'+s) - (t'))}\right)}{(\phi)^2 (h) \pi 0.25}$$

Donde W_s , W_T , V_T , ϕ y h son el peso seco de la muestra, el peso total, el volumen total, el diámetro y la altura. t es el peso del recipiente que contiene el material que se va a compactar para realizar el ensayo, t' es el peso del recipiente usado en las pesadas realizadas para medir la humedad. s y a son el peso de suelo seco y de agua en la fracción de suelo empleada para medir la humedad.

En un cociente de medidas $\frac{x}{y}$, el error cometido se puede acotar y, en el supuesto de que no se cometen errores accidentales o sistemáticos, siempre es menor que: $\left| \frac{\epsilon_x}{x} \right| + \left| \frac{y \epsilon_y}{x y} \right|$. En el caso de un producto de medidas xy , el error cometido es siempre menor que $|\epsilon_x| + |y \epsilon_y|$. Para una muestra standard de 5 cm de diámetro, una altura de 1.0 cm y una densidad seca de 1.65 g/cm³, la cota máxima del error es 0.012 g/cm³, lo que representa un error relativo menor del 1 % (suponiendo que el error cometido al pesar es de 0.005 g y al medir de 0.05 mm). Para una muestra de 3.0 cm de diámetro, aunque el error relativo que se comete al medir su peso de suelo seco y su volumen es algo mayor que en una muestra de 5.0 cm de diámetro, la cota máxima de error no excede de 0.015 g/cm³, por lo que se puede concluir que con ambas células se comete un error semejante. Estos errores, aunque sean relativamente pequeños, pueden tener una influencia no desdeñable en el resultado de algunos ensayos. Por ejemplo, el valor de la presión de hinchamiento se incrementa en 2 MPa aproximadamente al pasar de una densidad seca de 1.7 g/cm³ a 1.8 g/cm³.

El error cometido al medir la humedad se calcula de una forma similar al error cometido en la medida de la densidad seca inicial. La cantidad de material utilizada para medir la humedad inicial era aproximadamente de 40 gramos. Si se tiene en cuenta que en las

condiciones de humedad relativa y temperatura del laboratorio se tenía aproximadamente 5 gramos de agua y 35 gramos de suelo, el error cometido se estima en menor del 0.02 %.

La succión se impone con la técnica de humedad relativa controlada, utilizada en los ensayos para la obtención de la curva de retención; sin embargo, en lugar de utilizar un sistema estático, con la muestra introducida en un desecador donde se impone la succión (Villar, 2000; Esteban, 1990), se usa un sistema dinámico como el que se muestra las figuras 5.2.1 y 5.2.2, donde el aire se bombea y circula bien a través de la muestra, bien sólo por las piedras porosas. El aire se hace pasar por un recipiente en cuyo interior, hay una disolución que impone una humedad relativa al aire preestablecida. El caudal máximo de la bomba oscila entre 3.5-7.0 litros/minuto, sin embargo, este caudal desciende mucho cuando se producen pérdidas de carga debidas a la circulación a través de la muestra y de las piedras porosas. La bomba es hermética y está movida por un motor de corriente continua de velocidad variable. Se realizó un ensayo donde se midió la presión del gas a la entrada de la muestra (en el extremo opuesto, el manómetro no medía al ser la presión del gas menor que la atmosférica), la presión no superó el valor de 0.02 MPa en ningún caso. La succión se impone con disoluciones de ácido sulfúrico cuando el intervalo que se impone varía entre 38 y 400 MPa, con sales saturadas cuando lo hace entre 3 y 10 MPa y con disoluciones de PEG (Polietilenglicol 20000) para tratar de imponer succiones en el intervalo entre 3 MPa y saturación (esta succión era de 1 MPa aproximadamente). En principio, parece mejor utilizar disoluciones saturadas en todos los intervalos al ser más fácil saturar una disolución que controlar su densidad, sin embargo, existe el riesgo de que iones de la sal disuelta se mezclen con el aire que circula y precipiten en los tubos, piedras porosas o lo que es peor, en la misma muestra. No se ha encontrado ninguna solución salina saturada que imponga una succión inferior a 2.7 MPa.

El hecho de que el aire circule a través de la muestra permite reducir sensiblemente el tiempo de equilibrio al obligar al aire con humedad relativa controlada a estar en contacto con el agua del interior de la muestra. Mientras la muestra está sometida a cargas verticales pequeñas y succiones elevadas, el aire pasa fácilmente a través de la misma y el sistema funciona bien, pero cuando el empaquetamiento es grande debido a altas tensiones verticales o la muestra tiene un grado de saturación tan elevado que hace perder la continuidad de la fase gaseosa, el flujo queda impedido y la muestra no reacciona cuando se intenta cambiar la succión; en este caso, es necesario hacer circular el aire por las dos bases de la muestra. Este hecho añadido a que la permeabilidad al gas disminuye al reducirse el volumen de poros

accesible, multiplica el tiempo de estabilización. En las figuras que muestran la relación tiempo – deformación obtenida en los ensayos se podrán apreciar estas diferencias en los tiempos de estabilización.

Un problema importante que puede tener el ensayo es que haya alteraciones exteriores en el aire del circuito debido a malos aislamientos o a que se perforen los tubos por condensación de gotas de disolución ácida en algún codo, lo que obliga a controlar el ensayo diariamente ya que, si esto sucede, los desplazamientos verticales no van a seguir la tendencia lógica a esperar ante el cambio de succión. Otro problema es el que se condense agua en los tubos; en este caso conviene purgarlos para que no entre agua en la muestra. Finalmente, hay que comentar que el aire que circula por la muestra, cuando la imposición de la succión se hace con disoluciones de ácido sulfúrico, puede estar contaminado con solutos volátiles, que puede alterar la composición de la arcilla.

El problema del efecto del cambio de temperatura en el laboratorio ya se comentó cuando se describió la obtención de la curva de retención en el capítulo 4. En este tipo de ensayos es importante controlar la temperatura del laboratorio, ya que la relación entre la humedad relativa impuesta y la succión de la muestra depende de la temperatura según la ley psicrométrica. Por otra parte, la relación entre la concentración de soluto y la actividad del agua depende también de la temperatura sobre la regulación de la succión. El intervalo de cargas que se han aplicado con las palancas edométricas ha sido entre 0.15 y 8.5 MPa.

Este tipo de células también se han utilizado para medir la presión de hinchamiento en ensayos en los que se reduce la succión impidiendo las deformaciones de hinchamiento. En las figuras 5.2.1.4 y 5.2.1.5 pueden verse unas fotos del ensayo preparado para impedir las deformaciones de la muestra. El sistema consta de un marco en el que se coloca una célula de carga apoyada en la palanca, lejos de donde está la célula, por lo que se tiene un efecto multiplicador de las deformaciones de la muestra. Esta célula de carga impide que la palanca se eleve cuando la muestra tiende a hinchar. Puesto que la célula de carga se deforma ligeramente cuando mide, existe un tornillo que permite apretar la célula de carga contra la palanca con el fin de mantener fija la deformación de la muestra. Esta deformación puede medirse directamente en la célula edométrica con la ayuda de un micrómetro. Con este sistema se han alcanzado tensiones verticales superiores a los 9 MPa.

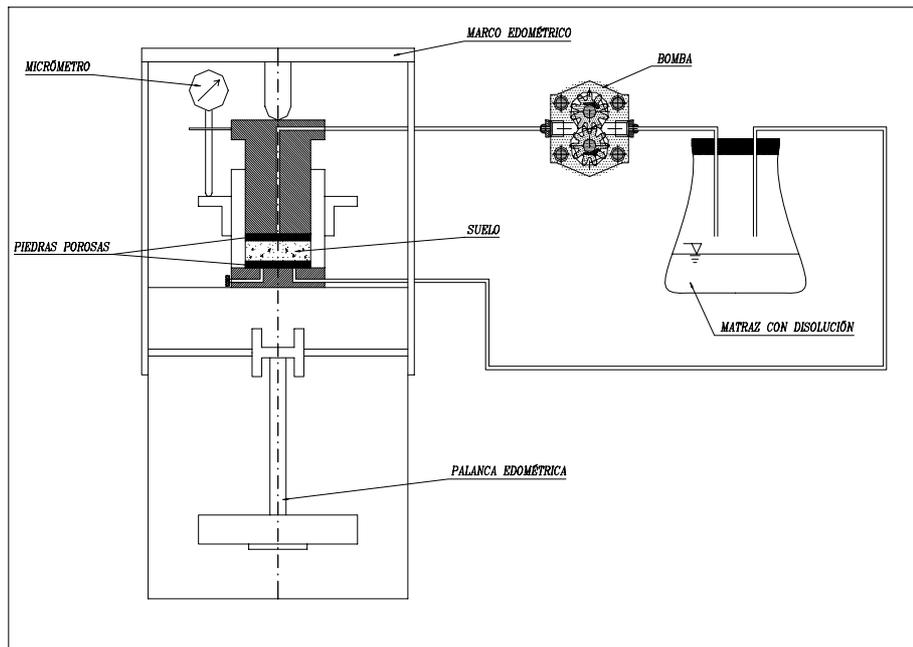


Figura 5.2.1.1 Alzado del esquema del dispositivo empleado en el ensayo edométrico con succión controlada (conexiones dispuestas para realizar el ensayo con flujo a través de la muestra).

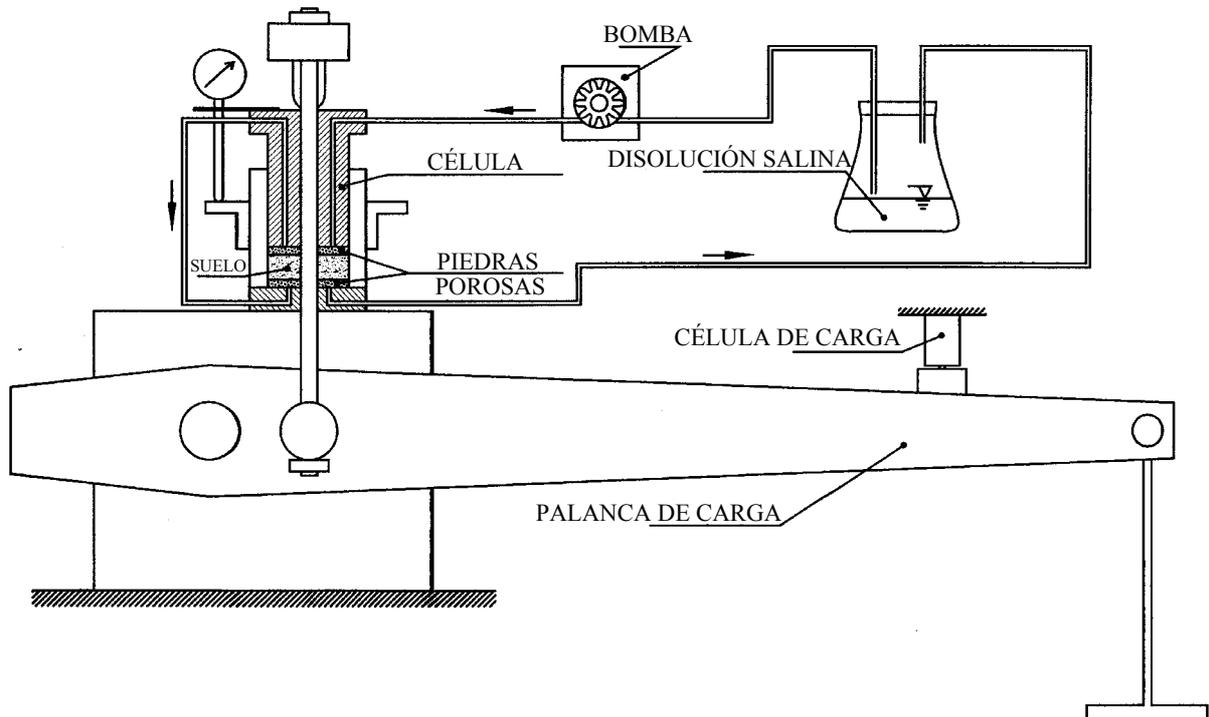


Figura 5.2.1.2 Perfil del esquema del dispositivo empleado en el ensayo edométrico con succión controlada (conexiones dispuestas para realizar el ensayo con flujo de aire en las piedras porosas colocadas encima y debajo de la muestra).

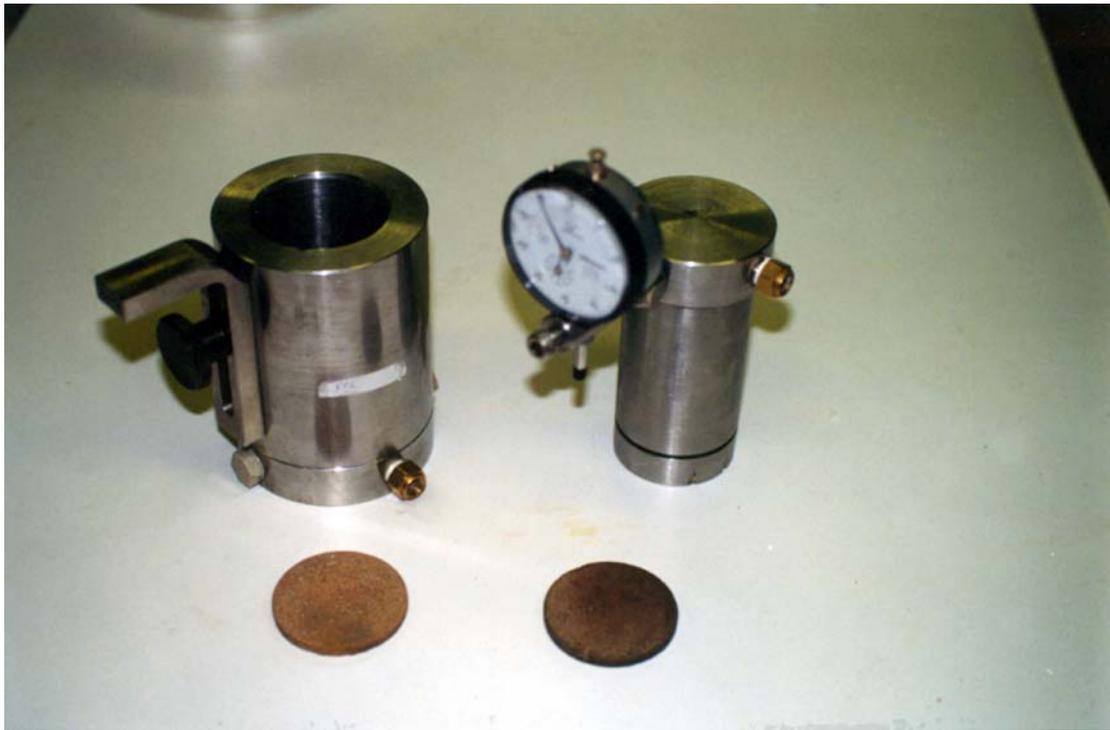


Figura 5.2.1 3 Célula edométrica desmontada con las piedras porosas

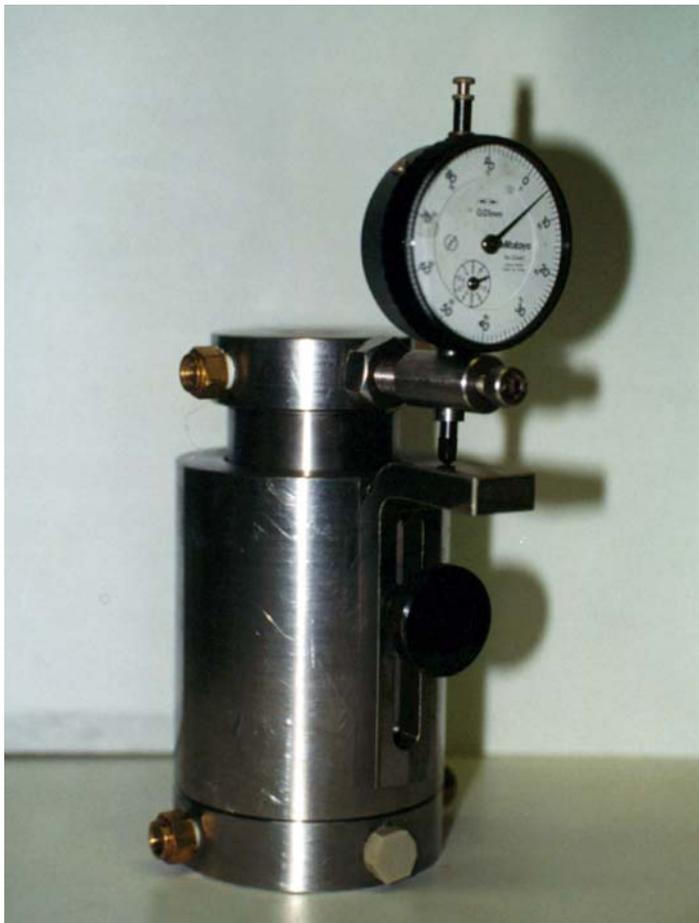


Figura 5.2.1.4 Célula edométrica montada ($\phi=50$ mm)

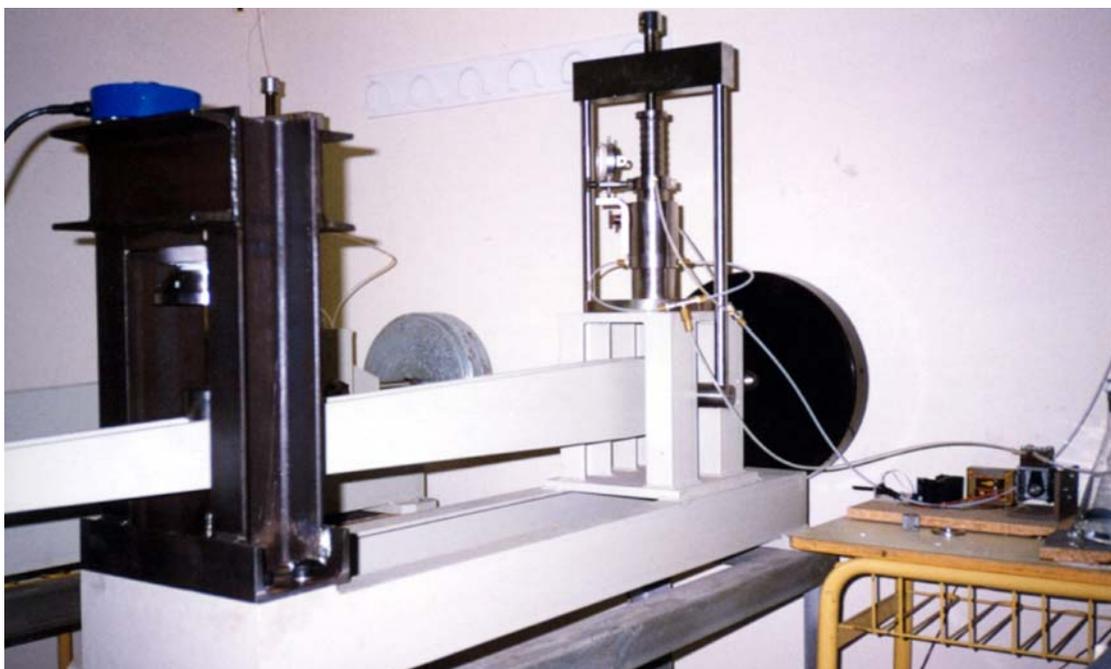


Figura 5.2.1.5 Bancada edométrica con el sistema de medida continua de carga en ensayos con deformación vertical impedida

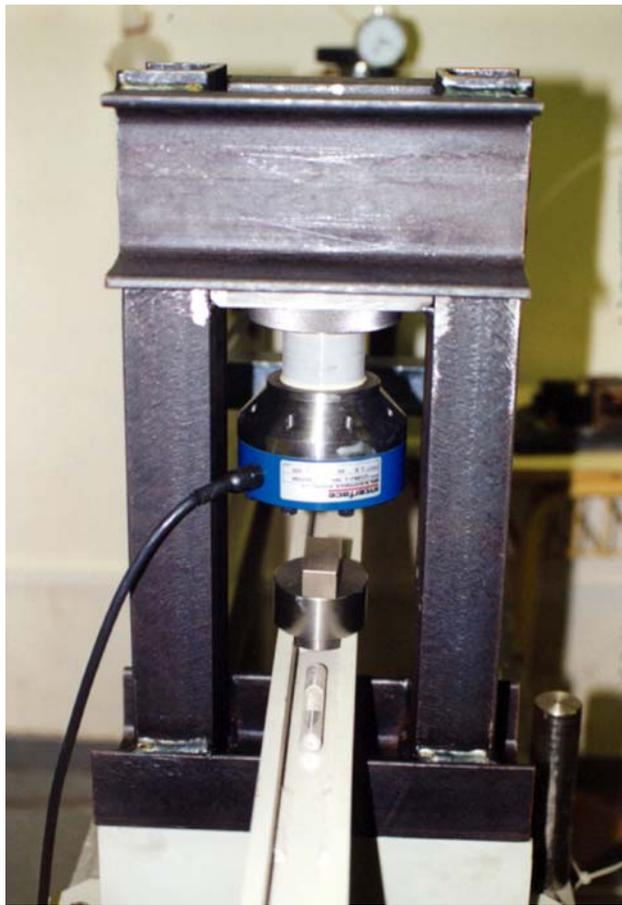


Figura 5.2.1.6 Célula de carga montada en la bancada para ensayos con deformación vertical impedida

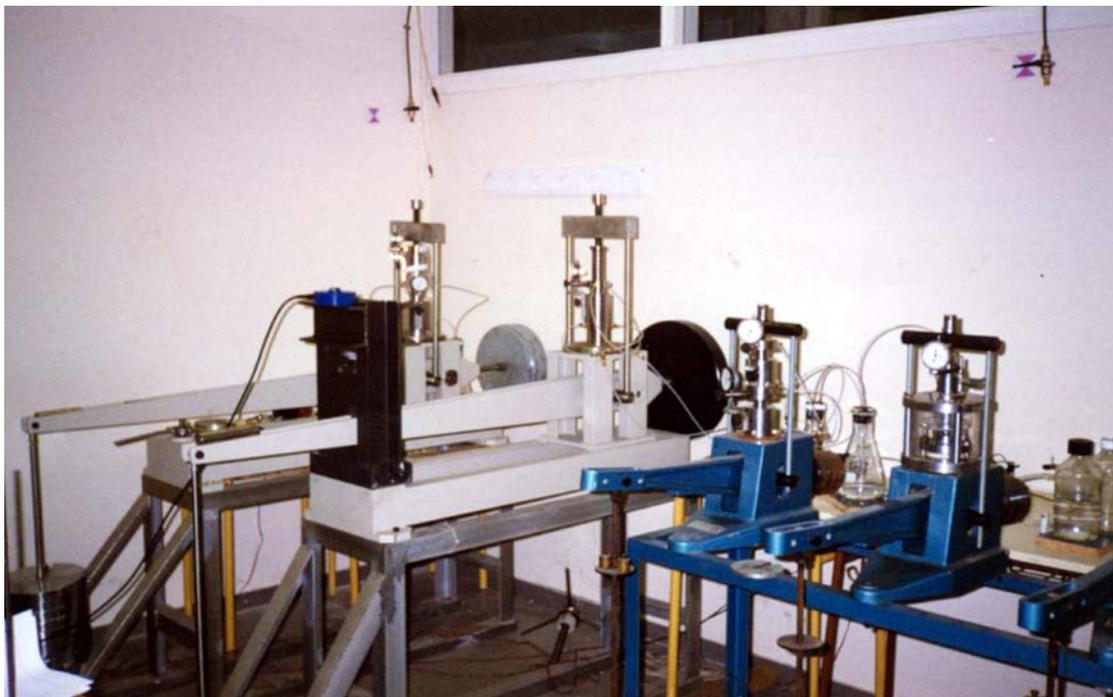


Figura 5.2.1.7 Vista de las palancas edométricas con las células montadas

5.2.2 PLAN DE ENSAYOS

En la tabla siguiente, se numeran las trayectorias y se indica la humedad y la densidad seca inicial de cada ensayo. Las trayectorias 1, 2, 3, 5, 6 y 7 se realizaron con células de 50 mm de diámetro mientras que las cuatro restantes, con células de 30 mm.

Trayectoria	1	2	3	4*	5	6	7	8*	9*	10*
ω_i (%)	14.35	14.16	13.16	14.16	14.16	12.36	14.62	12.72	14.62	12.05
γ_{di} (g/cm ³)	1.62	1.62	1.63	1.63	1.62	1.65	1.62	1.64	1.62	1.66

Tabla 5.2.1 Propiedades iniciales de las muestras. Las trayectorias marcadas con el * se realizaron con células de 30 mm de diámetro, el resto se realizaron con células de 50 mm

A continuación se describen las trayectorias seguidas en los ensayos realizados. Se describe también la zona de la barrera donde se seguirá total o parcialmente una trayectoria análoga a la descrita. Es importante recalcar que estos ensayos de laboratorio no permiten reproducir exactamente el comportamiento de la arcilla en el ensayo “in situ” o el ensayo en maqueta, ya que se han ejecutado en condiciones isoterma, sin embargo, hay que indicar también que las trayectorias no se han pensado para obtener exclusivamente de forma directa parámetros de modelos elastoplásticos, (por ejemplo, no se han realizado ciclos de carga y descarga o de secado – humedecimiento para obtener de forma directa deformaciones irreversibles). Por otra parte, el desconocimiento de la tensión lateral dificulta la obtención de esos parámetros. En las figuras 5.2.2.1 y 5.2.2.2 pueden apreciarse las trayectorias seguidas.

- Trayectoria tipo 1: La trayectoria consistió en la aplicación de una tensión vertical inicial baja (de 0.15 MPa) y una succión parecida a la inicial (de 128 MPa). A continuación se disminuyó de succión hasta 84, 40, 10.3 y 3.8 MPa. Posteriormente se aumentó la tensión vertical por escalones hasta 8.15 MPa. Finalmente, se incluyó una descarga también por escalones manteniendo constante la succión (3.8 MPa). Esta trayectoria se puede producir total o parcialmente en la arcilla en contacto con la pared rocosa. En un principio, la arcilla aumenta su grado de saturación al penetrar agua procedente de la roca, con lo que disminuye la succión e hincha. Cuando la arcilla ocupa los espacios entre bloques y entre éstos y la roca, empieza a aumentar su tensión.
- Trayectoria tipo 2: La trayectoria ensayada siguió las siguientes fases: Aplicación de una

tensión vertical inicial de 0.15 MPa y una succión de 125 MPa. Aumento de succión a 146, 219 y 424 MPa, luego se procedió a aumentar la tensión vertical por escalones hasta 8.53 MPa. Disminución de succión a 219, 146, 80, 48, 10.3, aproximadamente 1 MPa y saturación. Descarga por escalones. Esta trayectoria puede producirse total o parcialmente en la zona cercana al calentador. Debido al calor procedente de éste, la arcilla perderá agua y aumentará su succión, posteriormente y debido al hinchamiento de la zona cercana a la roca, puede aumentar su tensión. Finalmente, llegará el agua procedente de la roca y la arcilla empezará a disminuir su succión hasta saturarse.

- Trayectoria tipo 3: La trayectoria siguió las siguientes etapas: Aplicación de una tensión vertical inicial de 0.15 MPa y una succión de 146 MPa. Disminución de la succión (por escalones de 69, 42, 14, 3.7, aproximadamente 1 MPa y saturación) y aumento simultáneo de carga, con cambios de volumen muy pequeños (Ensayo de presión de hinchamiento con succión controlada, donde la deformación a lo largo del ensayo no pasó de 0.01). Descarga por escalones. Esta trayectoria puede producirse en zonas intermedias de la barrera. La arcilla disminuye su succión al mismo tiempo que aumenta la carga debido a que no puede hinchar al no quedar espacio libre entre bloques ni entre éstos y la roca.

- Trayectoria tipo 4: Esta trayectoria es una variante de la anterior. La trayectoria siguió las siguientes etapas: Aplicación de una tensión vertical inicial de 0.15 MPa y una succión de 128 MPa. Disminución de succión (con la misma carga) hasta alcanzar un determinado valor de aumento de volumen (del orden del 6% desde el inicio) y, a partir de ese momento, se siguió una trayectoria tipo 3 (ensayo de presión de hinchamiento). Las succiones impuestas han sido de 79, 39, 10.3, 3.7, aproximadamente 1 MPa y saturación. Descarga por escalones. Cuando disminuye la succión, puede suceder que la arcilla hinche libremente porque todavía no se han sellado las juntas. El conjunto de la arcilla que forma la barrera puede hinchar hasta un 6 % de promedio teniendo en cuenta los espacios entre bloques y entre éstos y las paredes (las zonas de los bloques cercanos a las juntas hincharán más que los que estén en el interior).

- Trayectoria tipo 5: Es una variante de la trayectoria 1. La trayectoria siguió las siguientes etapas: Aplicación de una tensión vertical inicial de 0.15 MPa y una succión de 127 MPa. Aumento de succión a 261 y 466 MPa. Disminución de la succión (por escalones de 384, 150, 71, 38, 10.3 y 3.7 MPa). Aumento de carga por escalones hasta 8.03 MPa. Descarga por escalones.

- Trayectoria tipo 6: Esta trayectoria siguió las siguientes etapas: Aplicación de una carga inicial de 0.15 MPa y una succión de 122 MPa. Manteniendo la succión inicial, se aumentó la carga por escalones hasta 8.3 MPa. Reducción de la succión (por escalones de 79, 38, 10.3, 3.7 MPa y saturación). Descarga por escalones. Esta trayectoria puede producirse en zonas intermedias de la barrera donde aumente la tensión antes de que se produzcan cambios en el contenido de agua de la arcilla.
- Trayectoria tipo 7: La trayectoria siguió las siguientes etapas: Aplicación de una carga inicial de 0.11 MPa y una succión de 128 MPa. Aumento de succión a 424 MPa. Disminución de la succión (por escalones de 224, 79, 38, 10.3, aproximadamente 1 MPa y saturación) y aumento simultáneo de carga, con cambios de volumen muy pequeños (Ensayo de presión de hinchamiento con succión controlada). Descarga por escalones. Esta trayectoria sigue la de un ensayo de presión de hinchamiento en una muestra en la que se ha inducido previamente un secado, puede producirse en zonas cercanas al calentador antes de aumentar la tensión por efecto del hinchamiento de la corona exterior.
- Trayectoria tipo 8: Esta trayectoria es una variante de la anterior. La trayectoria se inició con la aplicación de una carga inicial de 0.11 MPa y una succión de 128 MPa. Las etapas siguientes fueron: Aumento de la succión a 201 y 424 MPa. Disminución de succión hasta alcanzar un determinado valor de aumento de volumen (del orden del 6% desde el inicio) y, a partir de ese momento, se siguió una trayectoria tipo 3 (ensayo de presión de hinchamiento). Las succiones impuestas han sido 201, 128, 69, 38, 14, 3.7, aproximadamente 1 MPa y saturación.
- Trayectoria tipo 9: Es una variante de la trayectoria tipo 4 donde la deformación permitida se reduce al 3 %. La trayectoria se inició con la aplicación de una tensión vertical inicial de 0.16 MPa y una succión de 128 MPa. Las etapas siguientes fueron: Disminución de la succión (manteniendo la tensión vertical constante) hasta alcanzar un determinado valor de aumento de volumen (del orden del 3% desde el inicio) y, a partir de ese momento, se siguió una trayectoria tipo 3 (ensayo de presión de hinchamiento). Las succiones impuestas han sido de 70, 42, 10.3, 3.7, aproximadamente 1 MPa y saturación.
- Trayectoria tipo 10: Es una variante de la trayectoria tipo 8, donde en lugar de permitir un cambio de volumen del 6 %, la deformación de hinchamiento se limita al 3 %. La

trayectoria se inició con la aplicación de una carga inicial de 0.11 MPa y una succión de 122 MPa. Las etapas siguientes fueron: Aumento de la succión a 391 MPa. Disminución de succión hasta alcanzar un determinado valor de aumento de volumen (del orden del 3% desde el inicio), y a partir de ese momento, se siguió una trayectoria tipo 3 (ensayo de presión de hinchamiento). Las succiones impuestas han sido 131, 70, 42, 10.3, 3.7, aproximadamente 1 MPa y saturación.

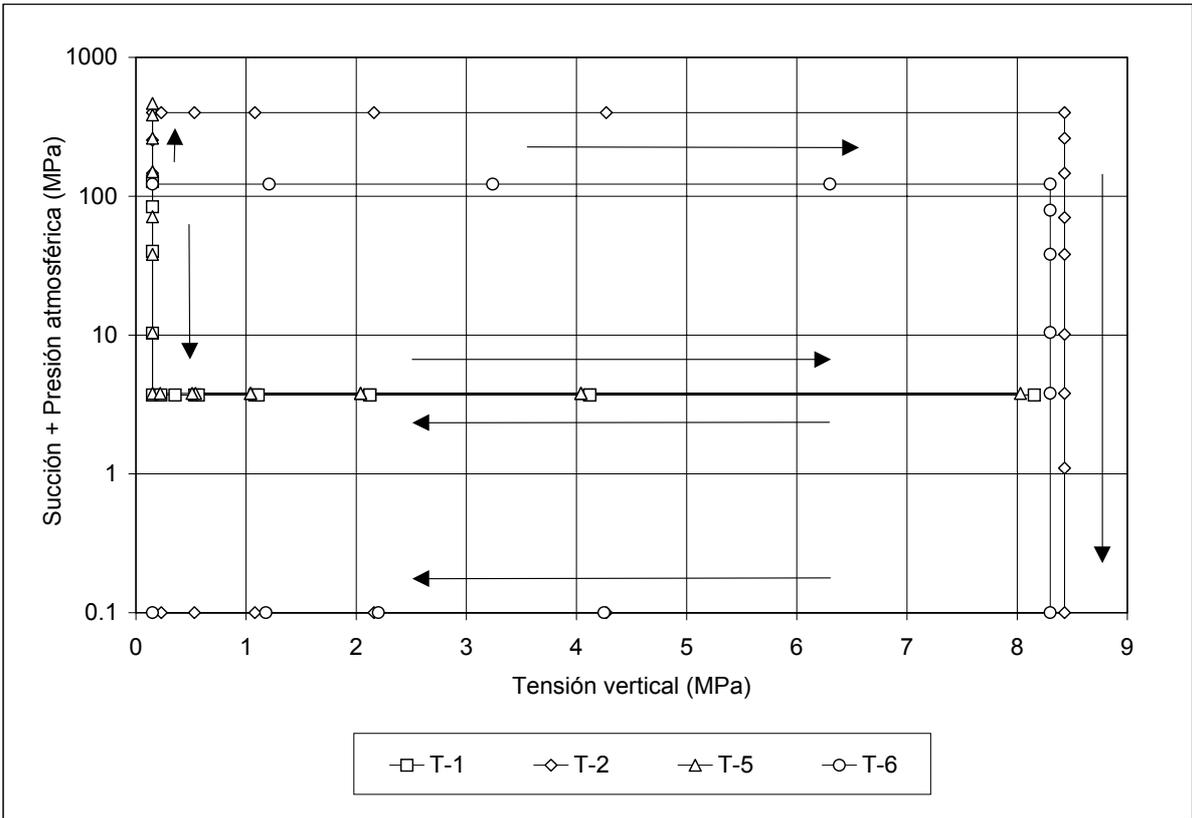


Figura 5.2.2.1 Relación tensión vertical – succión en las trayectorias 1, 2, 5 y 6

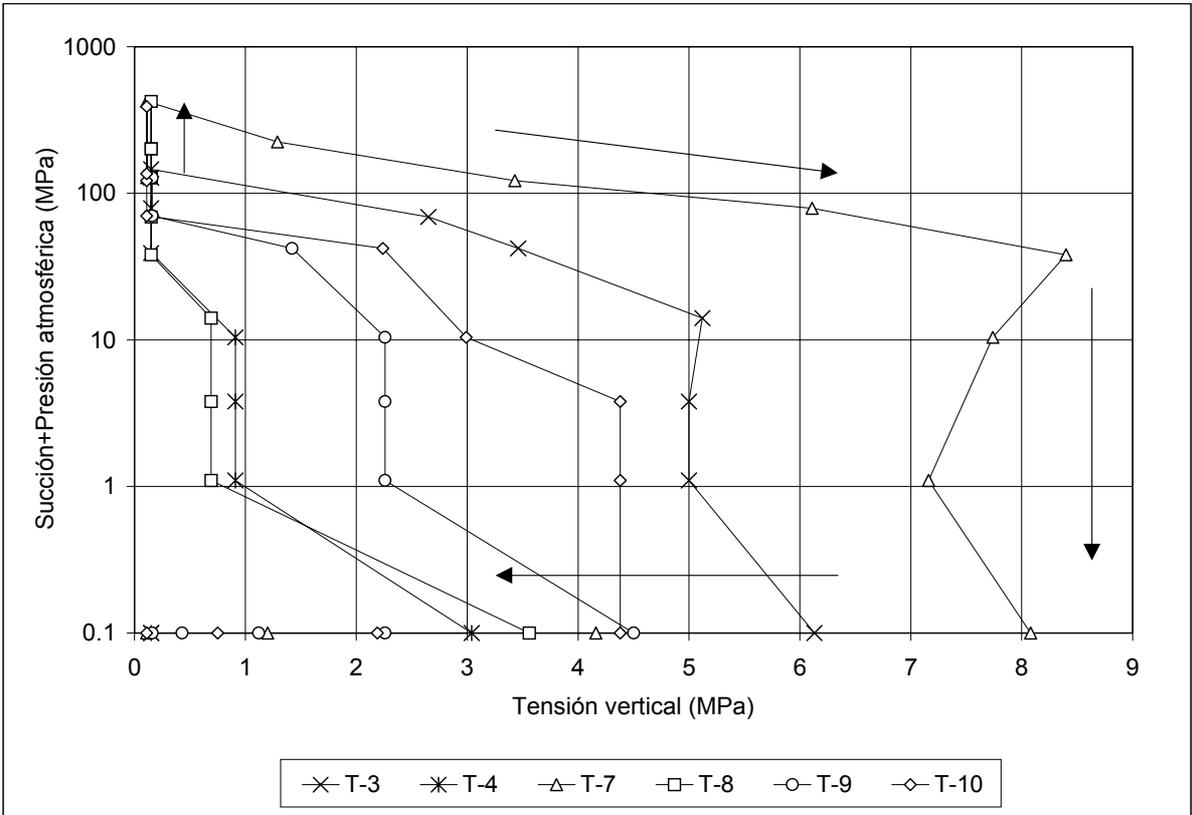


Figura 5.2.2.2 Relación tensión vertical – succión en las trayectorias 3, 4, 7, 8, 9 y 10

5.2.3 RESULTADOS OBTENIDOS

A continuación se muestran los resultados obtenidos con gráficos succión + presión atmosférica – índice de poros, tensión vertical neta – índice de poros y succión + presión atmosférica - tensión vertical. La presión atmosférica se añade al valor de la succión para poder incluir en los gráficos con escala logarítmica los resultados de ensayos con succión nula. Las líneas a trazos corresponden a cambios de succión y las líneas continuas corresponden a cambios de tensión vertical. La densidad seca y grado de saturación finales se calcularon a partir de las medidas tomadas a la muestra una vez fuera de la célula de ensayo. El grado de saturación se ha calculado considerando que la densidad del agua es de 1 g/cm^3 , dado que la densidad del agua en el interior de la arcilla puede ser mayor (Martin, 1962; Villar, 2000), este grado de saturación final ha resultado en muchos casos superior a la unidad.

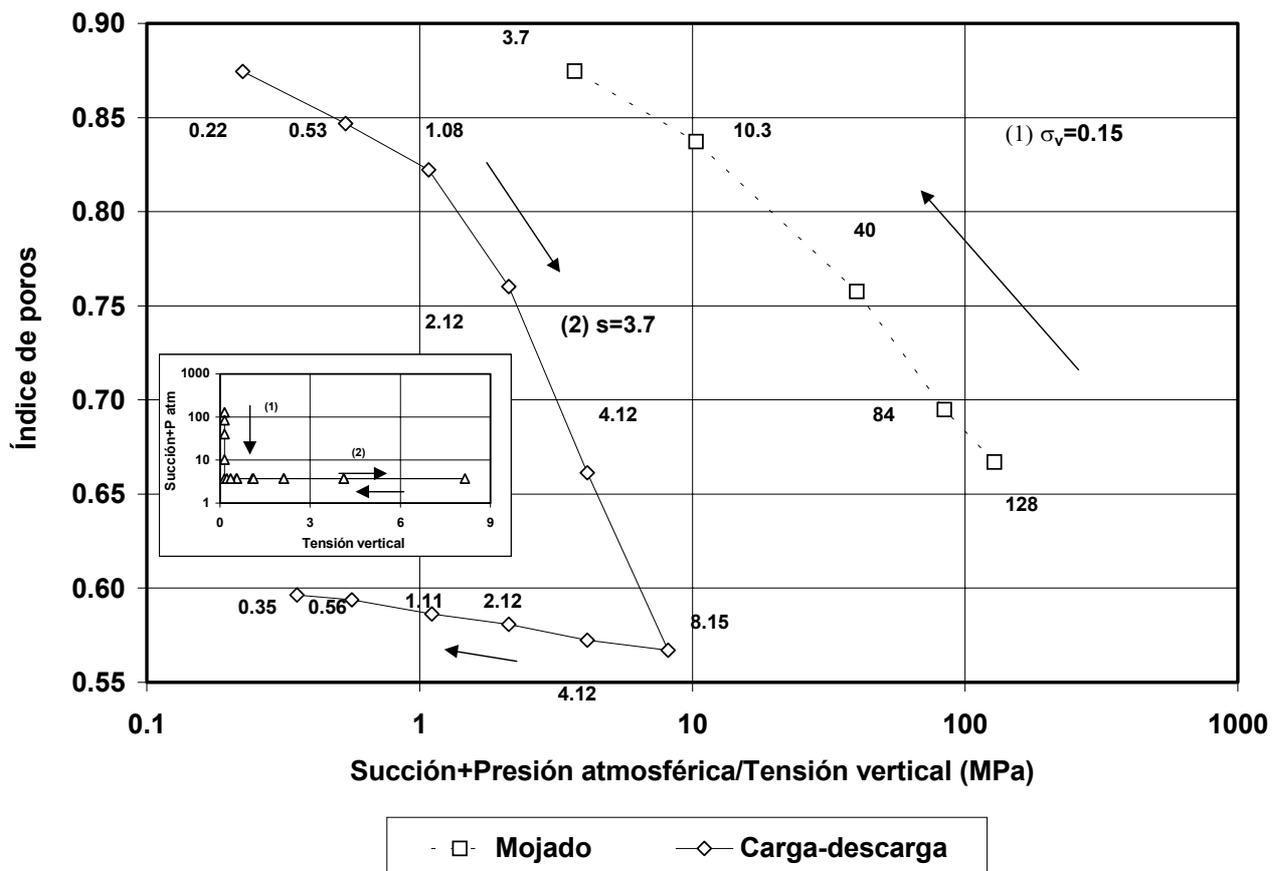


Figura 5.2.3.1 Resultados de los ensayos edométricos siguiendo la trayectoria 1. $\gamma_{di}=1.62 \text{ g/cm}^3$, $S_{ri}=57.5 \%$, $\gamma_{df}=1.55 \text{ g/cm}^3$ y $S_{rf}=60.2 \%$

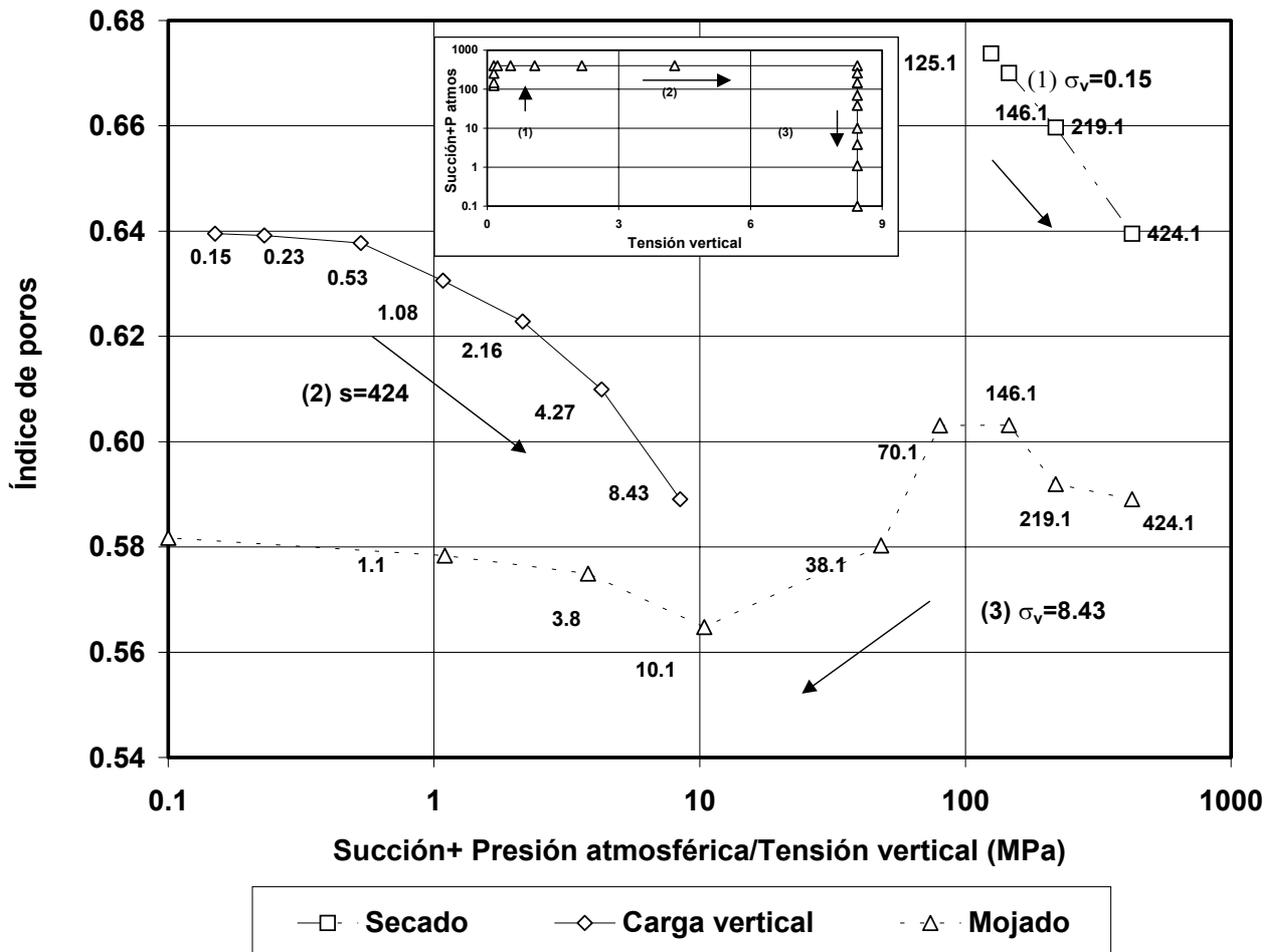


Figura 5.2.3.2 Resultados de los ensayos edométricos siguiendo la trayectoria 2. $\gamma_{di}=1.62$ g/cm^3 , $S_{ri}=56.7\%$, $\gamma_{df}=1.38$ g/cm^3 y $S_{rf}=96.7\%$

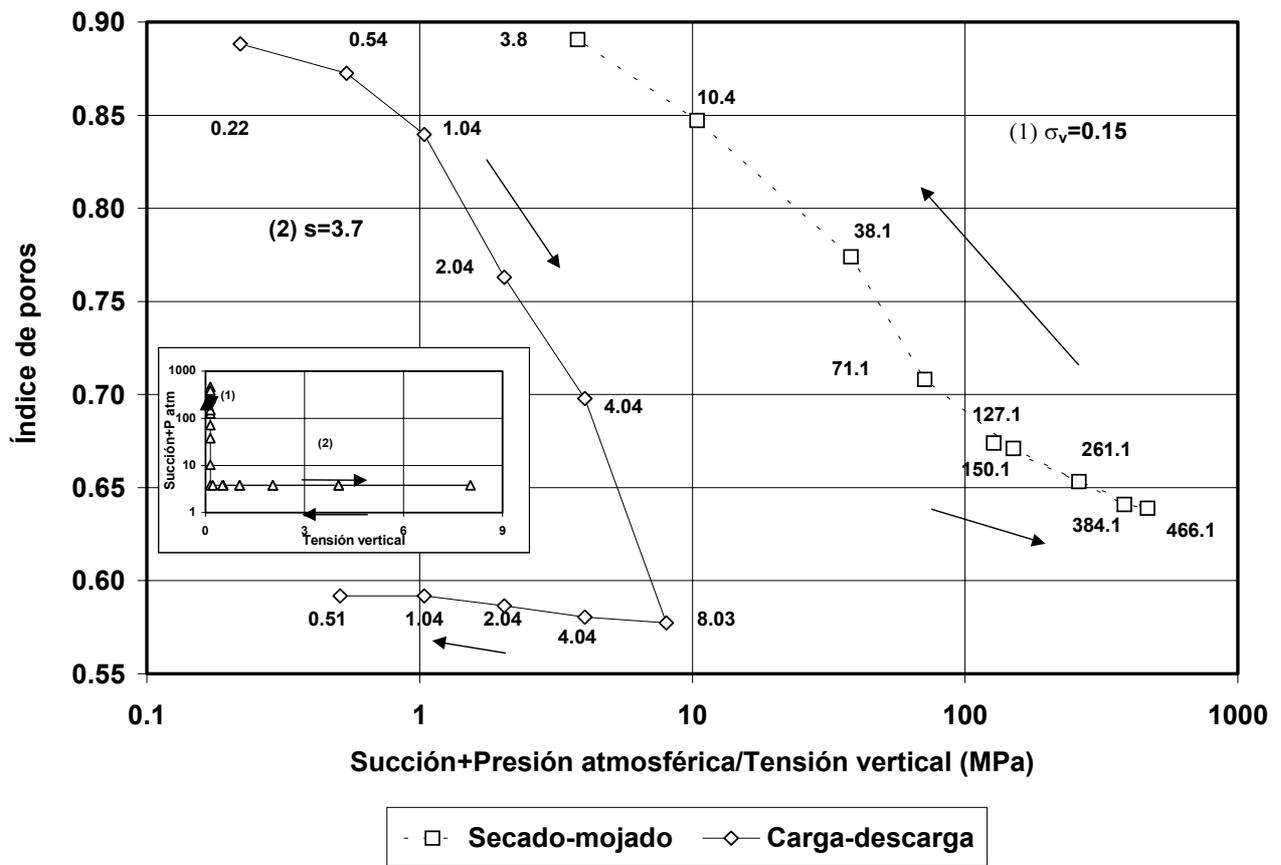


Figura 5.2.3.3 Resultados de los ensayos edométricos siguiendo la trayectoria 5. $\gamma_{di}=1.62$ g/cm^3 , $S_{ri}=56.7\%$, $\gamma_{df}=1.49$ g/cm^3 y $S_{ri}=61.0\%$

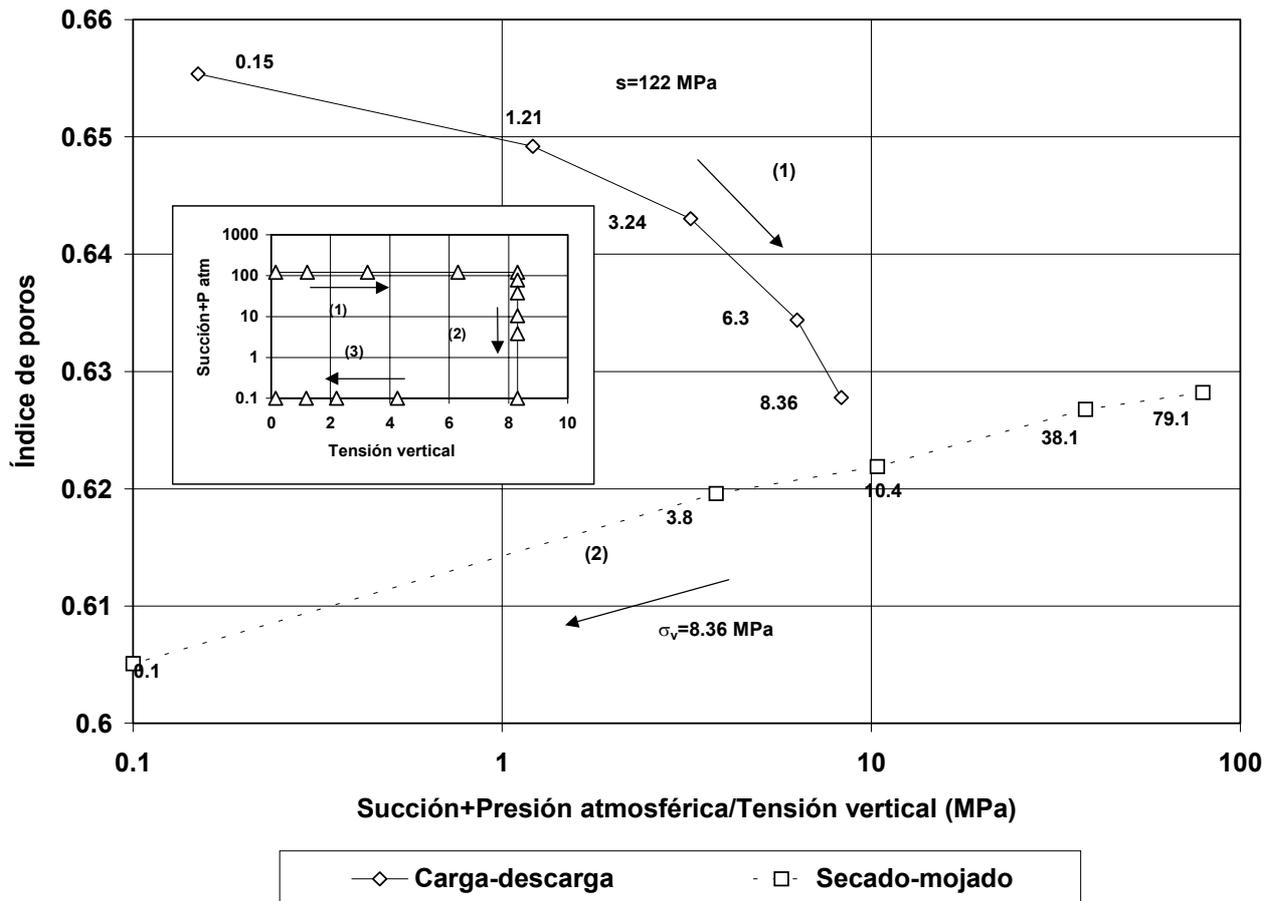


Figura 5.2.3.4 Resultados de los ensayos edométricos siguiendo la trayectoria 6. $\gamma_{di}=1.65 \text{ g/cm}^3$, $S_{ri}=51.8 \%$, $\gamma_{df}=1.31 \text{ g/cm}^3$ y $S_{rf}=99.6 \%$

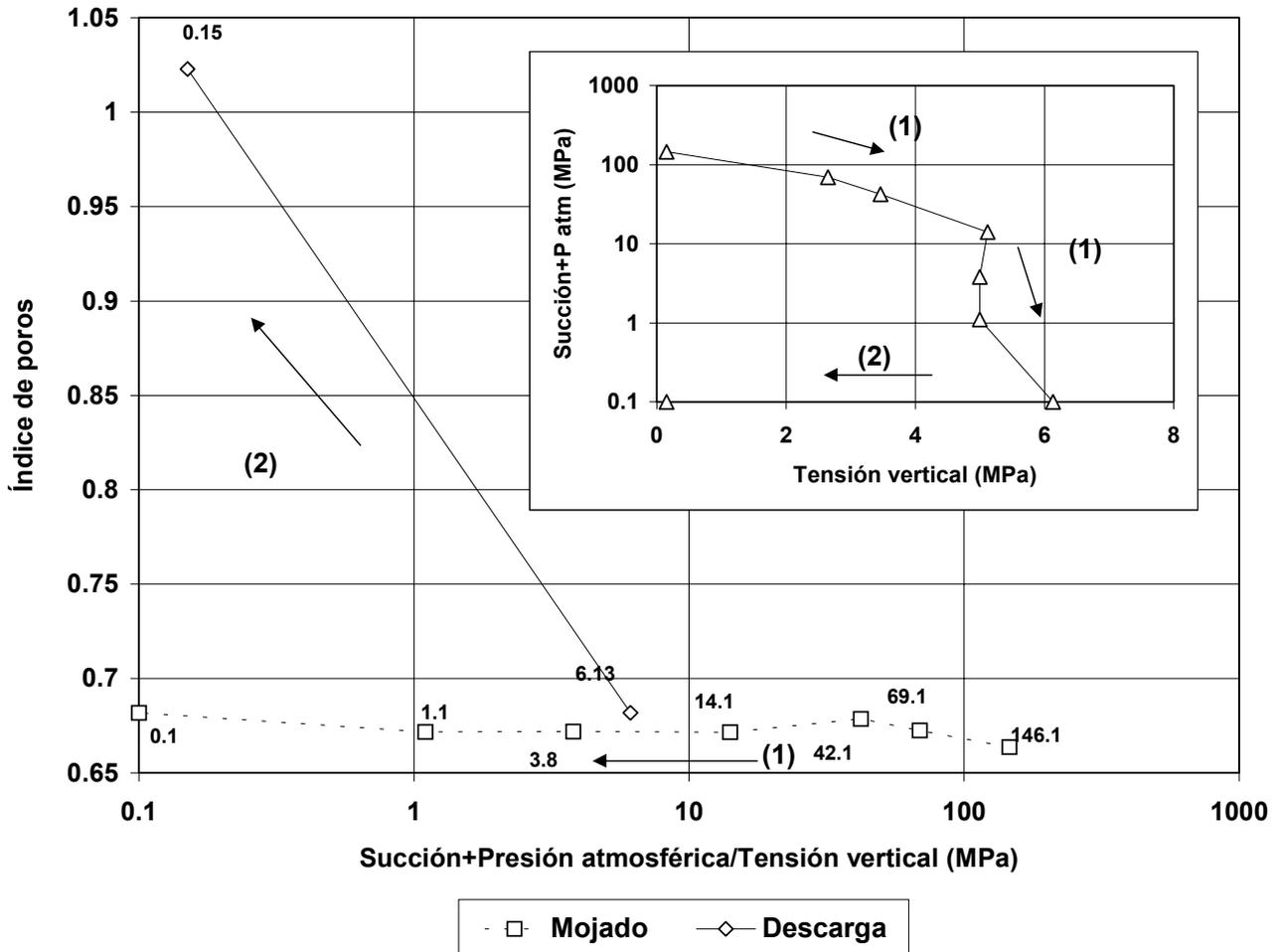


Figura 5.2.3.5 Resultados de los ensayos edométricos siguiendo la trayectoria 3. $\gamma_{di}=1.63$ g/cm³, $S_{ri}=53.5\%$, $\gamma_{df}=1.31$ g/cm³ y $S_{rf}=104.0\%$

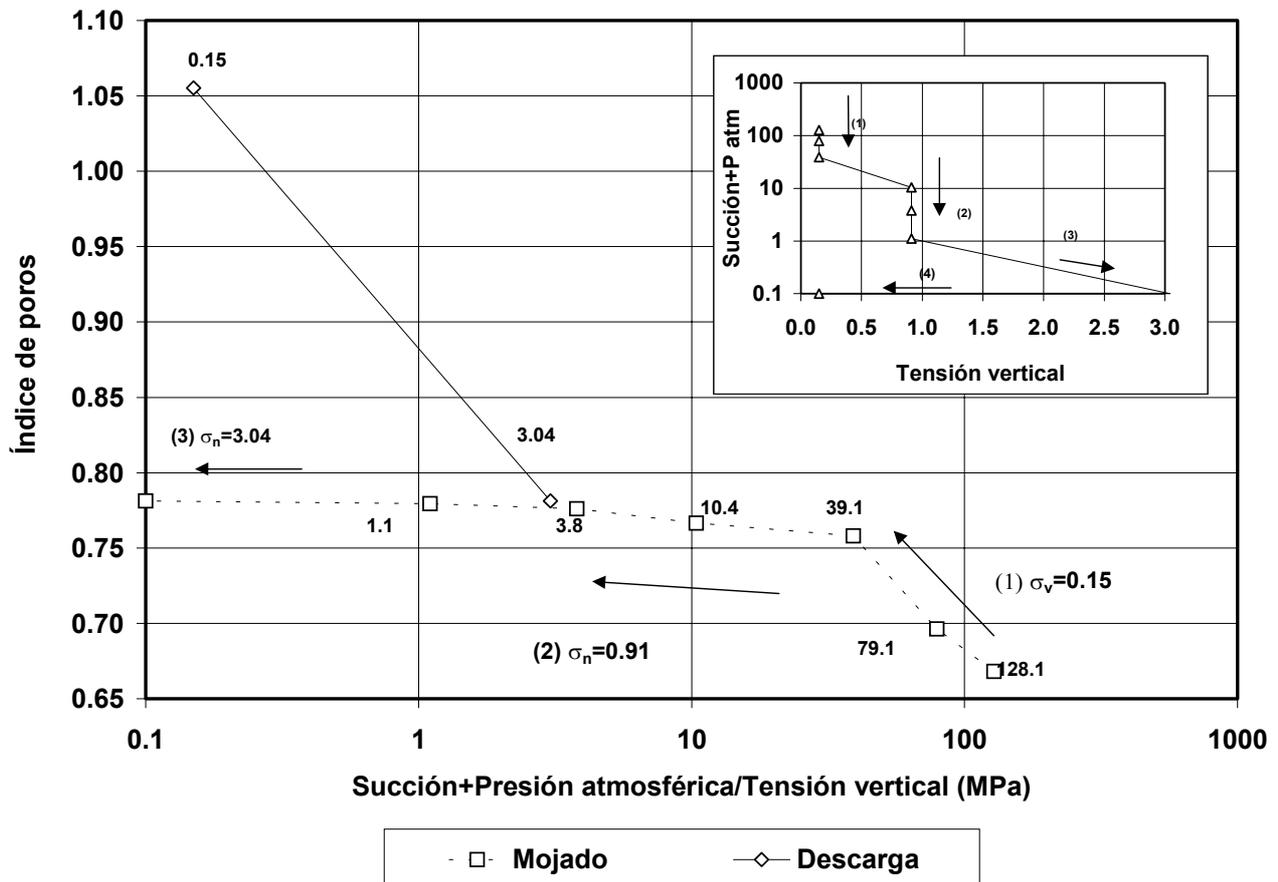


Figura 5.2.3.6 Resultados de los ensayos edométricos siguiendo la trayectoria 4. $\gamma_{di}=1.63$ g/cm^3 , $S_{ri}=57.6\%$, $\gamma_{df}=1.31$ g/cm^3 y $S_{ri}=104.0\%$

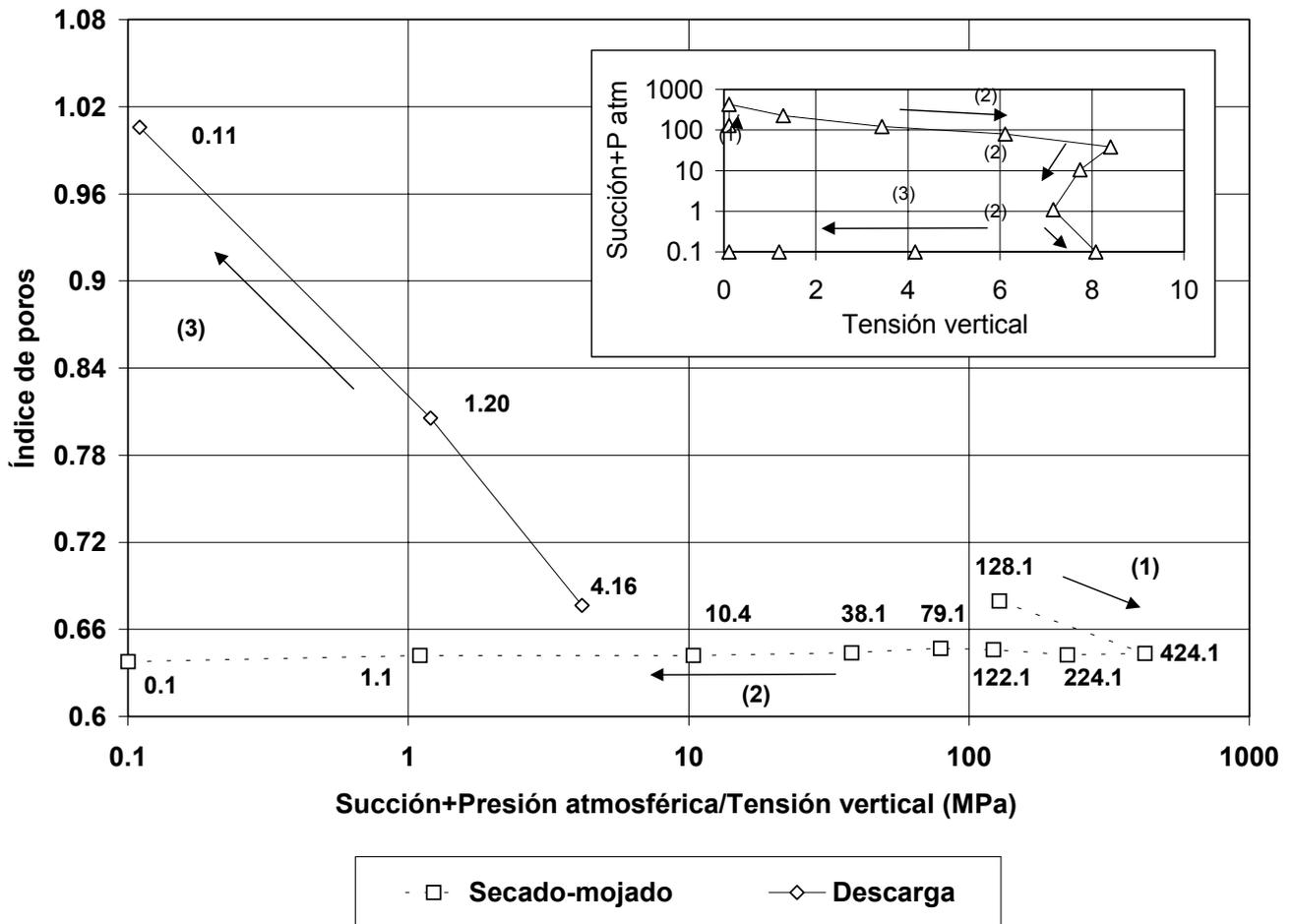


Figura 5.2.3.7 Resultados de los ensayos edométricos siguiendo la trayectoria 7. $\gamma_{di}=1.62$ g/cm^3 , $S_{ri}=58.6\%$, $\gamma_{df}=1.30$ g/cm^3 y $S_{rf}=101.2\%$

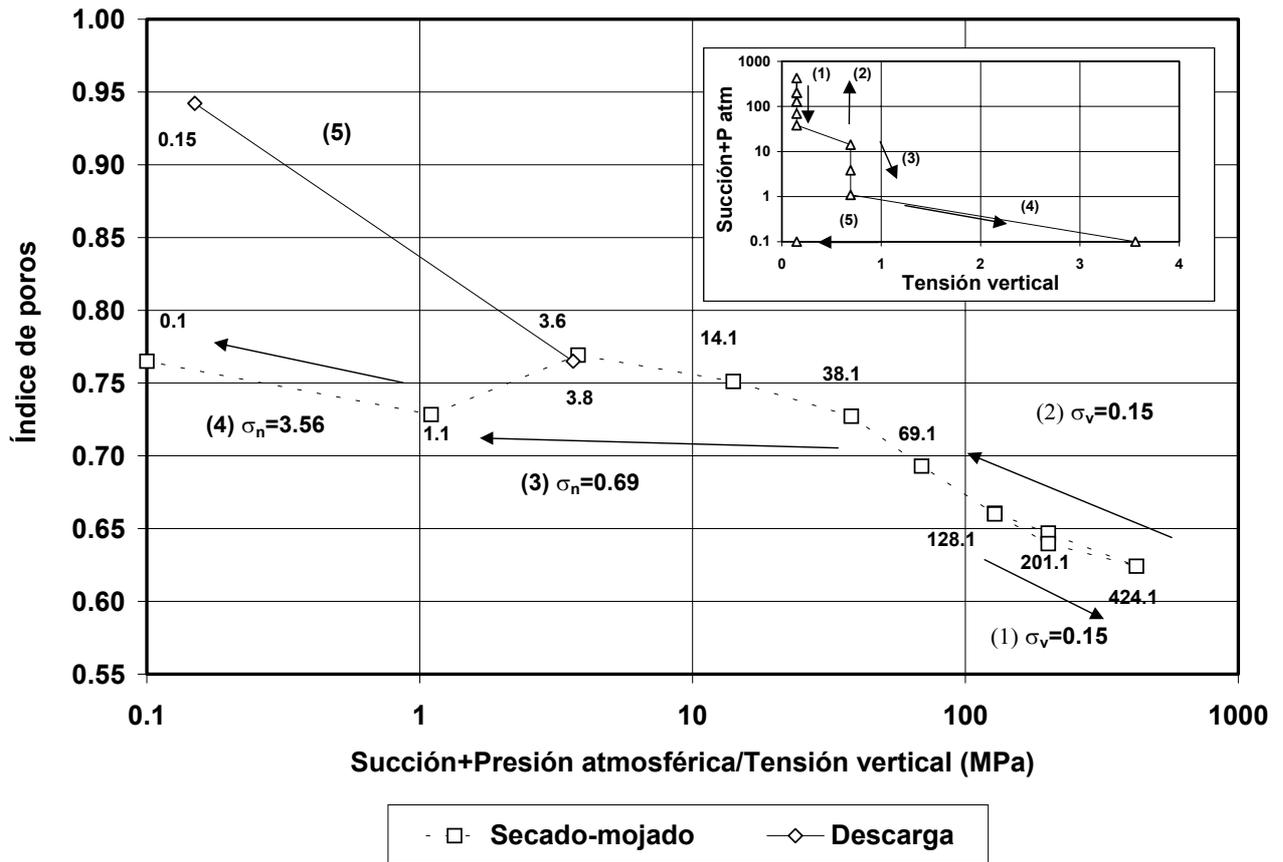


Figura 5.2.3.8 Resultados de los ensayos edométricos siguiendo la trayectoria 8. $\gamma_{df}=1.64$ g/cm^3 , $S_{ri}=52.5\%$, $\gamma_{df}=1.28$ g/cm^3 y $S_{ri}=103.0\%$

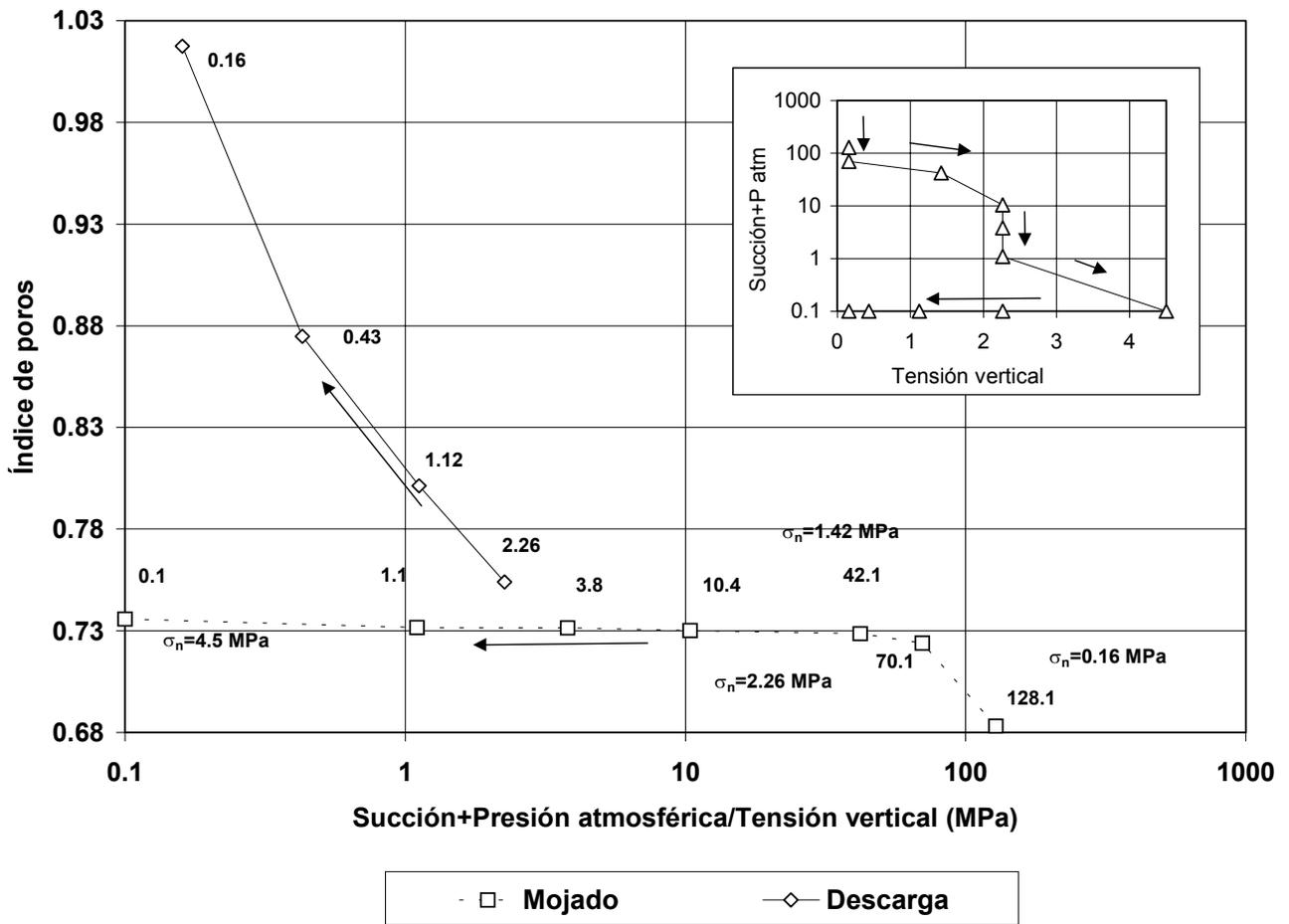


Figura 5.2.3.9 Resultados de los ensayos edométricos siguiendo la trayectoria 9. $\gamma_{di}=1.62 \text{ g/cm}^3$, $S_{ri}=58.6 \%$, $\gamma_{di}=1.35 \text{ g/cm}^3$ y $S_{ri}=106.5 \%$

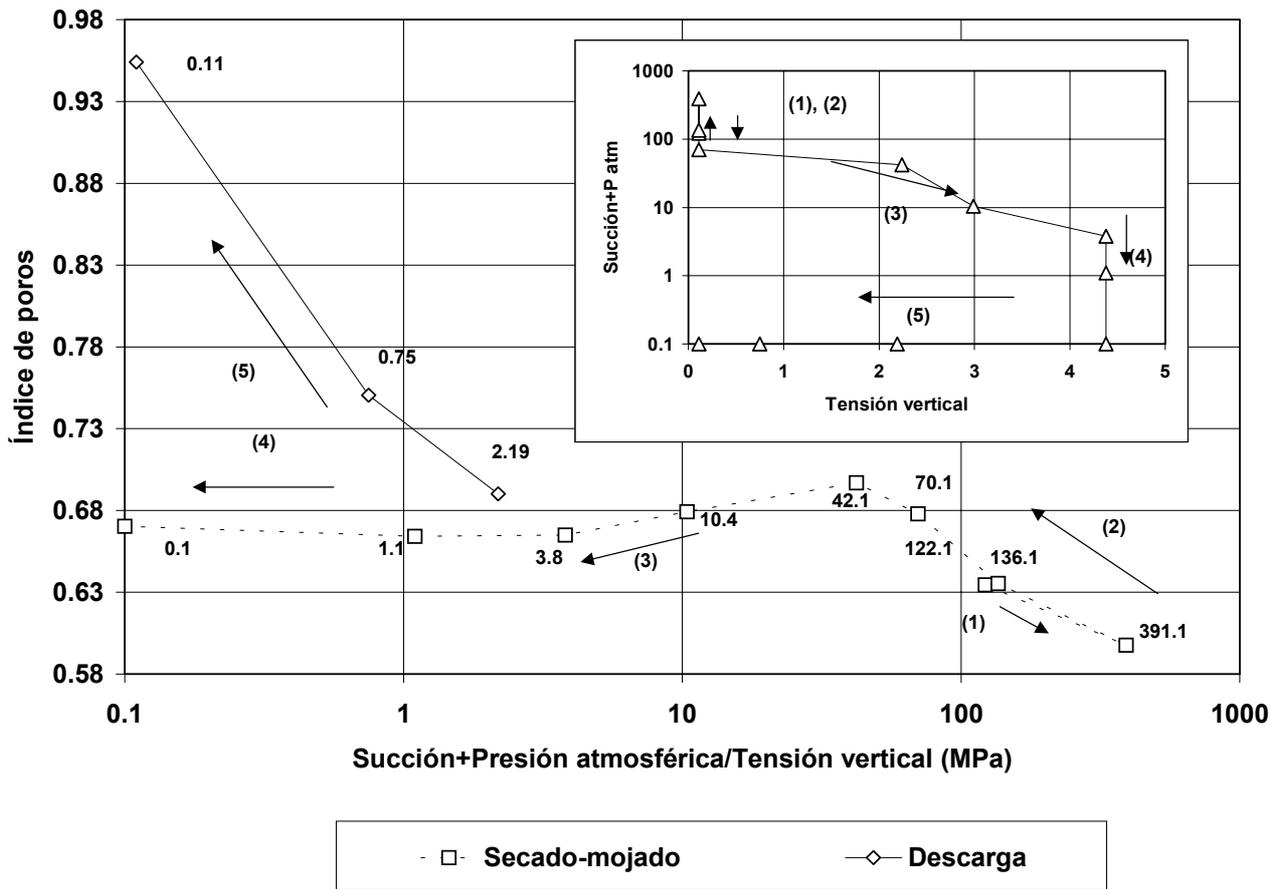


Figura 5.2.3.10 Resultados de los ensayos edométricos siguiendo la trayectoria 10. $\gamma_{di}=1.66 \text{ g/cm}^3$, $S_{ri}=48.9 \%$

De los resultados de los ensayos que siguen la trayectoria 1 y 5, se deduce una presión de preconsolidación en condiciones edométricas (P_0) de 1.5 MPa aproximadamente, cuando la succión es de 3.6 MPa. Cuando la succión es mayor, la presión de preconsolidación aumenta y dado que la carga máxima utilizada es sólo de 8 MPa, no se ha podido medir.

En las figuras siguientes se muestra la evolución temporal de las deformaciones verticales en los ensayos realizados. La curva de las deformaciones en función del tiempo durante la descarga en saturación de la muestra no se reproduce al ser dichas deformaciones un orden de magnitud superior al resto y, si se dibujaran en los gráficos, no se apreciarían las curvas deformación - tiempo del resto de la trayectoria. Los gráficos tensión vertical - tiempo proceden de ensayos con control de deformación volumétrica realizados con célula de carga. Los saltos en la tensión vertical en estos ensayos se deben a la corrección del cambio de volumen que hay que hacer a causa de la deformación de la propia célula de carga. Esta

corrección se hace apretando la célula contra la palanca edométrica hasta que la muestra recupera el cambio de volumen impuesto en el ensayo.

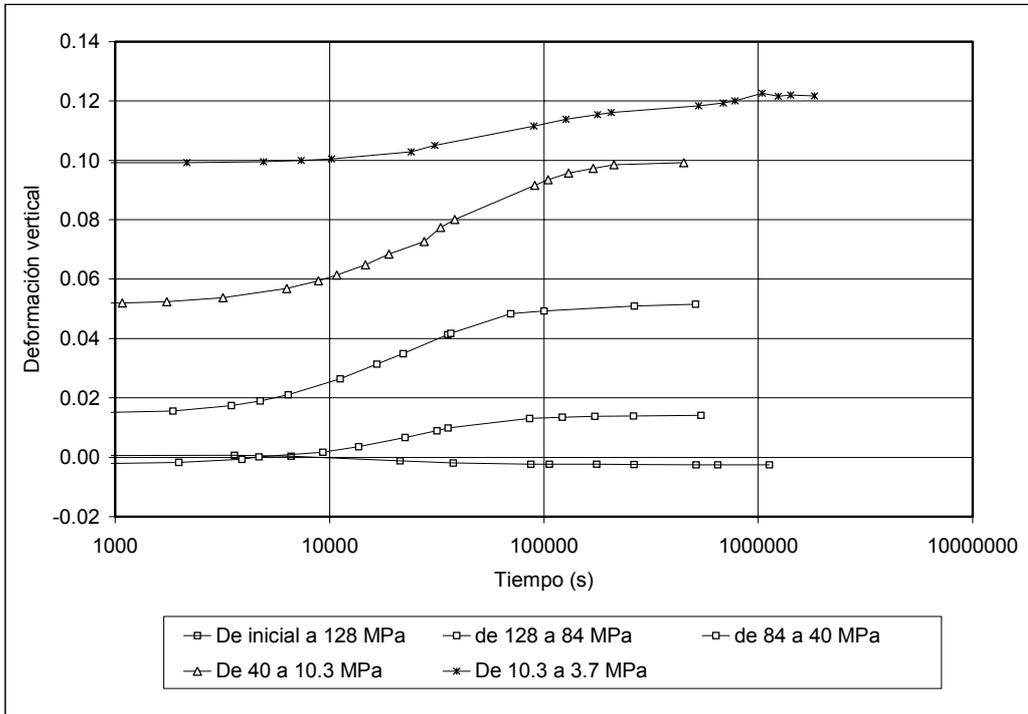


Figura 5.2.3.11 Evolución de los cambios de volumen durante el ensayo edométrico con la trayectoria 1

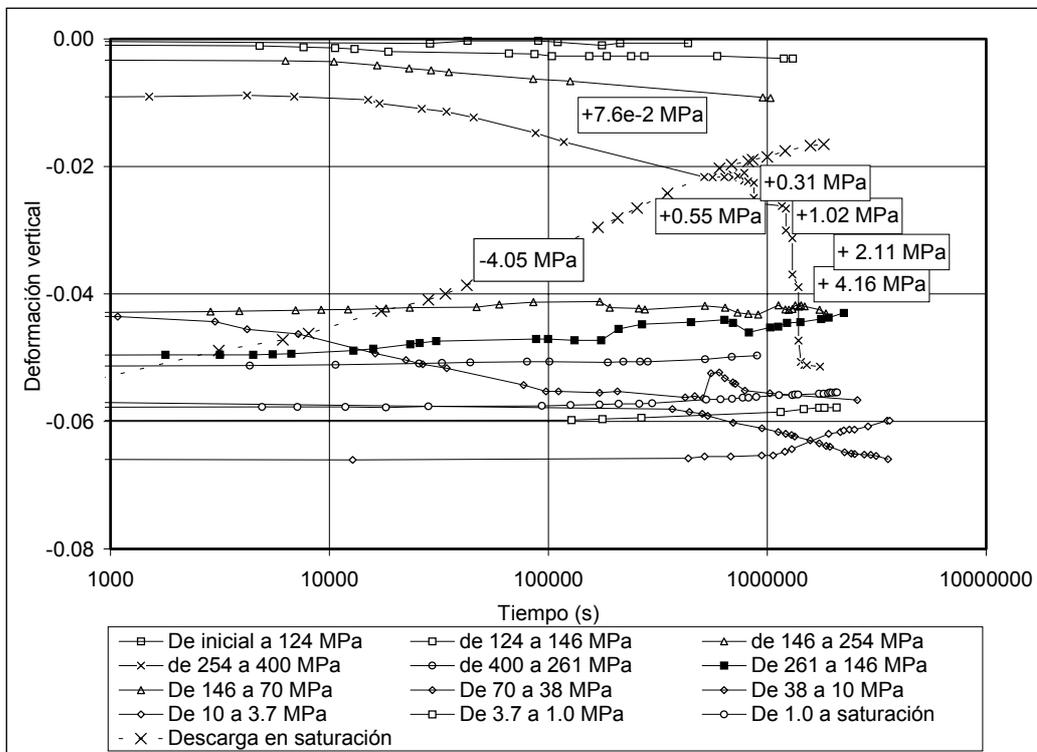


Figura 5.2.3.12 Evolución de los cambios de volumen durante el ensayo edométrico con la trayectoria 2

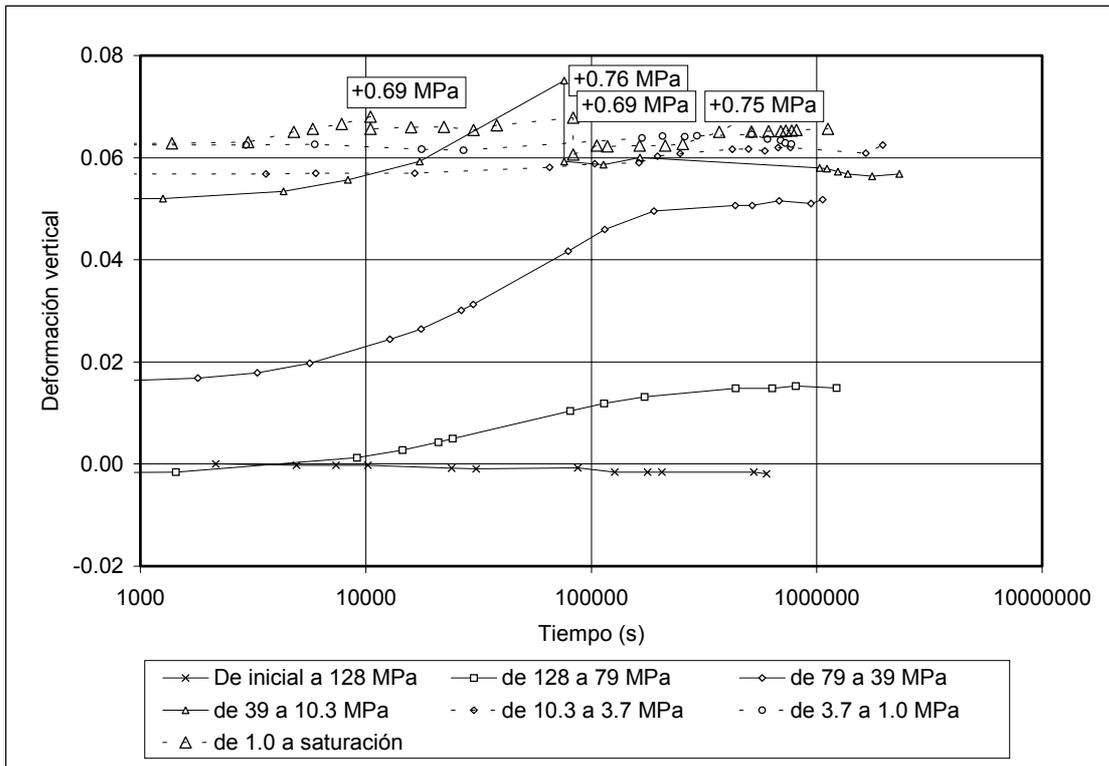


Figura 5.2.3.13 Evolución de los cambios de volumen durante el ensayo edométrico con la trayectoria 4

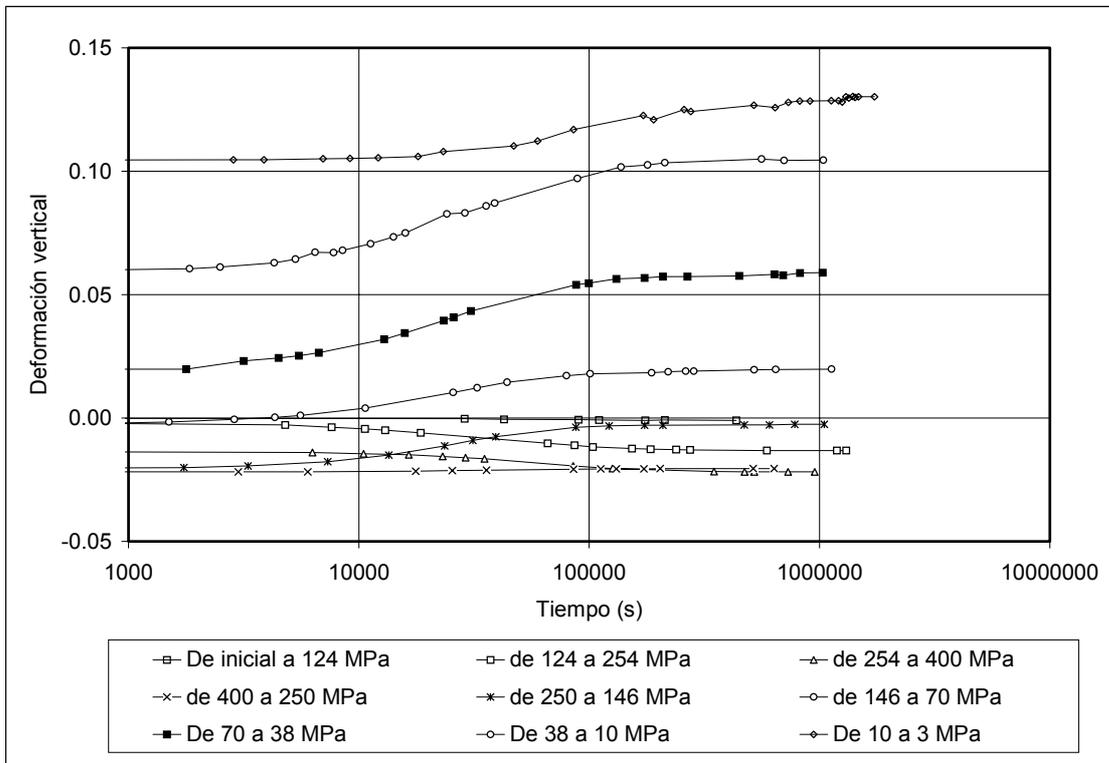


Figura 5.2.3.14 Evolución de los cambios de volumen durante el ensayo edométrico con la trayectoria 5

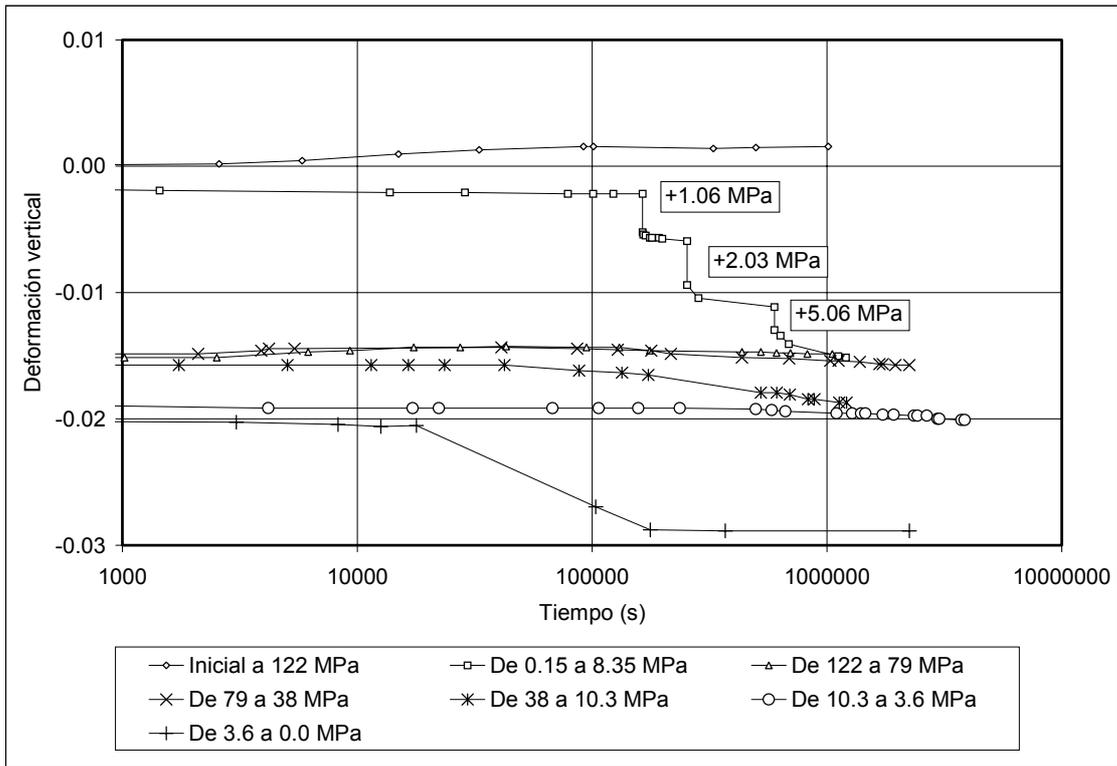


Figura 5.2.3.15 Evolución de los cambios de volumen durante el ensayo edométrico con la trayectoria 6

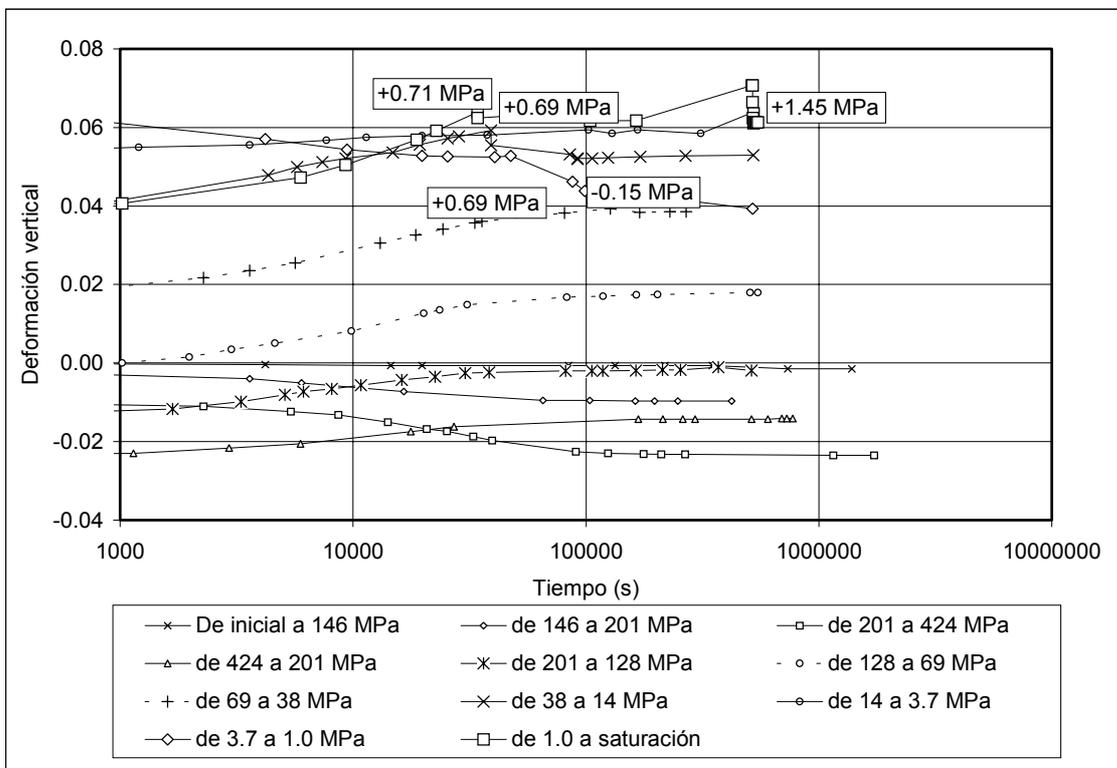


Figura 5.2.3.16 Evolución de los cambios de volumen durante el ensayo edométrico con la trayectoria 8

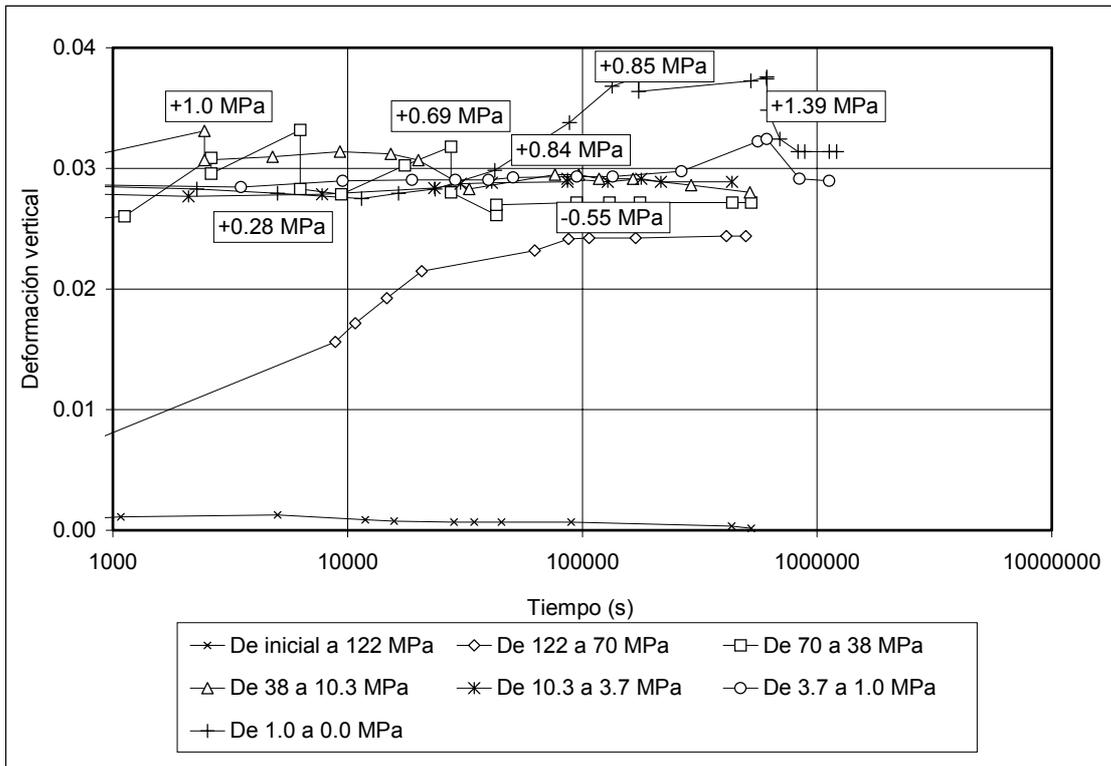


Figura 5.2.3.17 Evolución de los cambios de volumen durante el ensayo edométrico con la trayectoria 9

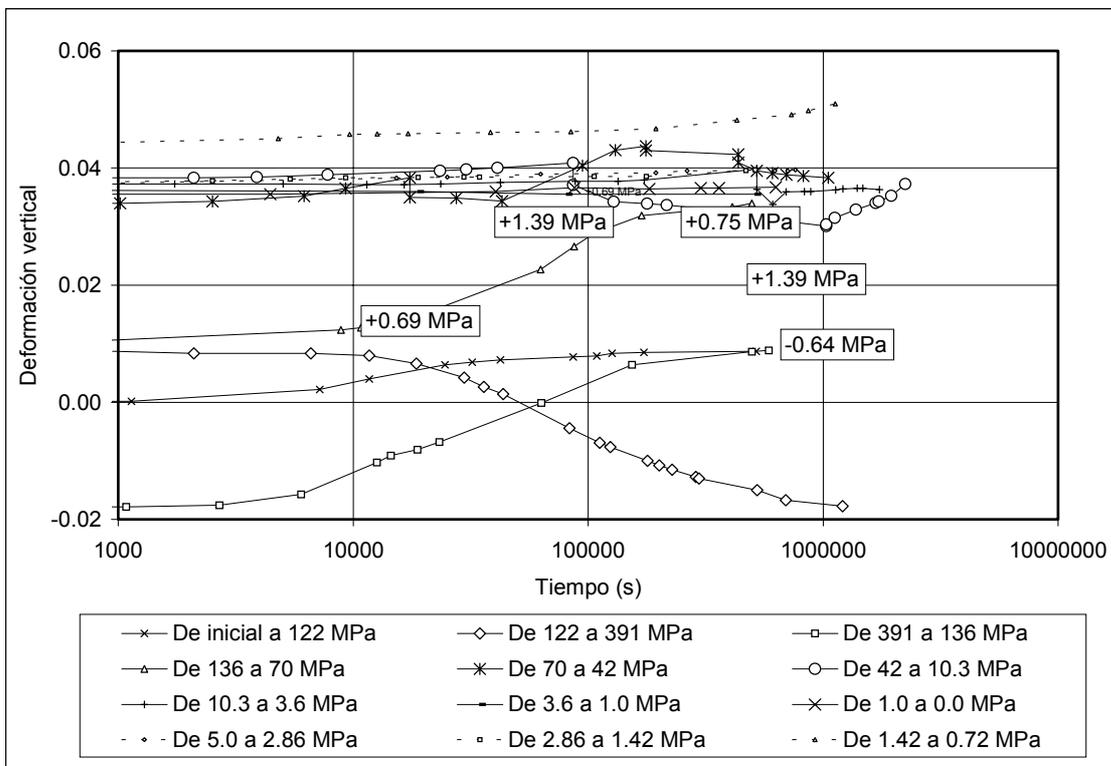


Figura 5.2.3.18 Evolución de los cambios de volumen durante el ensayo edométrico con la trayectoria 10

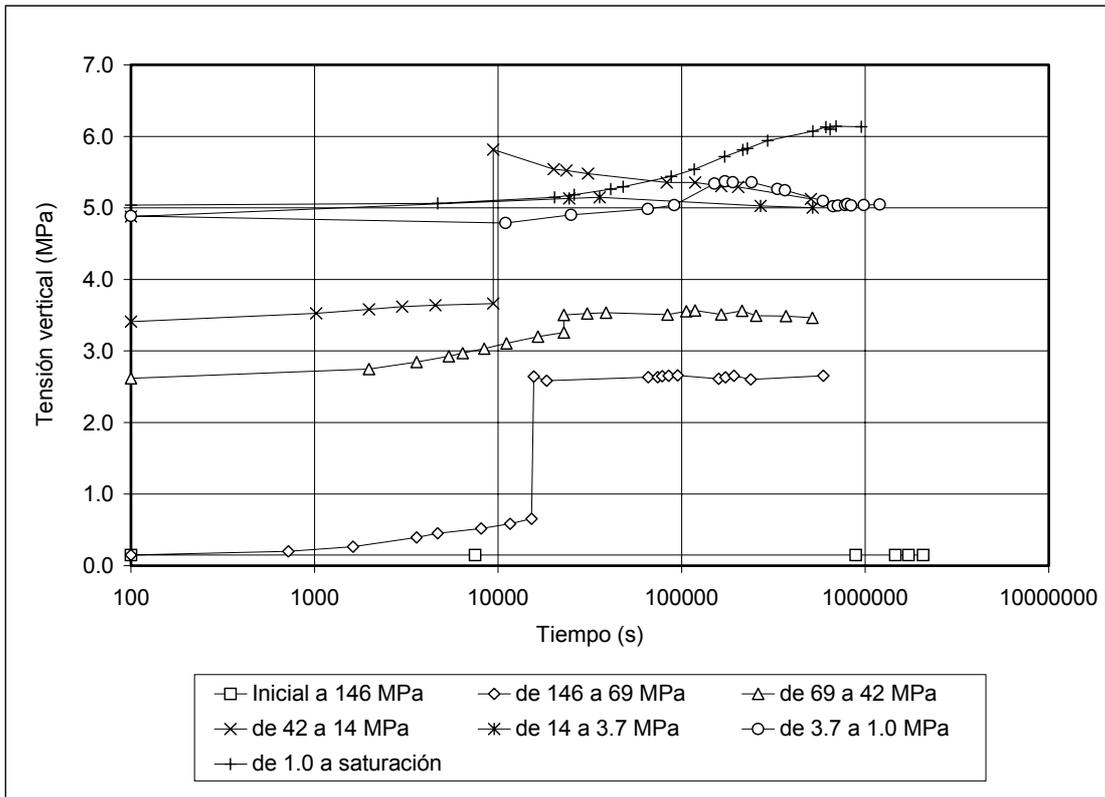


Figura 5.2.3.19 Evolución de los cambios de volumen durante el ensayo edométrico con la trayectoria 3

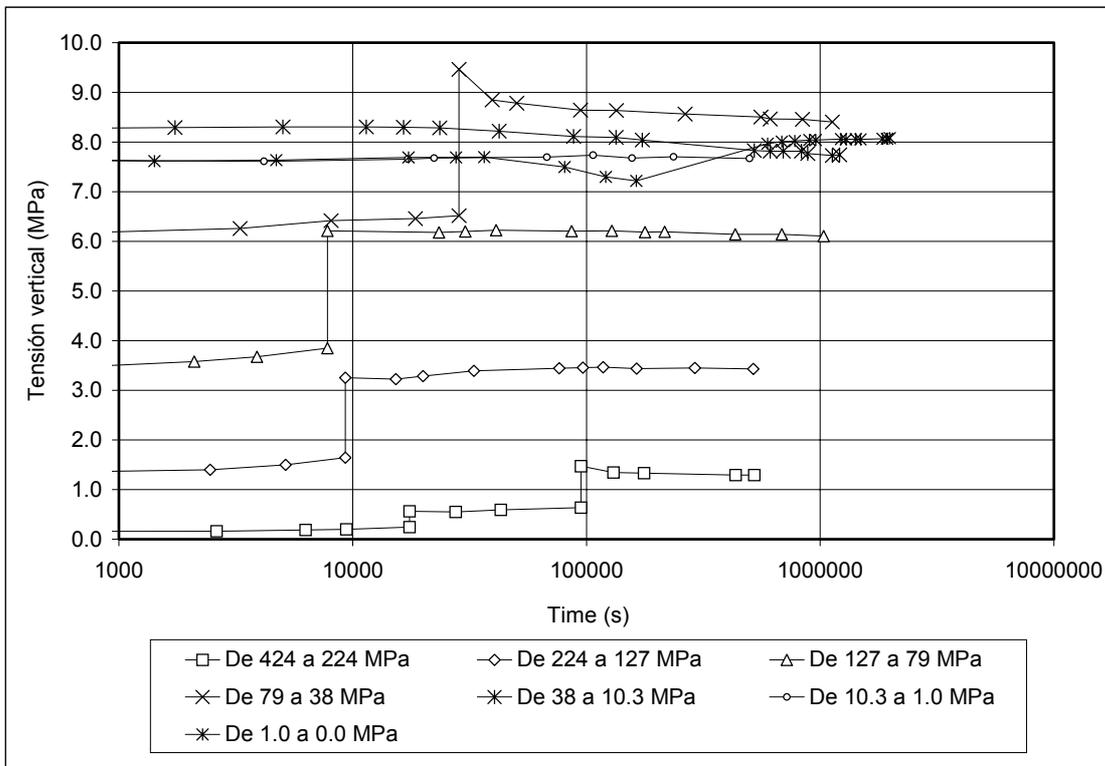


Figura 5.2.3.20 Evolución de los cambios de volumen durante el ensayo edométrico con la trayectoria 7

En la figura 5.2.3.21, puede compararse la diferencia en el valor de tensión vertical cuando se coharten las deformaciones en diferentes valores. Se permite una deformación de hinchamiento del 1 % en la trayectoria 3, de un 3 % en la trayectoria 9 y de un 6 % en la trayectoria 4 cuando la muestra disminuye la succión. La tensión vertical se mantiene constante en las trayectorias 4 y 9 debido a que se impiden las deformaciones al cargar el edómetro con pesas, mientras que en la trayectoria 3, este control de deformaciones se realiza apretando la muestra con la célula de carga de la bancada, lo que permite que los escalones de carga sean casi continuos. Un efecto interesante es que mientras en las trayectorias 4 y 9 la tensión aumenta continuamente, en la trayectoria 3 existe una tendencia a colapsar tras alcanzar un máximo. La tensión disminuye hasta llegar a un mínimo tras el cual, aumenta hasta llegar a saturación.

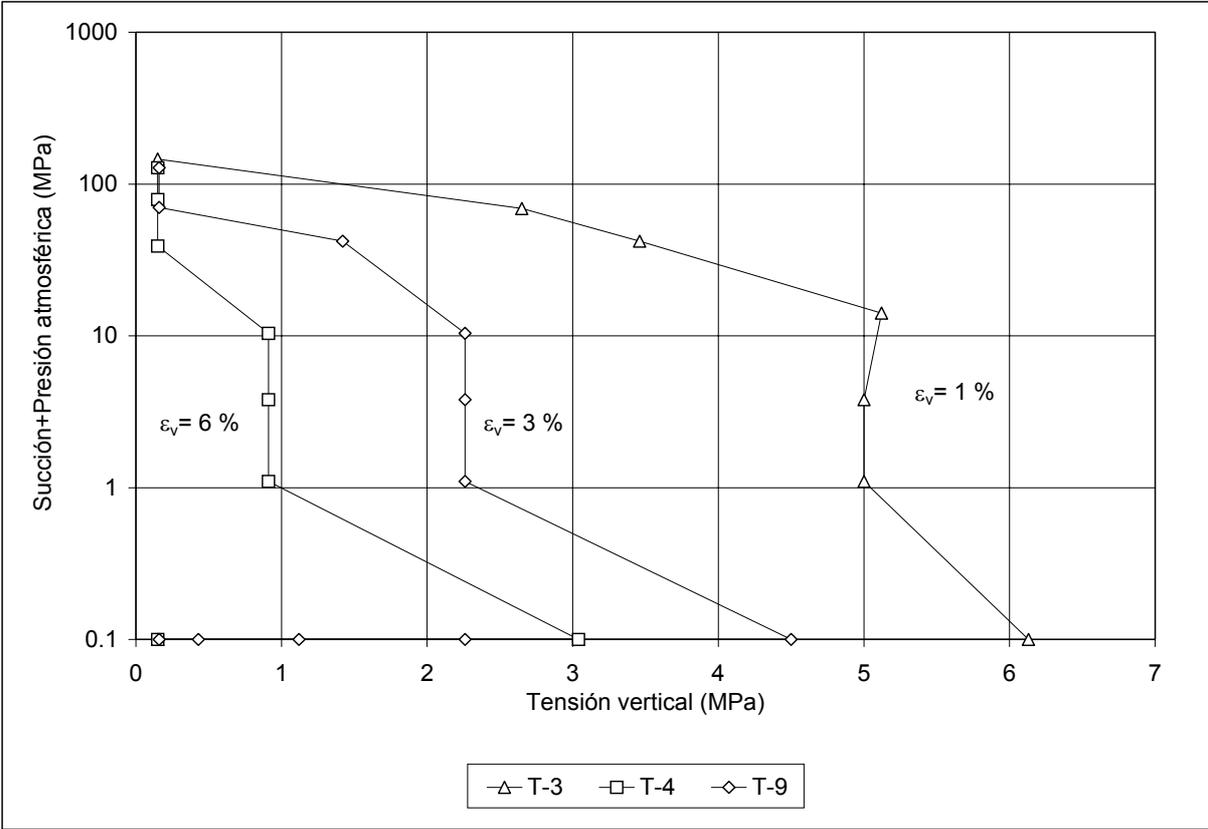


Figura 5.2.3.21 Relación entre la tensión vertical y la succión para las trayectorias 3, 4 y 9.

En la figura 5.2.3.22, se presentan las trayectorias análogas a las anteriores con la diferencia de que en este caso, la muestra se seca hasta 420 MPa y se fija la deformación a partir de ese estado.

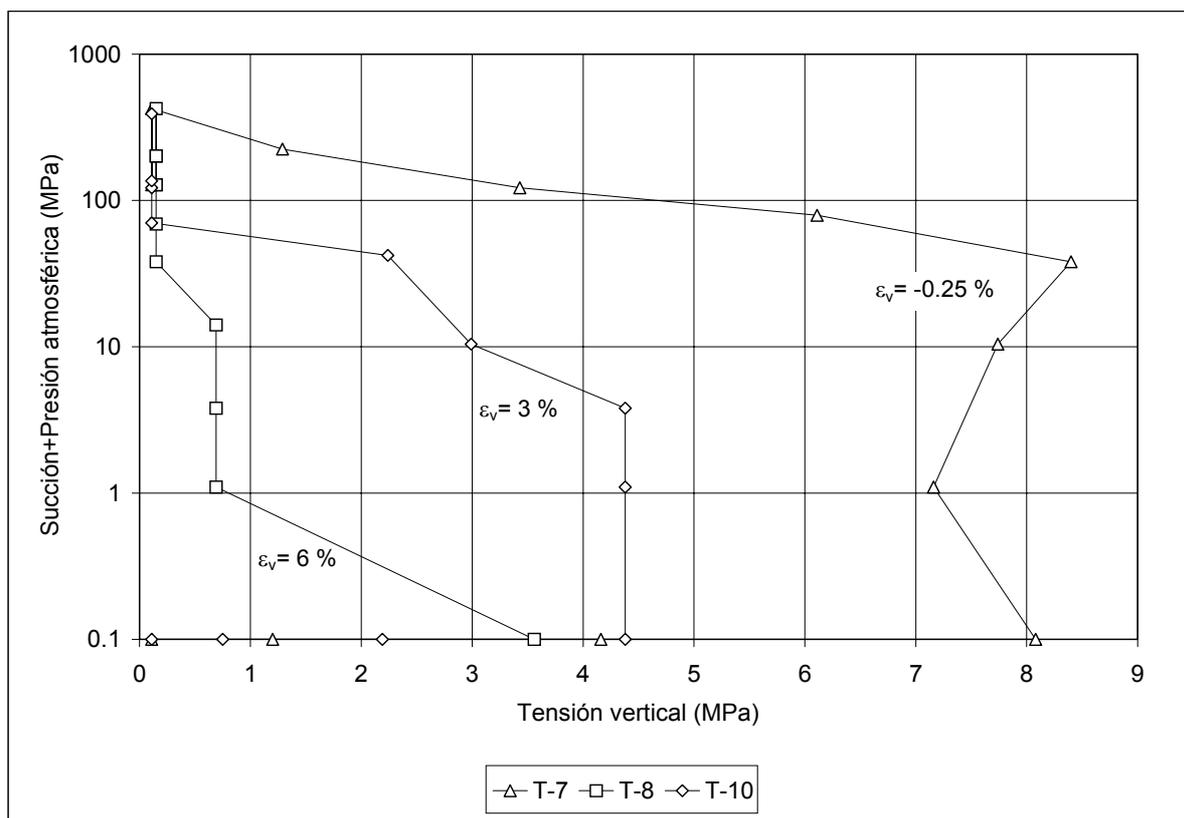


Figura 5.2.3.22 Relación entre la tensión vertical y la succión para las trayectorias 7, 8 y 10.

En la figura 5.2.3.23 se comparan las trayectorias 3 y 7. Puede observarse que en el caso de aumentar la succión y posteriormente fijar la deformación (trayectoria 7), la muestra alcanza una presión de hinchamiento mayor y que el mínimo que se alcanza tras alcanzar el primer máximo es más acusado. Hay que tener en cuenta que tras el secado se produce la retracción del material y un aumento de la densidad seca, por tanto, las densidades secas finales en las dos trayectorias son distintas. La presión de hinchamiento en saturación es menor que a 38 MPa de succión. Sin embargo, el hecho de que una muestra haya experimentado un hinchamiento del 1 % y la otra una compresión del 0.25 % puede afectar a las medidas ya que la presión de hinchamiento es muy dependiente de la deformación que se permite al suelo.

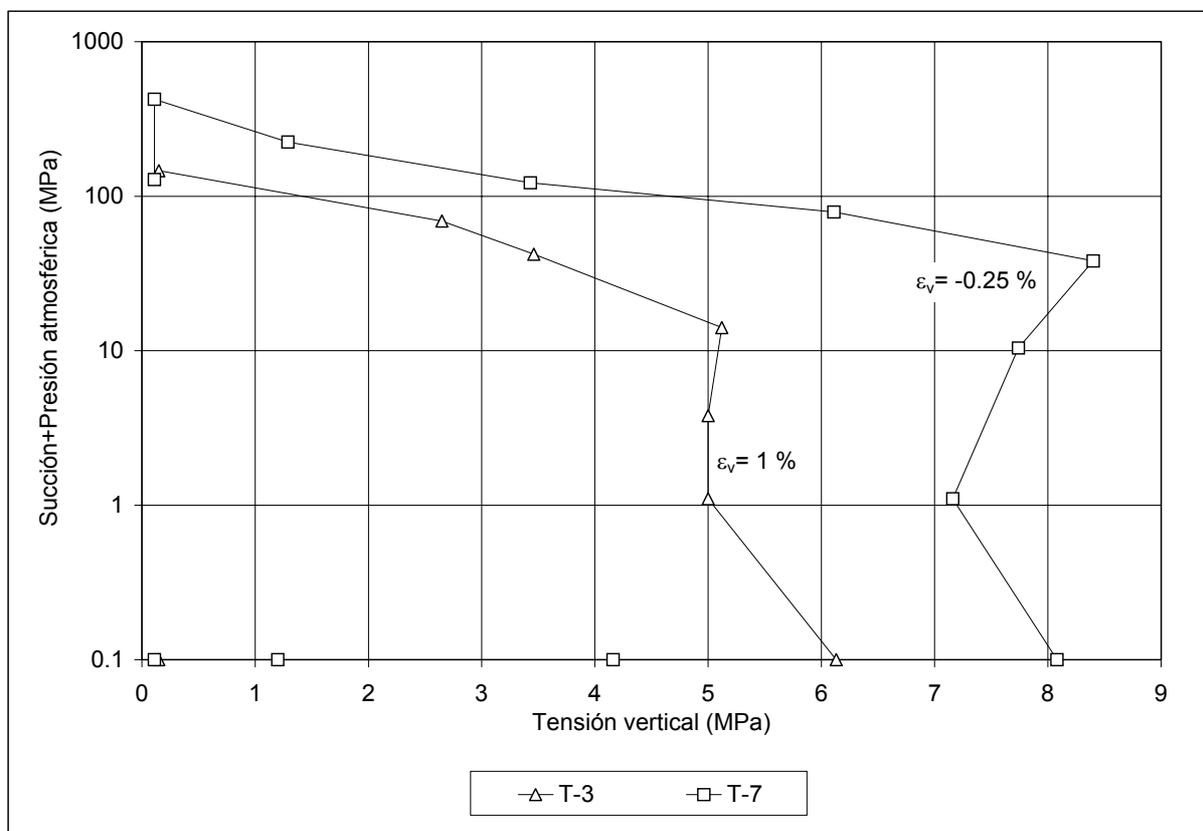


Figura 5.2.3.23 Relación entre la tensión vertical y la succión para las trayectorias 3 y 7

En la figura 5.2.3.24 puede apreciarse la variación de tensión vertical en ensayos con pequeña deformación cuando se sigue una trayectoria de mojado (trayectoria 3) y otra de mojado tras secado (trayectoria 7). La tensión vertical aumenta cuando la muestra se seca al principio, comportamiento esperado al empezar la trayectoria de mojado en un índice de poros menor. También se observa en ambos casos una reducción de la tensión vertical y un posterior aumento cuando la muestra se satura durante el proceso de mojado.

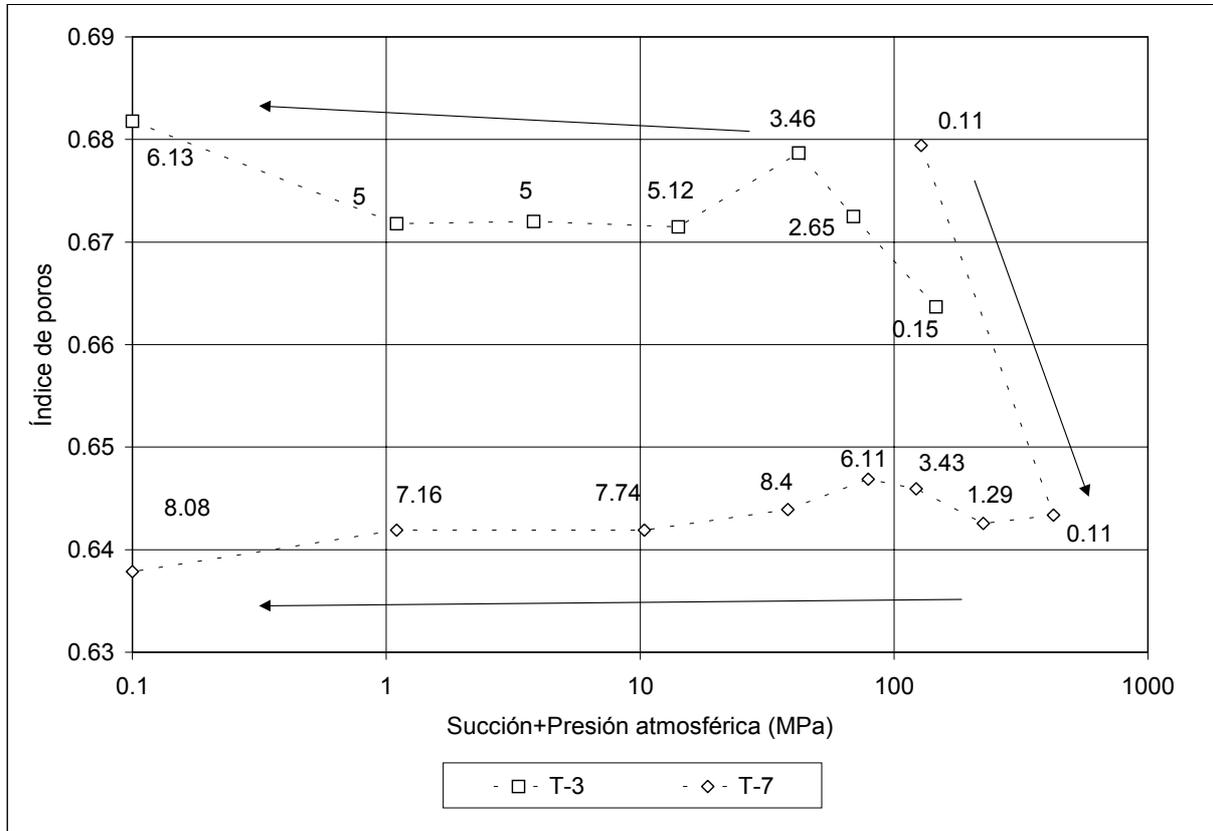


Figura 5.2.3.24 Trayectorias 3 y 7. Succión en función del índice de poros. Junto a cada punto se escribe la tensión vertical.

En la figura 5.2.3.25 se comparan las trayectorias 4 y 8. Se pone de relieve la independencia del ciclo de secado-mojado inicial en el comportamiento del suelo. En este caso, hay que señalar que se ha permitido expandir a las dos muestras hasta llegar a la misma densidad seca.

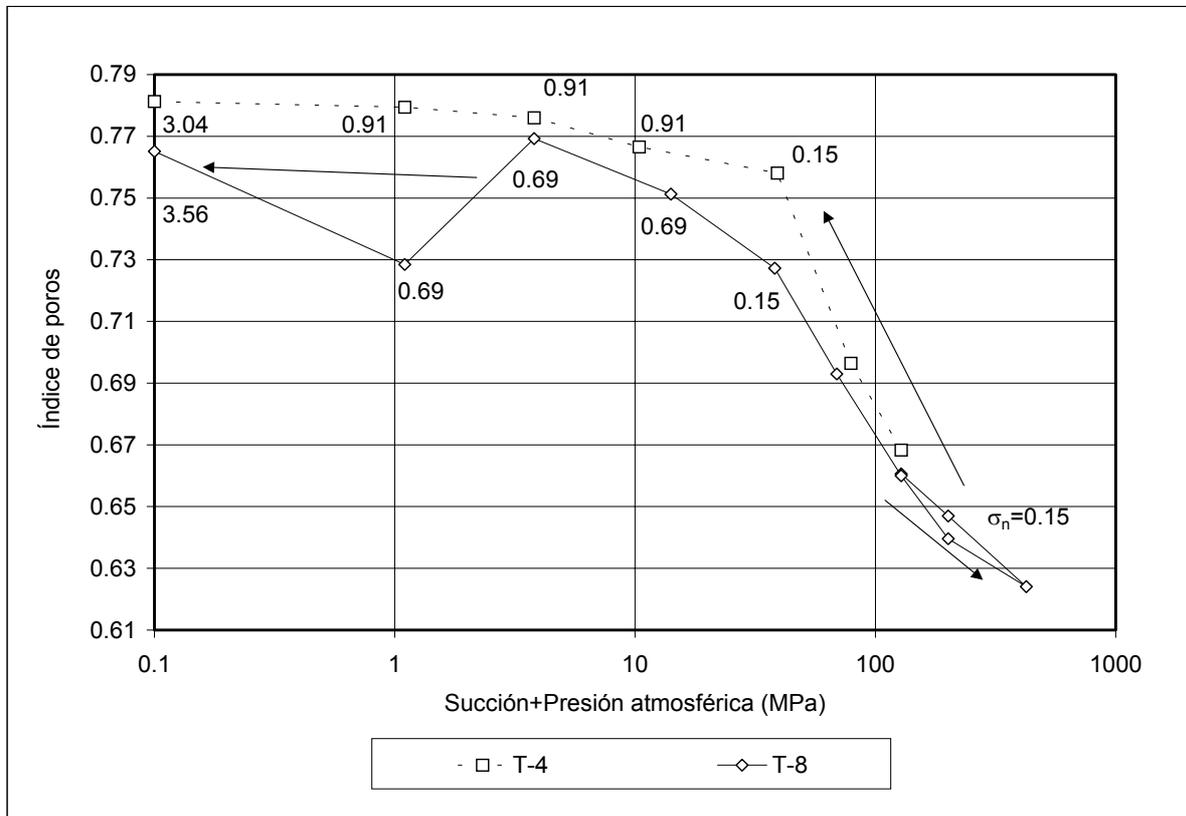


Figura 5.2.3.25 Trayectorias 4 y 8. Succión en función del índice de poros. La tensión vertical inicial es de 0.15 MPa. Junto a cada punto se escribe la tensión vertical cuando aumenta.

En la figura 5.2.3.26, se puede observar que para una misma tensión vertical, el hecho de que la muestra haya sido secada previamente no modifica su comportamiento de hinchamiento posterior durante una trayectoria de mojado bajo carga constante ya que durante ese ciclo de secado/humedecimiento sólo se produce una pequeña deformación que es prácticamente reversible y que apenas influye en futuras trayectorias.

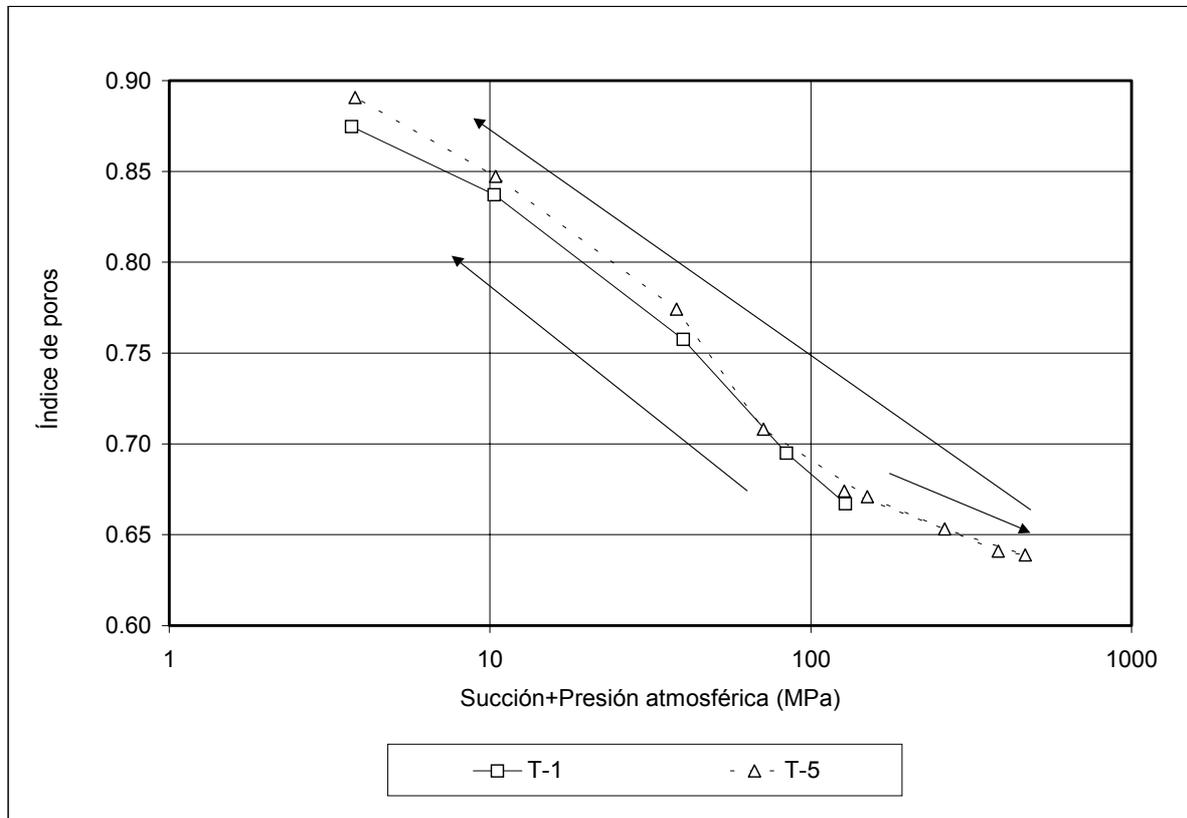


Figura 5.2.3.26 Trayectoria 1 (mojado) y trayectoria 5 (secado-mojado) con una tensión vertical de 0.15 MPa

En la figura 5.2.3.27, puede observarse la clara relación existente entre la tensión vertical de hinchamiento con la deformación vertical permitida en los ensayos con control de deformación. Si hay secado previo, la tensión vertical para una misma deformación es muy ligeramente superior a la que se obtiene sin dicho secado.

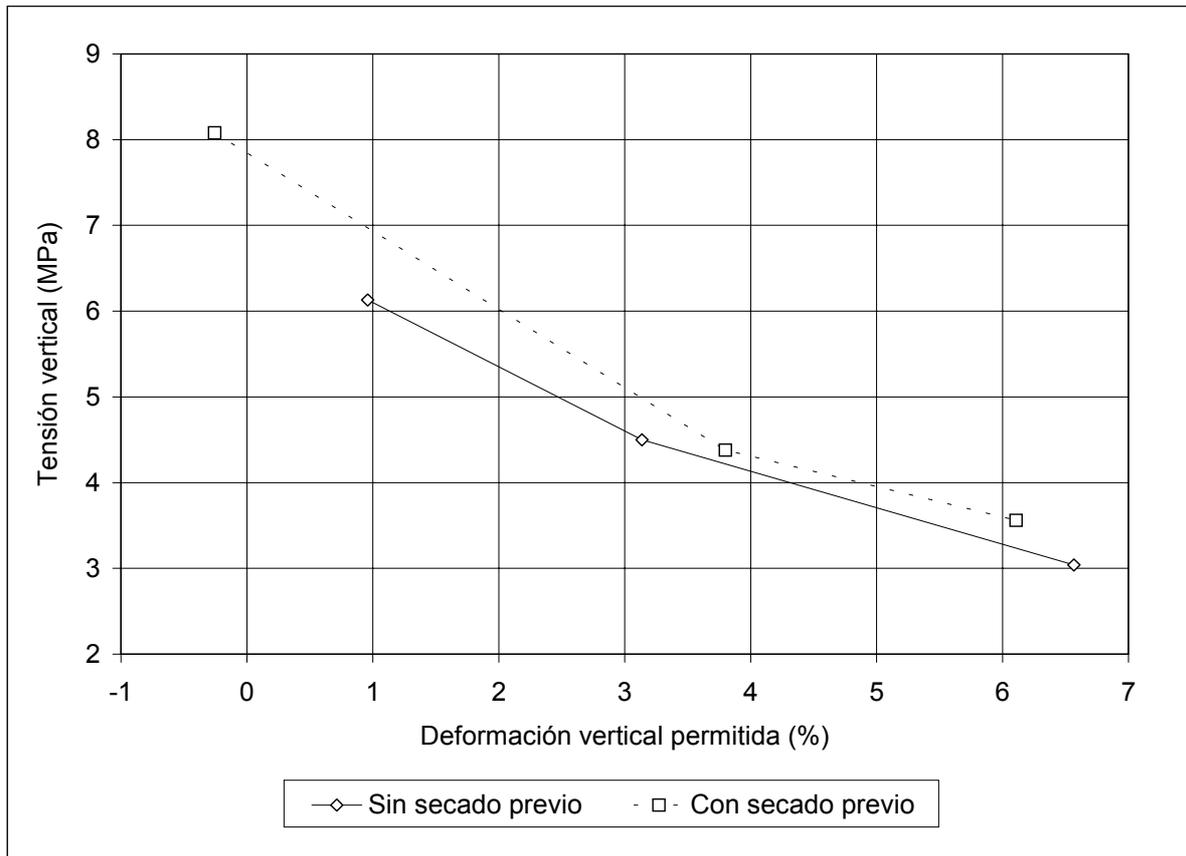


Figura 5.2.3.27 Evolución de la tensión vertical máxima con la deformación vertical

En las figuras 5.2.3.28 y 5.2.3.29 pueden apreciarse con mejor detalle los cambios de carga que ha sido necesario aplicar para mantener inalterado el volumen de las muestras ensayadas con control de cambio de volumen. Claramente pueden distinguirse tres regiones. La primera corresponde a la zona con succión alta y cargas reducidas. En esta región no se ha alcanzado la superficie de fluencia correspondiente a los aumentos de carga y, por tanto, la deformabilidad del suelo frente a aumentos de carga es baja, con $\Delta e / \Delta(\ln \sigma)$ del orden de -0.01; frente a la expansividad del suelo por reducción de la succión, con $\Delta e / \Delta(\ln s + p_{atm})$ del orden de -0.06. Por tanto, para compensar los importantes cambios de volumen que se generarían al reducir la succión es necesario aplicar importantes cargas verticales. La relación $\Delta(\ln s + p_{atm}) / \Delta(\ln \sigma)$ vendrá dada por el cociente entre las dos compresibilidades mencionadas (del orden de 0,16):

$$\Delta(\ln s + p_{atm}) / \Delta(\ln \sigma) = [\Delta e / \Delta(\ln \sigma)] / [\Delta e / \Delta(\ln s + p_{atm})]$$

A medida que la tensión vertical aumenta, el cambio de volumen debido a cambios de succión se hace más pequeño y la trayectoria a seguir en el plano (σ , $s+p_{atm}$) tiende a ser cada vez más vertical.

La segunda región corresponde a la zona con succiones bajas y cargas elevadas. Cuando el punto representativo del estado tensional del suelo alcanza la superficie de fluencia (en los modelos de Alonso et al., 1990 y Gens y Alonso, 1992), su rigidez frente a cargas verticales se reduce bruscamente y la trayectoria que sigue la muestra en el ensayo de presión de hinchamiento sufre un cambio brusco de pendiente. En el caso en que la carga sea suficientemente alta como para que se produzca el colapso de la macroestructura del suelo, el valor de la tensión vertical aplicada tiene que reducirse para que las deformaciones de expansión elástica por descarga compensen el colapso debido a la disminución de succión. Este fenómeno puede observarse en la figura 5.2.3.28. Los puntos que definen la posición de la superficie de fluencia se muestran en la figura 5.2.3.29. En esa figura se indican también los puntos asociados a las superficies de fluencia encontrados en las trayectorias de carga bajo succión controlada ($p_0(s)$), estos puntos se han deducido a partir de los resultados de Villar (2000) excepto el punto correspondiente a una succión de 3.7 MPa (trayectorias 1 y 5). La pequeña discrepancia observada entre ambos obedece a que las trayectorias seguidas son distintas y conducen a deformaciones plásticas durante el proceso de hidratación y carga también distintas. En principio, en los ensayos de carga a succión constante, las mayores deformaciones de hinchamiento plástico experimentadas durante la fase de reducción de succión deberían conducir a tamaños de las superficies de fluencia más pequeños.

La tercera región corresponde a la situación que se produce cuando se está cerca de la succión nula, entonces el hinchamiento de los agregados de arcilla es ya muy alto y puede llenar los poros de la macroestructura impidiendo que se siga desarrollando el colapso. En ese caso, la microestructura juega un papel predominante y es posible relacionar los cambios de volumen en el suelo con los cambios de tensión efectiva ($\sigma' = \sigma - u$), y si el volumen permanece constante el aumento de carga debe compensar el aumento de presión de agua debido a la disminución de succión. Por tanto, cerca de los valores de succión nula las trayectorias deberían tender a alcanzar una pendiente de -45° ($\Delta(s+p_{atm}) = -\Delta\sigma$). Este fenómeno se observa relativamente bien en la figura 5.2.3.30, aunque nuevamente hay que recordar que el valor de la succión más baja impuesto mediante el control de la humedad relativa de la atmósfera es sólo aproximado.

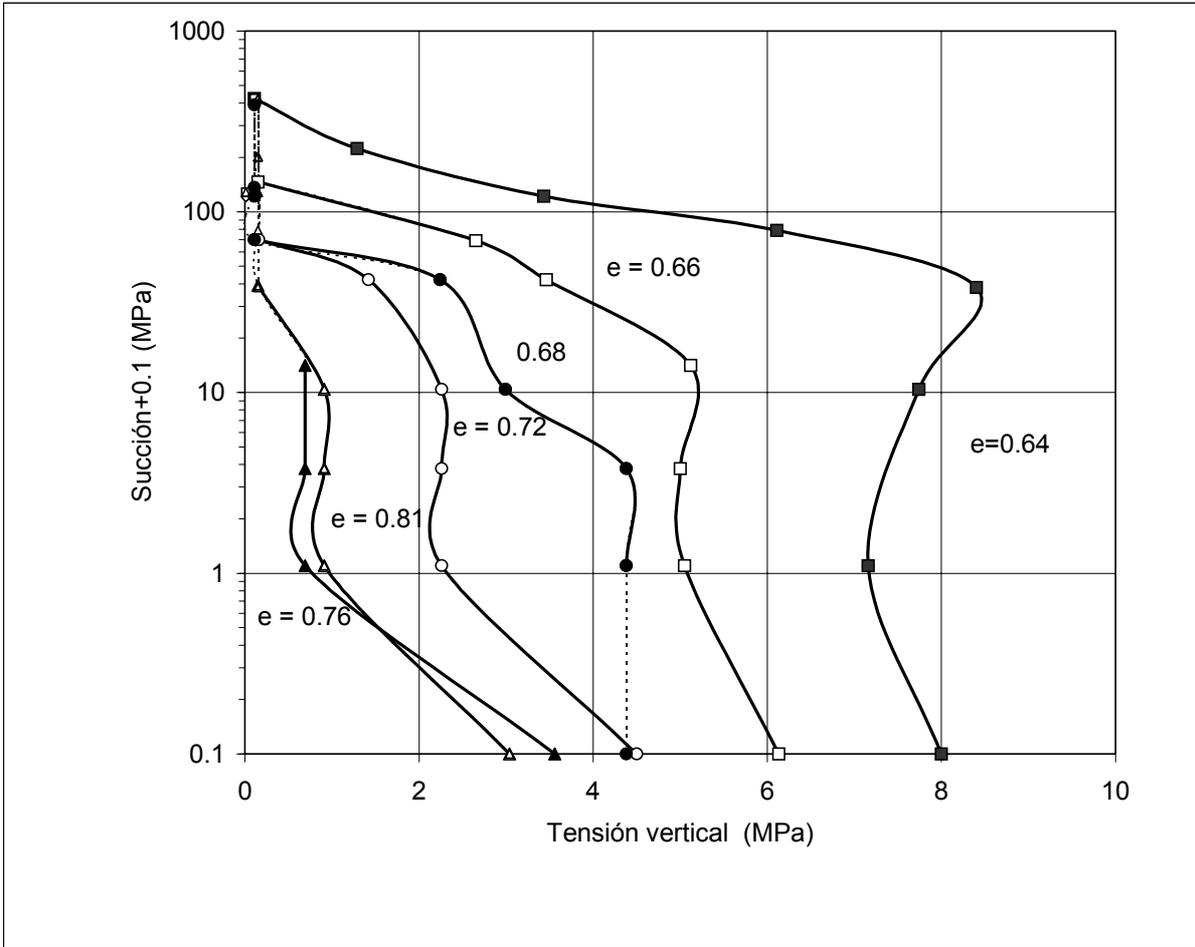


Figura 5.2.3.28 Tensión vertical en función de la succión en todos los ensayos con deformación controlada.

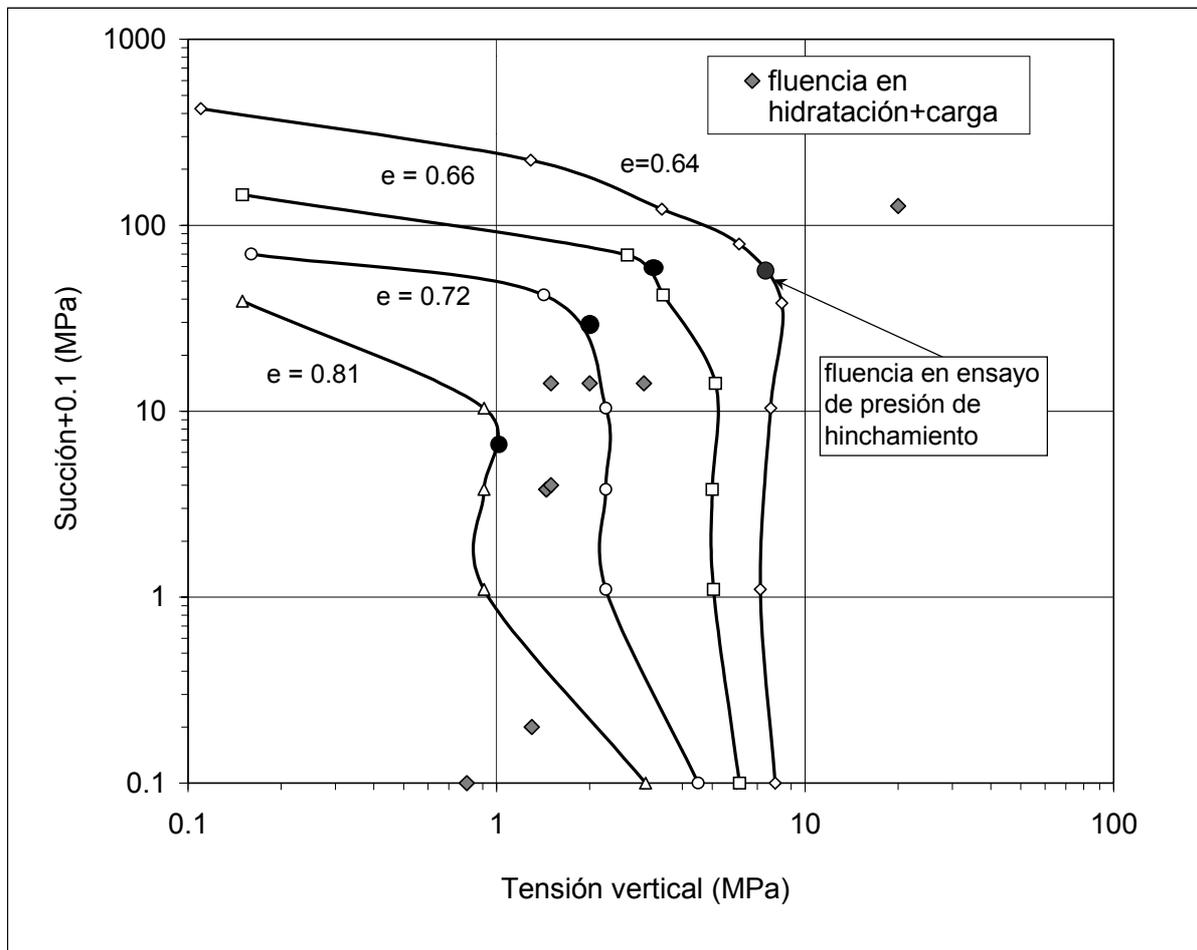


Figura 5.2.3.29 Comparación entre puntos de las superficies de fluencia obtenidos a partir de los ensayos con control de deformación vertical (Villar, 2000) y de carga a succión constante

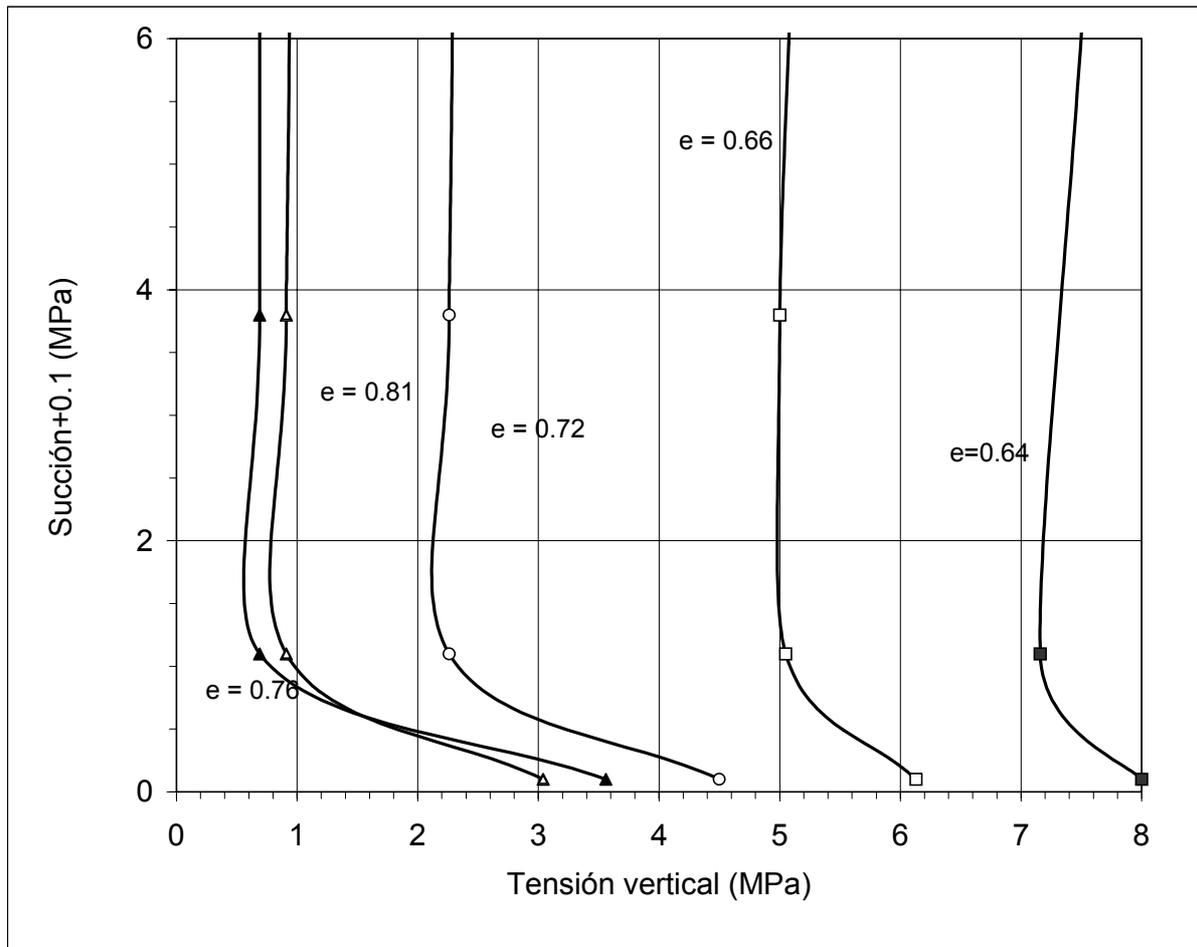


Figura 5.2.3.30 Tensión vertical en función de la succión cerca del estado de succión nula

En la figura 5.2.3.31a se muestran los cambios de volumen por efecto del aumento de carga y disminución de la succión en los ensayos realizados siguiendo las trayectorias 1, 2, 5 y 6 de las presentadas. En la figura 5.2.3.31b se muestran los cambios de volumen experimentados por la bentonita en trayectorias de secado y humedecimiento. Las deformaciones remanentes tras el ciclo inicial de secado y humedecimiento hasta recuperar la succión inicial son pequeñas. El efecto de este secado inicial en el comportamiento posterior del suelo es pequeño tal como puede apreciarse en la figura 5.2.3.31a al comparar el comportamiento de dos muestras al ser cargadas bajo una succión de 3,7 MPa, cuando una de ellas ha sido sometida a un secado previo hasta 466 MPa (trayectoria 5) y la otra no (trayectoria 1). También se muestran los resultados obtenidos de unas trayectorias realizadas con anterioridad a las anteriores, donde manteniendo la tensión vertical constante (0.02, 0.2 y 1.2 MPa), se aumentaba la succión de los 100 MPa iniciales hasta 300 MPa y posteriormente, se volvía a bajar la succión a 100, 20 y saturación. Puede observarse que las deformaciones por secado son mucho menores que las deformaciones por humedecimiento al reducir la succión por debajo de la succión inicial. Por otra parte, se manifiesta claramente un cambio

de pendiente en la relación volumen/logaritmo de la succión cuando en el proceso de humedecimiento se alcanza la succión inicial. Una vez superado este punto ya no se aprecian cambios de pendiente importantes en esta relación salvo en los casos en que la tensión vertical es suficientemente elevada como para que se produzcan los fenómenos de colapso indicados en la figura 5.2.3.29.

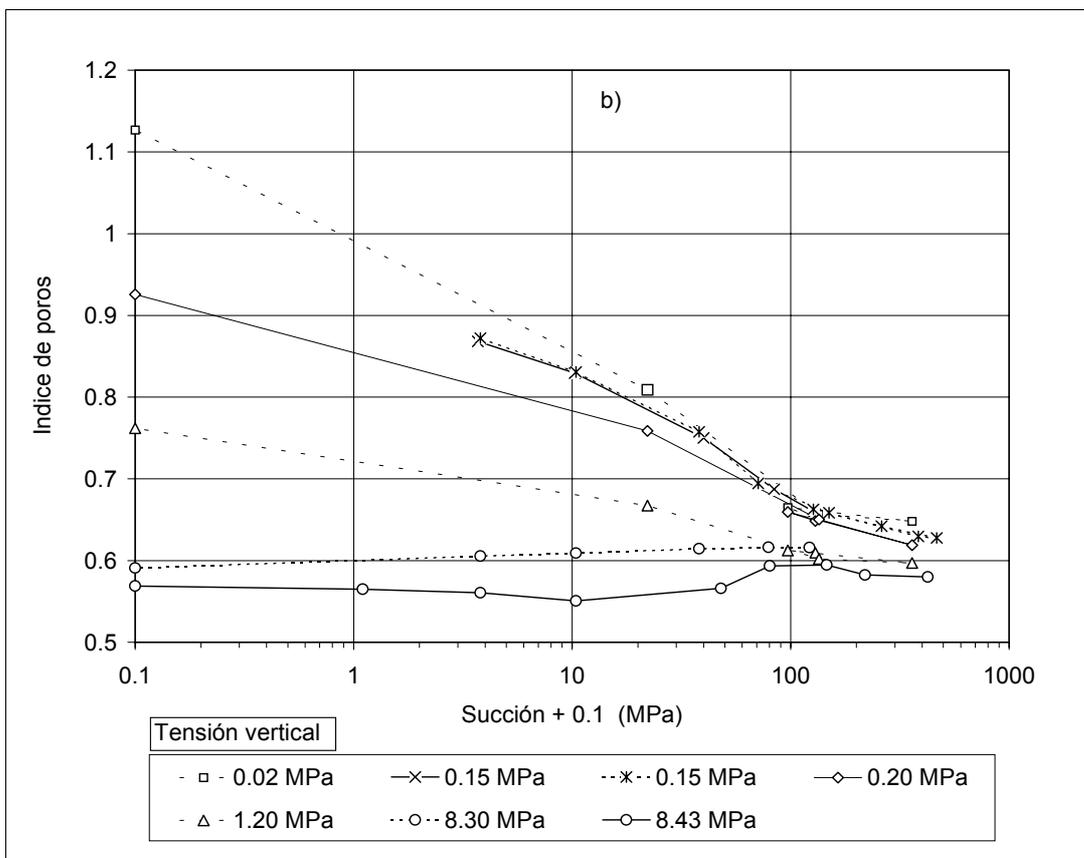
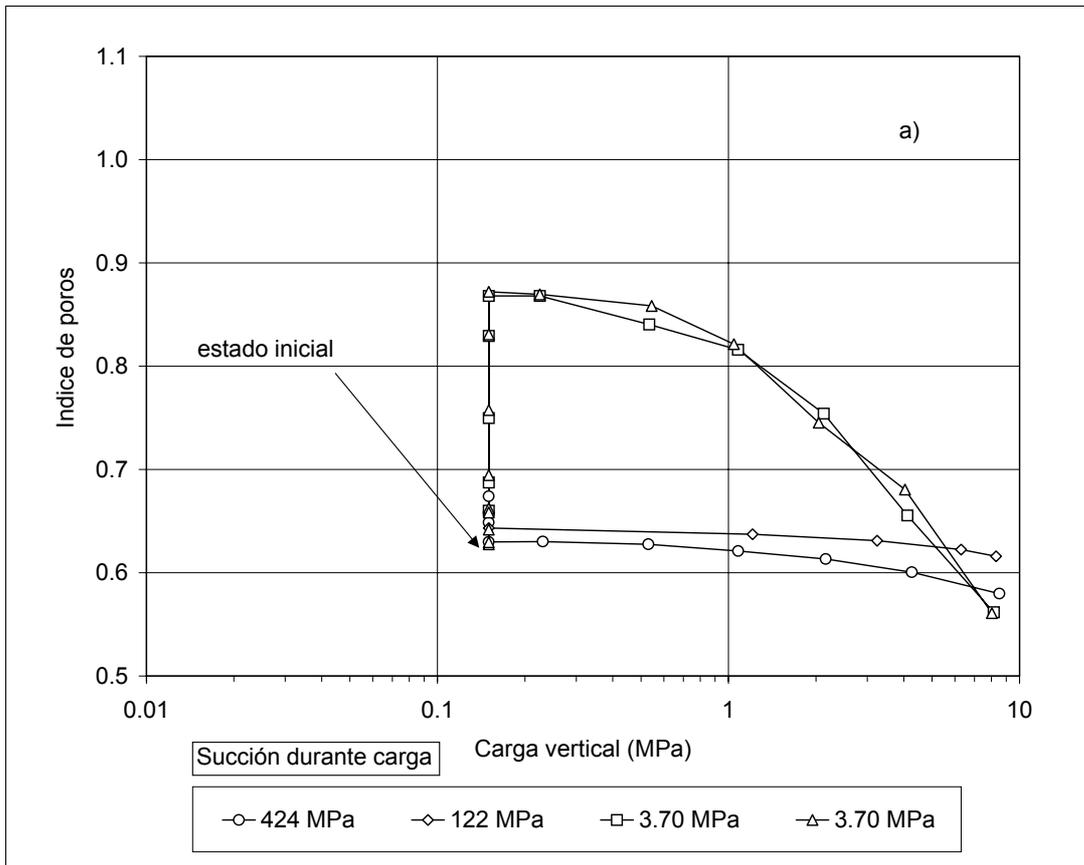


Figura 5.2.3.31: Cambio de volumen al aumentar la carga (a) y reducir la succión (b)

5.3 MEDIDA DE LA DILATACIÓN LINEAL POR CAMBIO DE TEMPERATURA

5.3.1 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

Para la medida del coeficiente de dilatación térmica de la bentonita, se ha desarrollado un equipo siguiendo las pautas del procedimiento D4535-85 de la ASTM. Dadas las características expansivas del suelo ensayado, se ha tenido que modificar dicho procedimiento al tener que asegurar la perfecta estanqueidad de la muestra. El equipo consta de una plataforma metálica de acero inoxidable, encima de la cual se coloca una muestra de 38 mm de diámetro y 78 mm de longitud. La muestra se rodea de una membrana de látex de 1 mm de grosor. En las bases se colocan sendos cabezales como los usados en ensayos triaxiales, con la diferencia de que en este caso son de vidrio Pyrex. Sobre este conjunto, se coloca una barra también de vidrio Pyrex y al lado de ésta, otra barra del mismo material tal como se indica en la figura 5.3.1. Se eligió vidrio Pyrex porque es el material con un bajo coeficiente de dilatación térmica más accesible que se encontró en el mercado (3.75×10^{-6} 1/K). Los cabezales son del mismo material que las barras para que su dilatación no influya en los resultados. Para medir la temperatura de la muestra, se instalan tres termopares pegados a la membrana: uno en cada base y otro en el centro. La medida del desplazamiento vertical se hace con un micrómetro mecánico, encima del cual se coloca en serie un transductor de desplazamientos tipo LVDT para medir de manera continua el desplazamiento del extremo superior de la barra de vidrio que hay sobre la muestra. El desplazamiento total de la muestra será el medido más el desplazamiento debido a la dilatación de un trozo de barra comparadora de igual longitud que la muestra. Antes de realizar los ensayos con muestras de suelo se midió el coeficiente de dilatación térmica del vidrio, para ello se utilizó una probeta de cobre de la misma longitud que las probetas de suelo. En este caso, el coeficiente de dilatación térmica del cobre es conocido (1.65×10^{-5} 1/K) y se mide el coeficiente del vidrio. La temperatura se impone al sumergir todo el sistema en un baño de agua en el que se sumergen también tres resistencias eléctricas. El baño es de unos 15 litros y las resistencias son de 500 Watios a 220V cada una. Se instalan tres en serie, lo que proporciona un flujo de calor de 40 cal/s. La temperatura máxima que se puede imponer en el baño es de 65 °C. A esta temperatura, todo el calor procedente de las resistencias se pierde por los contornos y lo único que se hace es mantener la temperatura del baño constante. Para reducir la evaporación del agua, se colocaron unas bolas de plástico flotando en la superficie del baño.

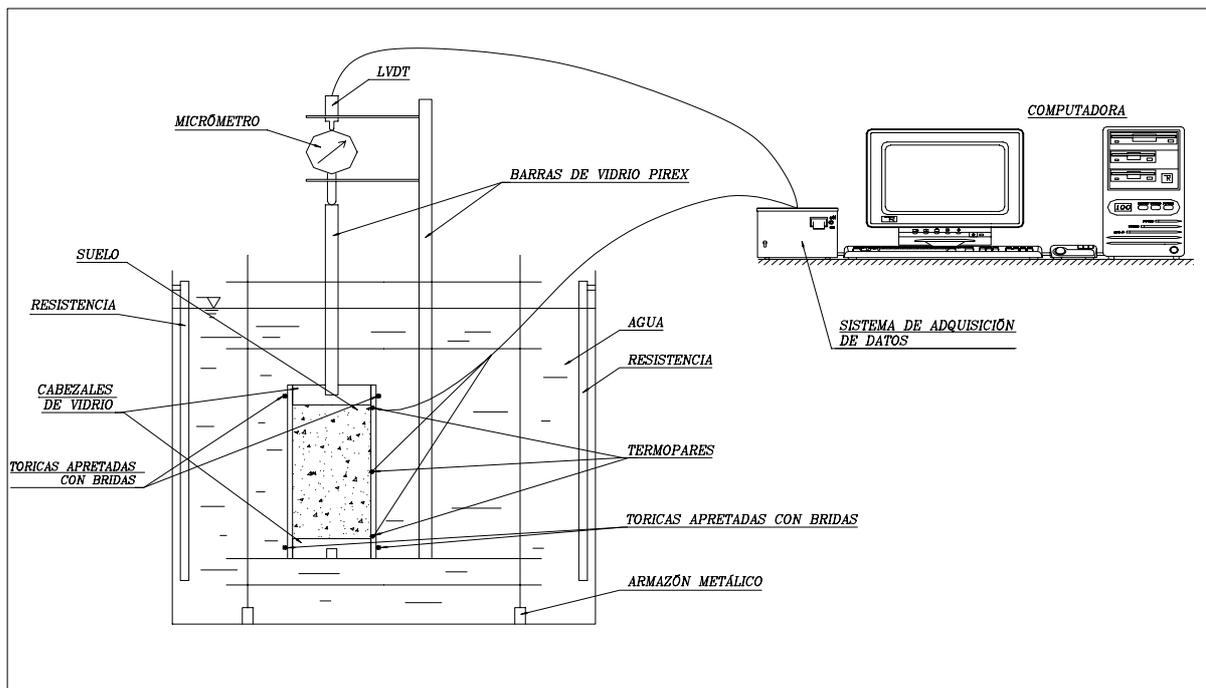


Figura 5.3.1.1. Equipo del ensayo de dilatación lineal por cambio de temperatura.

Este ensayo es muy delicado puesto que se pretende medir desplazamientos con resolución de pocas micras. Cualquier perturbación debida a vibraciones que puedan producirse en el laboratorio o por intrusión de agua en la muestra, alterará sensiblemente las medidas, por ejemplo, se podían detectar movimientos en el micrómetro debidos a la puesta en marcha de los compresores que dan aire comprimido a las líneas de aire del laboratorio, golpes en el suelo cercanos a la zona del laboratorio donde se realizaba el ensayo, etc. Otro problema que surgió es la presencia de gradientes de temperatura en el baño. Estos problemas se han minimizado sensiblemente al instalar el equipo en una zona del laboratorio poco afectada por vibraciones y forzando al agua a circular dentro del baño movida con una bomba.

El problema de intrusión de agua siempre se ha dado en las bases de la muestra. Para evitarlo, alrededor de los cabezales de vidrio se ponen juntas tóricas y se aprietan contra el cabezal con bridas para, finalmente, sellarlo todo con pasta de silicona. De este modo, se alarga el camino al agua y se asegura la estanqueidad de la muestra durante unos días, ya que con el paso del tiempo, la membrana se satura y se produce un flujo de agua desde el baño de agua a la muestra, perturbando el ensayo. Gracias a la medida continua con el transductor de desplazamientos, se puede detectar todo tipo de incidencias durante el ensayo, tanto si se produce algún movimiento accidental (debido a algún golpe), como si se produce intrusión de agua (por un defecto en la membrana o por un mal aislamiento de las bases). Por otra parte, el

control del peso inicial y final de la probeta permite conocer la cantidad de agua que ha entrado o salido de la muestra durante el ensayo. En los ensayos realizados, la densidad seca inicial de las probetas varía entre 1.6 y 1.7 g/cm³ y los grados de saturación estaban en el entorno de 0.6, 0.8 y 0.95.

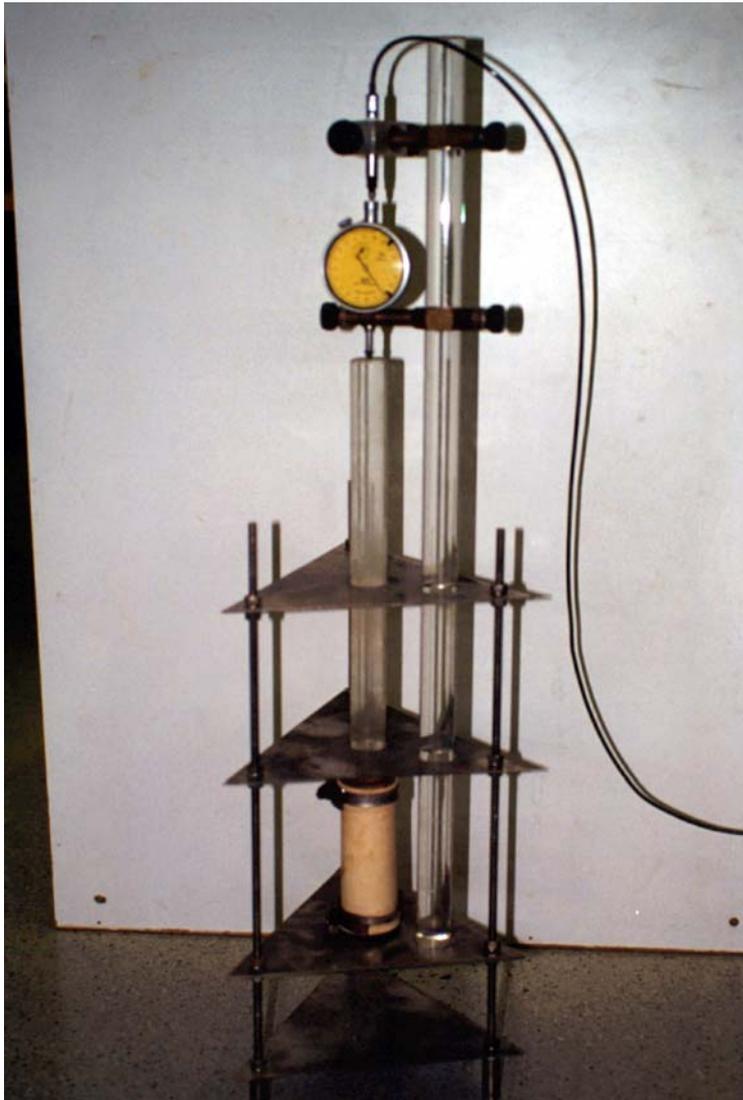


Figura 5.3.1.2 Equipo para medir el coeficiente de dilatación

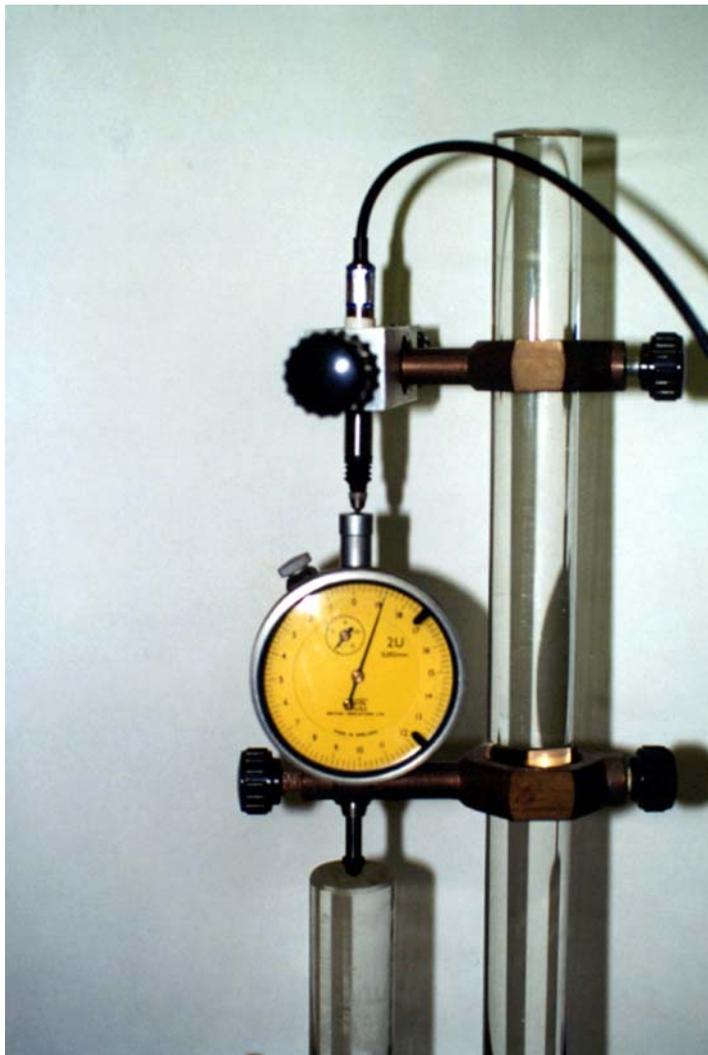


Figura 5.2.1.3 Medida de desplazamientos en el equipo de dilatación

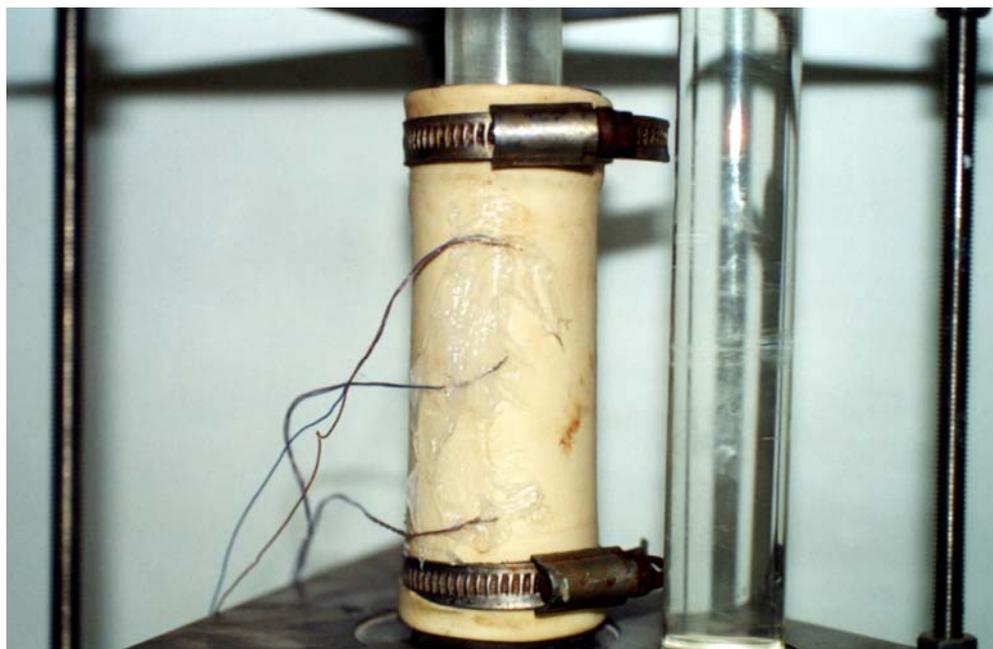


Figura 5.2.1.4 Muestra colocada en el armazón con los termopares pegados a la superficie.



Figura 5.2.1.5 Detalle de las medidas para asegurar la estanqueidad de la muestra en sus extremos. En el extremo opuesto se aísla igual.

5.3.2 RESULTADOS OBTENIDOS

Como se ha comentado anteriormente, se han realizado tres series de ensayos con tres grados de saturación distintos. A continuación, se presentan los resultados obtenidos cuando el grado de saturación era cercano al 60 %. En la tabla 5.3.2.1 se muestran las condiciones iniciales de las muestras. Se han realizado cuatro ensayos con densidades secas que varían entre 1.57 y 1.72 g/cm². Para conocer el valor de las deformaciones irrecuperables debidas a aumentos de temperatura, se han realizado ciclos de calentamiento y enfriamiento. En uno de los ensayos se han realizado 2 ciclos de aumento y disminución de temperatura. En otros dos un solo ciclo y el restante tan solo se aumentó la temperatura. El motivo de hacer ensayos con distinto número de ciclos de cambio de temperatura era, fundamentalmente, debido a la disponibilidad de los equipos necesarios para compactar nuevas muestras.

Ref ensayo	γ_d g/cm ³	ω %	Sr %
260898a	1.57	17.27	64.23
031198a	1.58	16.44	62.7
090996a	1.69	14.42	61.85
120996e	1.72	12.53	56.19

Tabla 5.3.2.1. Características iniciales de las muestras utilizadas en los ensayos con grado de saturación en torno al 60%.

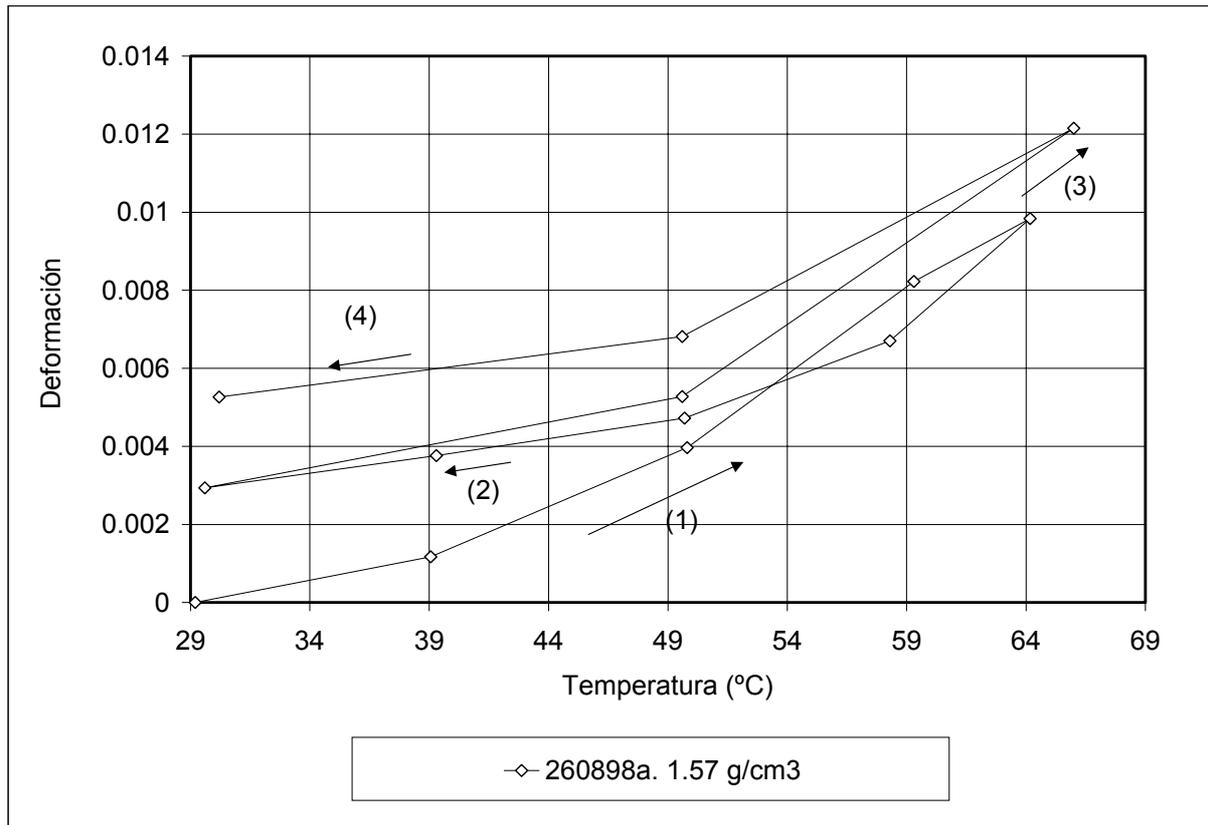


Figura 5.3.2.1 Ensayo de dilatación lineal con grado de saturación en torno al 60%.

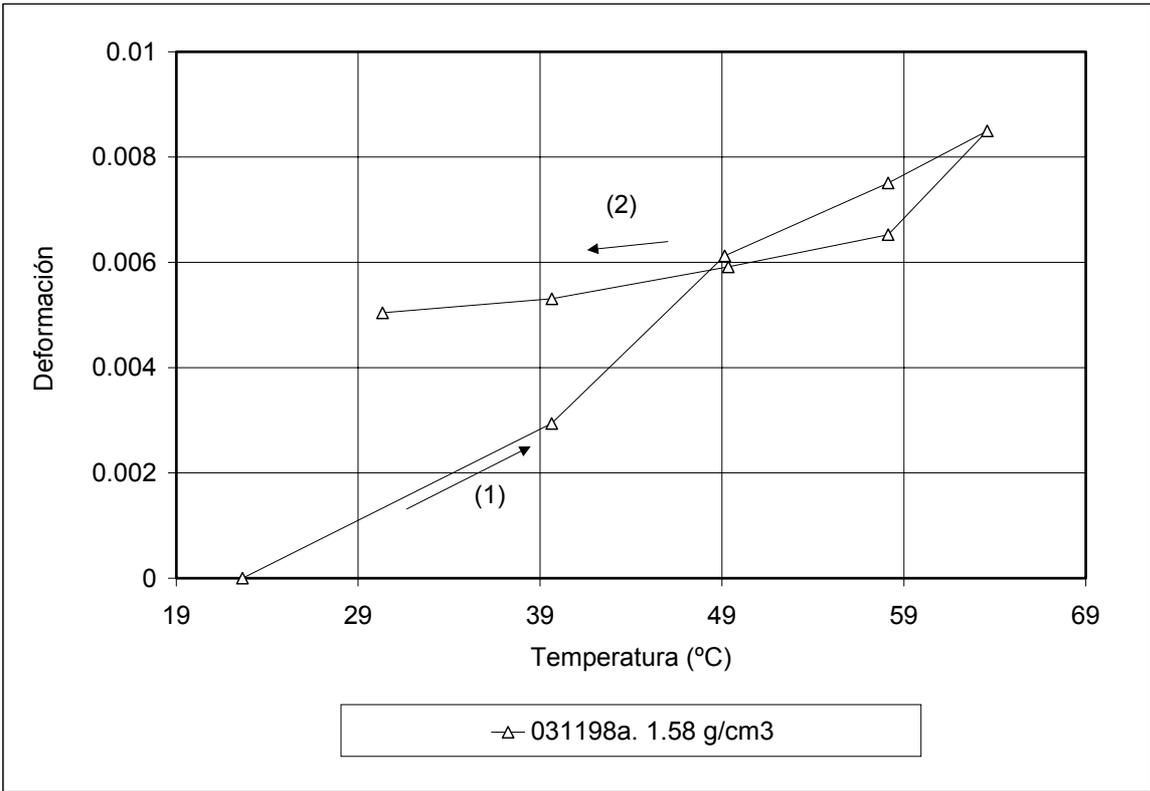


Figura 5.3.2.2 Ensayo de dilatación lineal con grado de saturación en torno al 60%.

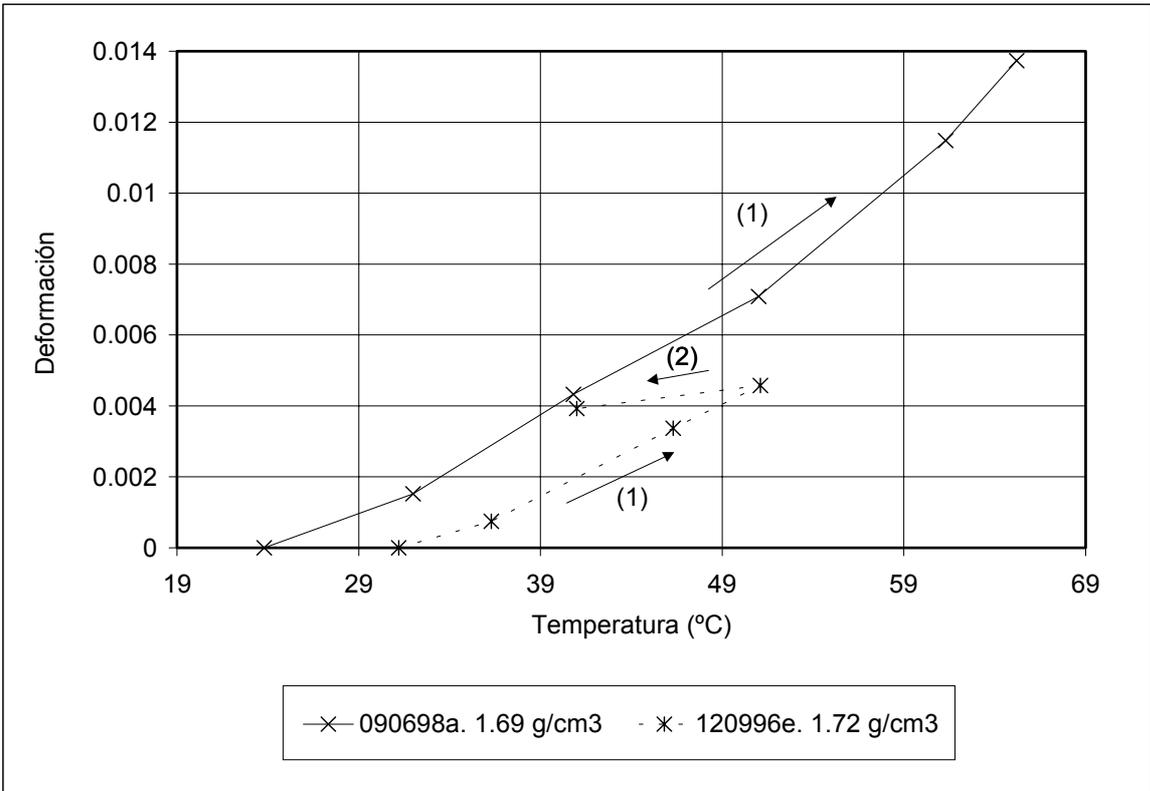


Figura 5.3.2.3 Ensayos de dilatación lineal con grado de saturación en torno al 60%.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos cuando el grado de saturación era del orden del 80 %. En la tabla 5.3.2.2 se muestran las condiciones iniciales de las muestras. Se han realizado tres ensayos con densidades secas que varían entre 1.60 y 1.62 g/cm³. En uno de los ensayos se han realizado 4 ciclos de aumento y disminución de temperatura. En otro un solo ciclo y en el restante tan solo se aumentó la temperatura.

Ref ensayo	γ_d g/cm ³	ω %	Sr %
160998a	1.6	21	82.13
030698b	1.61	20.94	82.71
261198a	1.62	20.15	80.67

Tabla 5.3.2.2. Características iniciales de las muestras utilizadas en los ensayos con grado de saturación en torno al 80 %.

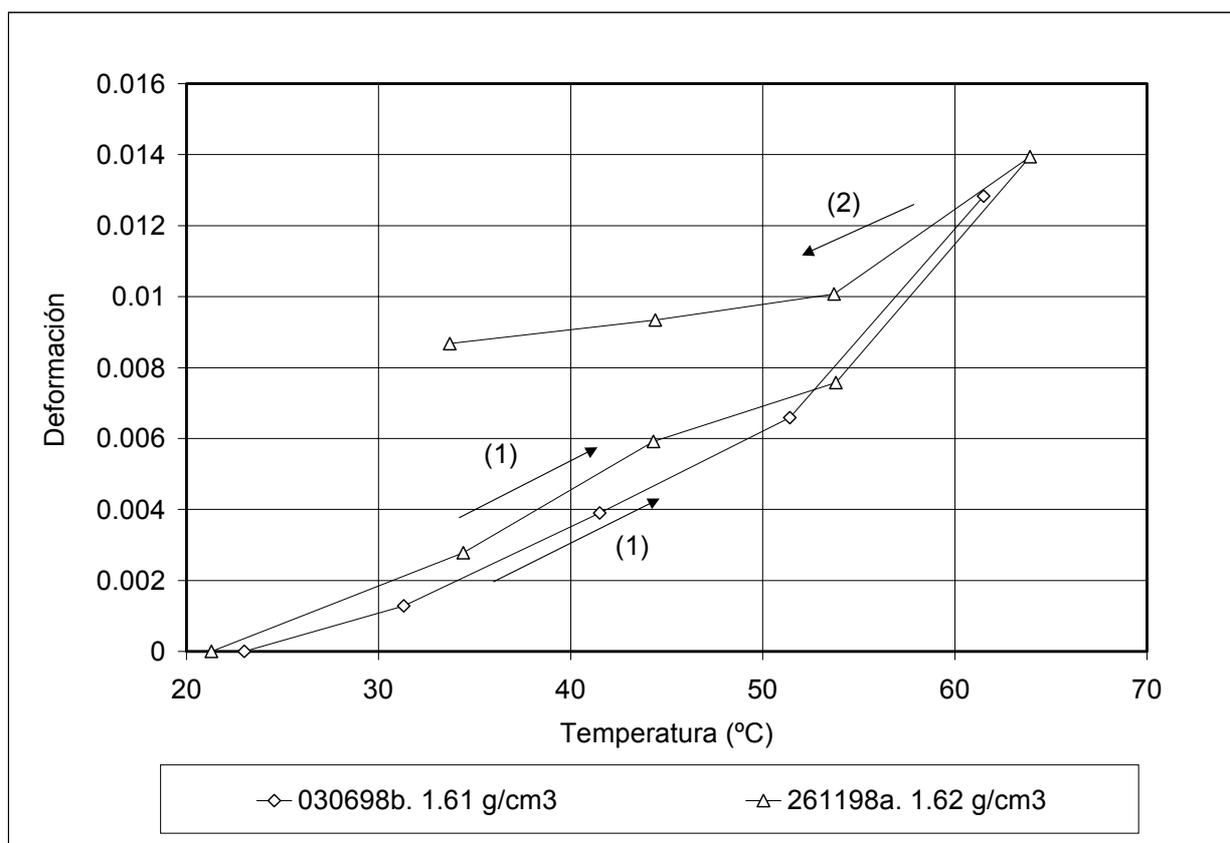


Figura 5.3.2.4 Ensayo de dilatación lineal con grado de saturación en torno al 80%.

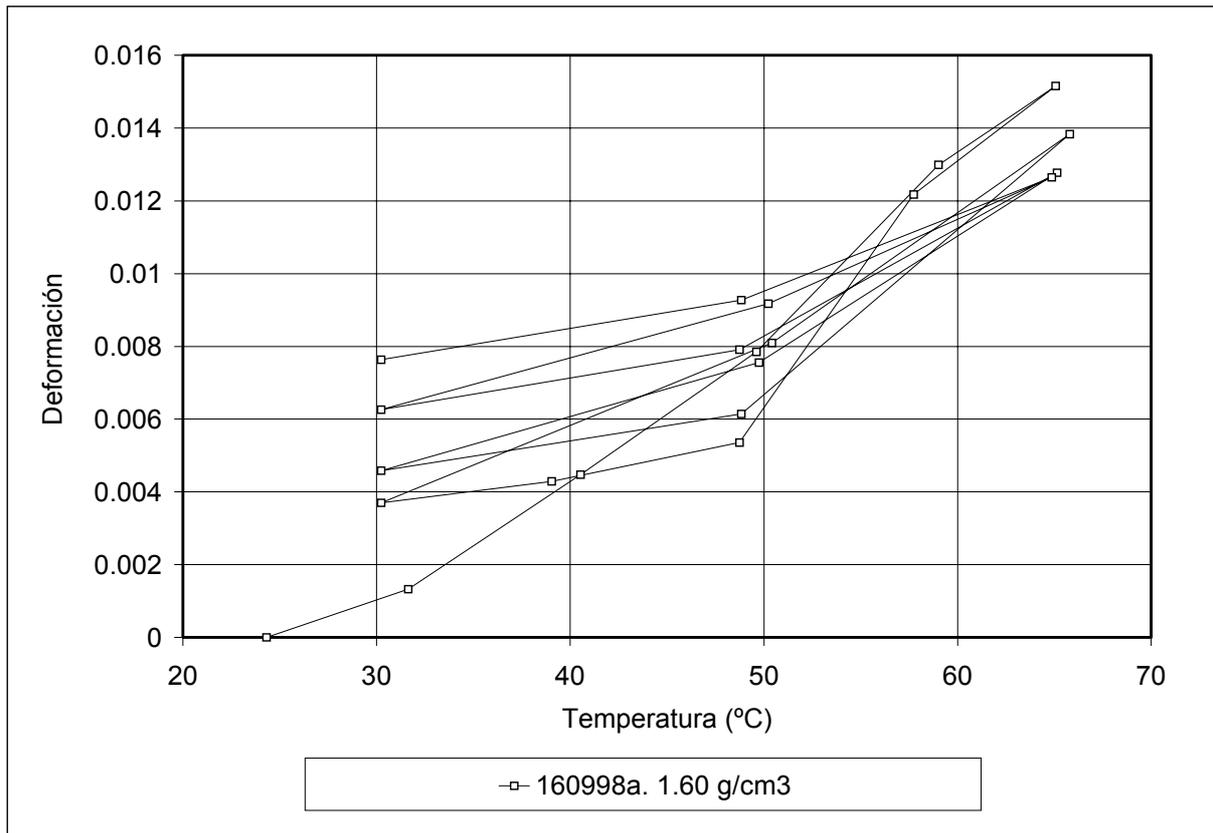


Figura 5.3.2.5 Ensayo de dilatación lineal con grado de saturación en torno al 80%.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos cuando el grado de saturación era del 95 %. En la tabla 5.3.2.3 se muestran las condiciones iniciales de las muestras. Se han realizado cuatro ensayos con densidades secas que varían entre 1.60 y 1.68 g/cm². En uno de estos ensayos se han realizado 3 ciclos de aumento y disminución de temperatura. En otros dos, dos ciclos y en el restante un solo ciclo.

Ref ensayo	γ_d g/cm ³	ω %	S_r %
110297a	1.6	25.09	97.1
041296a	1.66	21.25	95.39
051098a	1.67	21.64	91.23
191098b	1.68	20.78	92.2

Tabla 5.3.2.3. Características iniciales de las muestras utilizadas en los ensayos con grado de saturación en torno al 95%.

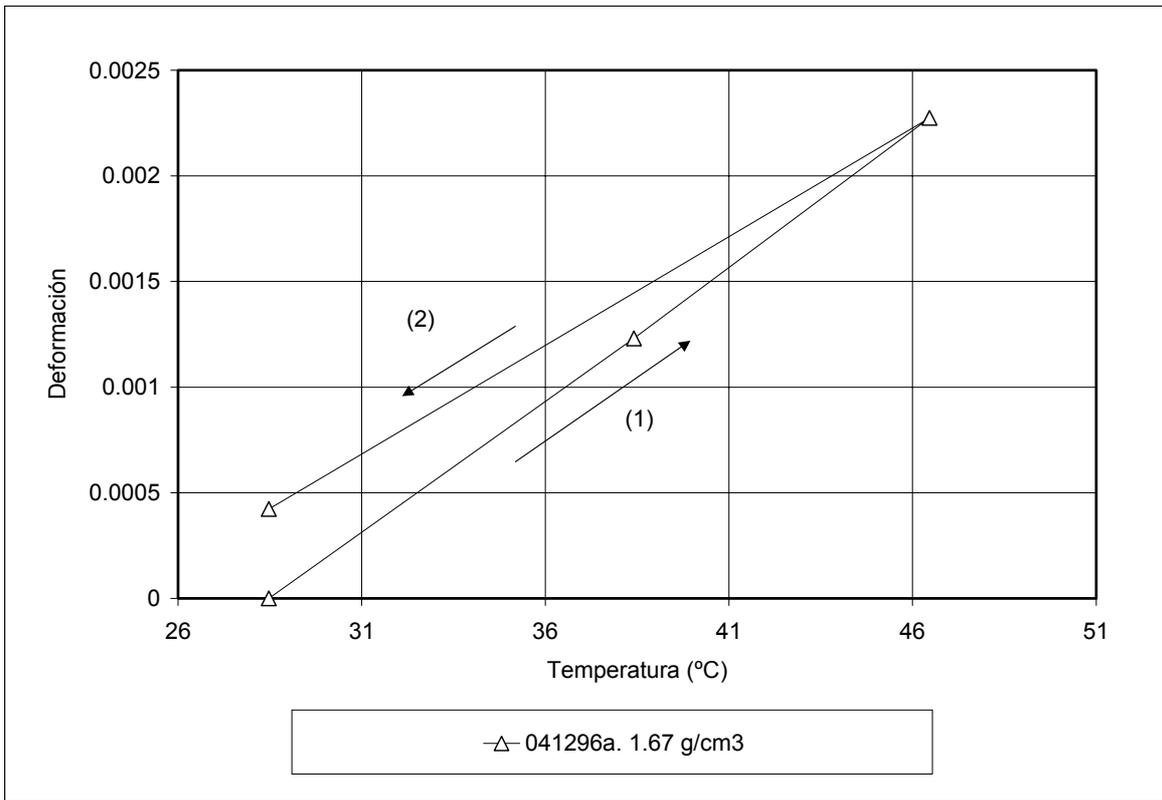


Figura 5.3.2.6 Ensayo 041296a con grado de saturación en torno al 95%.

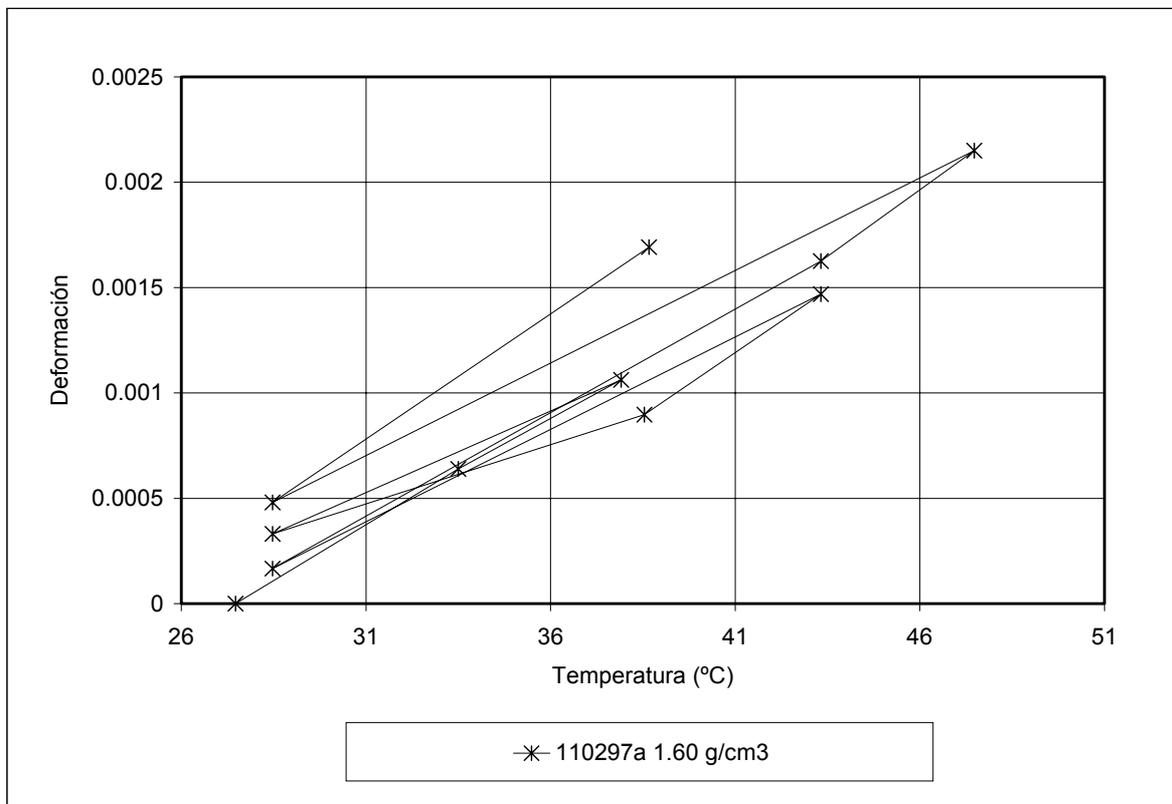


Figura 5.3.2.7 Ensayo 110297a con grado de saturación en torno al 95%.

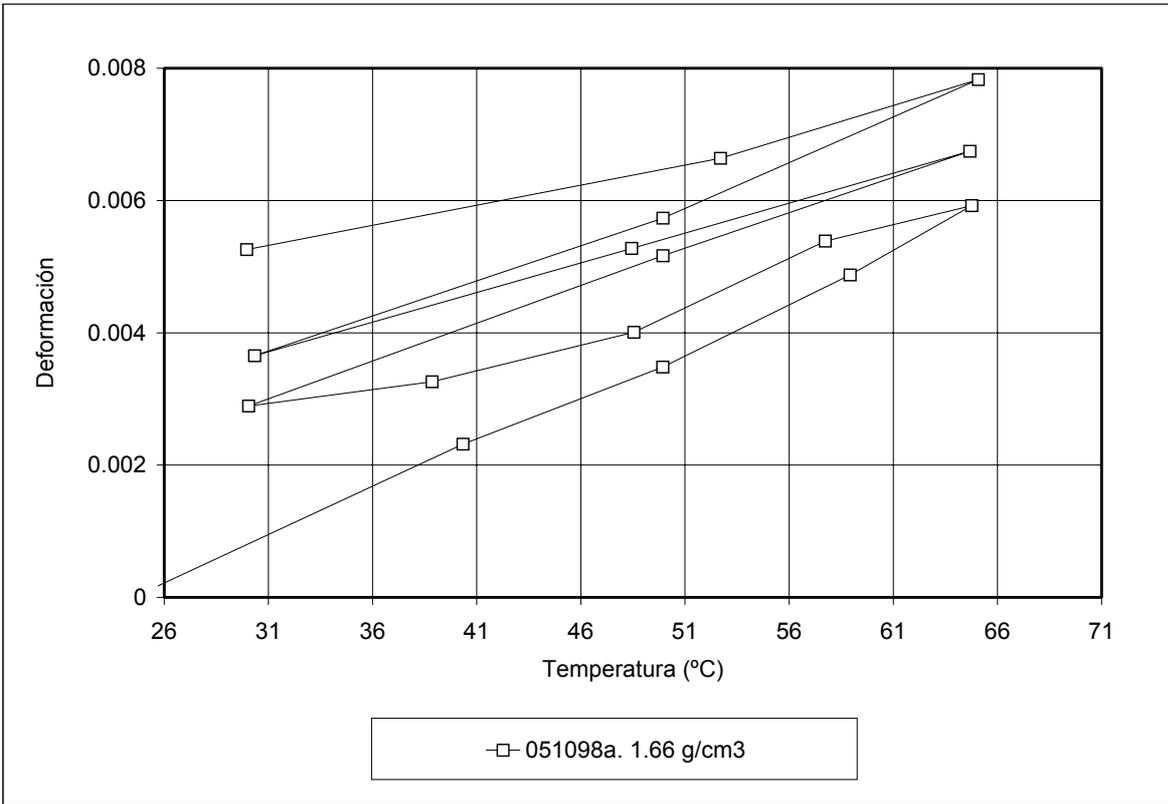


Figura 5.3.2.8 Ensayo 051098a con grado de saturación en torno al 95%.

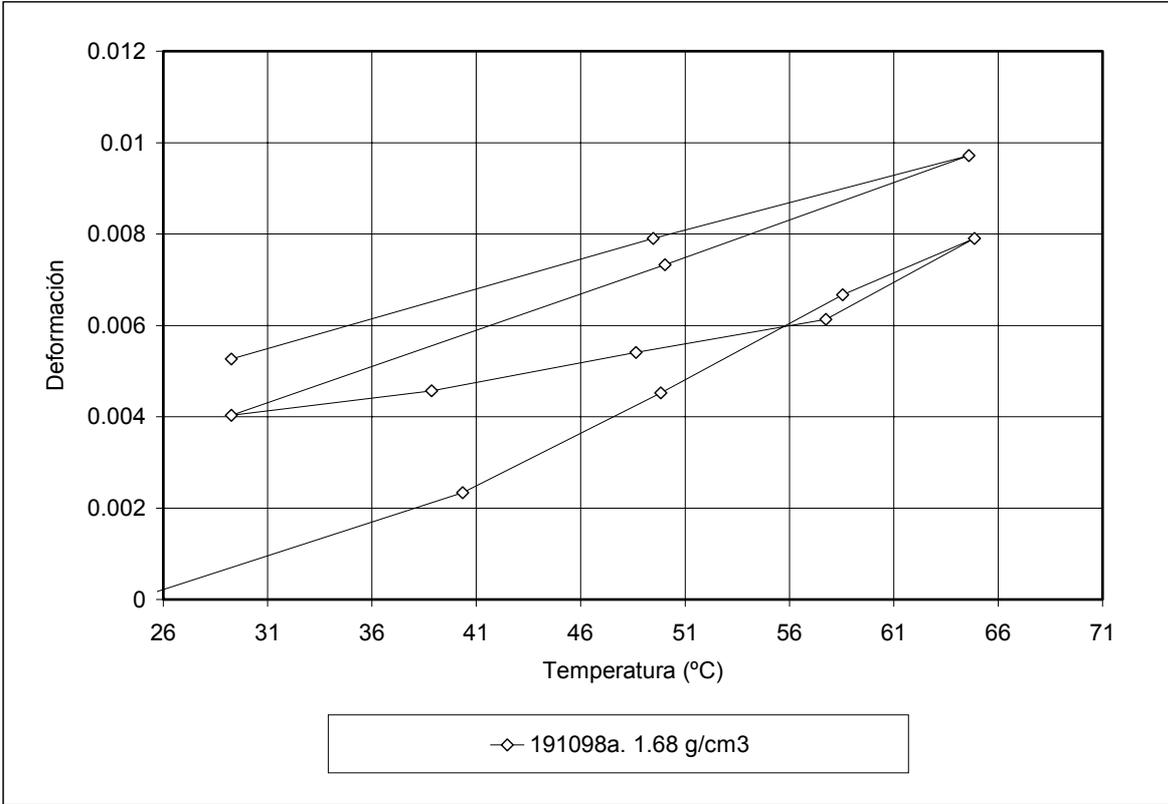


Figura 5.3.2.9 Ensayo 191098a con grado de saturación en torno al 95%.

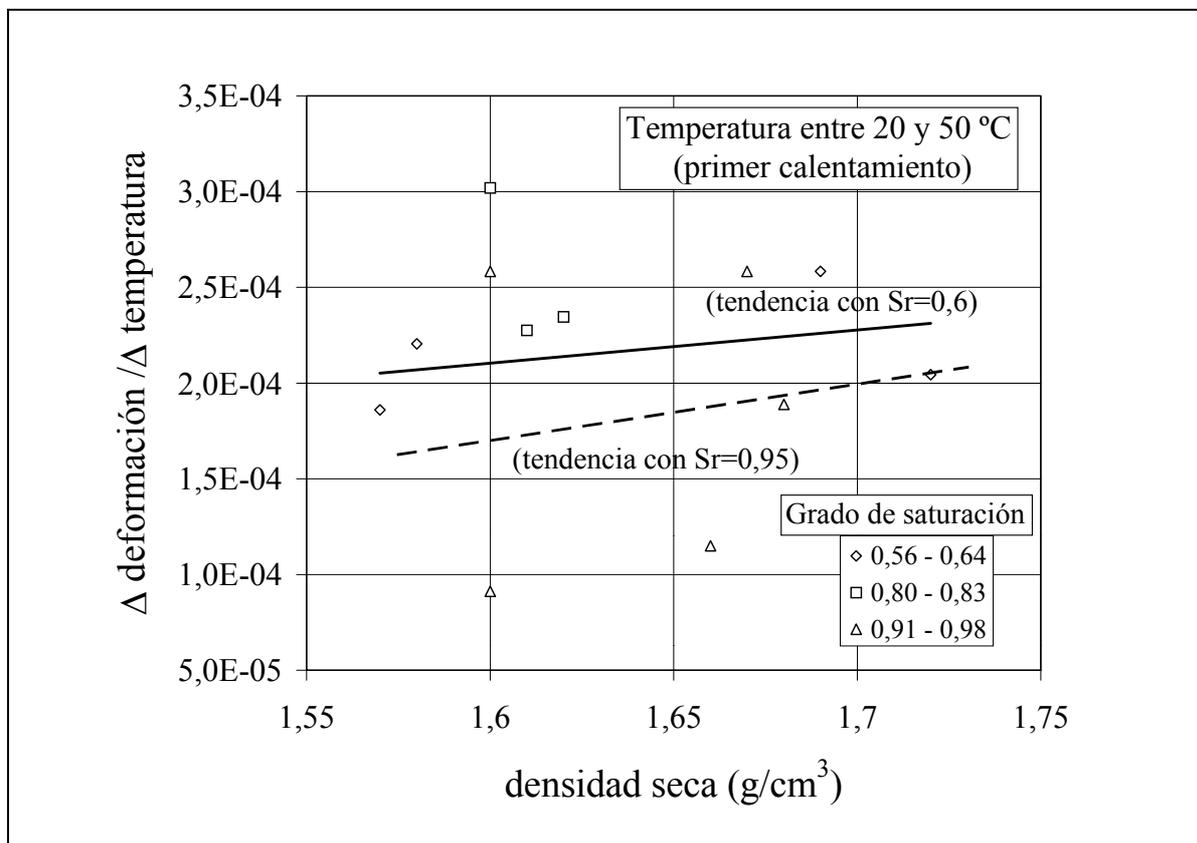


Figura 5.3.2.10: Relación entre las deformaciones lineales y la densidad seca para varios grados de saturación y para un rango de temperaturas entre 20 y 50°C en muestras calentadas por primera vez.

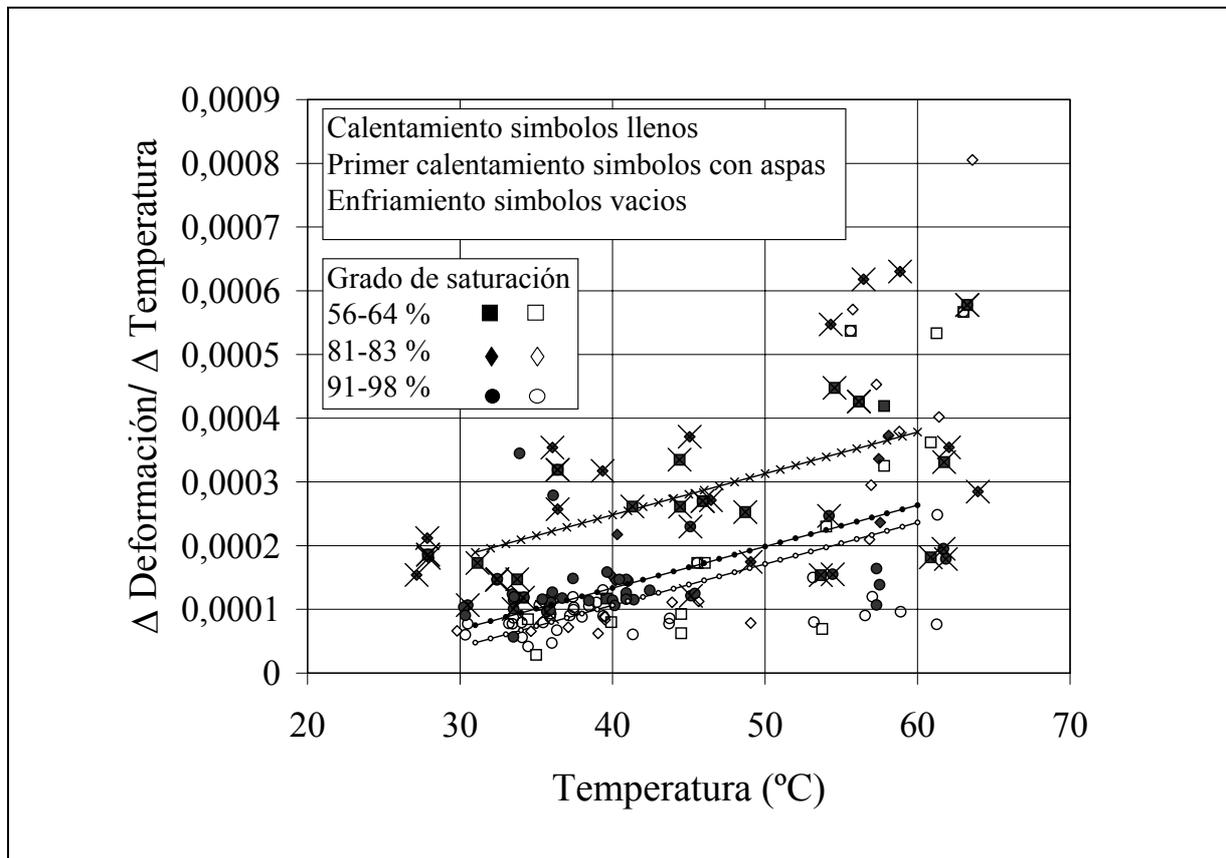


Figura 1: Valores del cociente entre aumento de deformación lineal y temperatura medidos en ensayos con diversos valores de densidad seca y grados de saturación.

Los resultados obtenidos muestran una cierta dispersión, aunque pueden deducirse varias tendencias. Las muestras con un grado de saturación de 0.95 presentan coeficientes de dilatación térmica algo menores que las muestras con 0.6 y 0.8. Otro resultado interesante es el cambio de curvatura de la curva temperatura - deformación, que indica un aumento del coeficiente de dilatación térmica a medida que aumenta la temperatura. También se aprecia que las deformaciones no se recuperan tras el primer incremento de temperatura, esto significa que un aumento de temperatura provoca deformaciones irreversibles.

Los valores de la pendiente de la relación entre los aumentos de deformación lineal ($\Delta\varepsilon_z$) y de temperatura (ΔT , °C) pueden aproximarse como:

$$\Delta\varepsilon_z/\Delta T = - 0,12 \cdot 10^{-4} + 6,5 \cdot 10^{-6} T \quad (\text{en el primer calentamiento})$$

$$\Delta\varepsilon_z/\Delta T = - 1,27 \cdot 10^{-4} + 6,5 \cdot 10^{-6} T \quad (\text{en calentamientos posteriores})$$

$$\Delta\varepsilon_z/\Delta T = - 1,54 \cdot 10^{-4} + 6,5 \cdot 10^{-6} T \quad (\text{en enfriamiento})$$

Puede observarse que el efecto de la temperatura en los cambios del valor de la dilatación efecto térmico es similar en las tres situaciones consideradas. Si se asume que los cambios de succión y de tensión de confinamiento durante los ensayos son pequeños, que tras el primer calentamiento se entra en régimen elástico y que las deformaciones en dirección radial tienen el mismo valor que en la dirección vertical, puede escribirse (T en °C):

$$\alpha_{vol.} = \frac{\Delta \epsilon_{vol.}^{elas.}}{\Delta T} = 6,75 \cdot 10^{-5} + 1,95 \cdot 10^{-5} (T - 25)$$

donde $\epsilon_{vol.}^{elas.}$ indica el valor de las deformaciones volumétricas elásticas y $\alpha_{vol.}$ el coeficiente de dilatación volumétrico. Para un valor representativo de la temperatura de unos 45 °C (valor medio en el intervalo entre los 30 y 60 °C de los ensayos) se obtiene:

$$\frac{\Delta \epsilon_{vol.}^{elas.}}{\Delta T} = 4,57 \cdot 10^{-4} \text{ 1/K}$$

Finalmente hay que insistir en que los valores presentados son valores medios obtenidos a partir de regresiones en las que la dispersión de los resultados es importante. Ello obliga a considerar las relaciones anteriores con cautela.

5.4 ENSAYOS DE FLUJO DE CALOR

Se ha desarrollado una célula de ensayo para estudiar el comportamiento de la arcilla sometida a un flujo de calor sin estar confinada y con cambio de humedad global nulo. El objetivo de este ensayo es estudiar el efecto del flujo de calor y vapor motivado por un aporte de calor al suelo. Estos fenómenos son importantes en de amplias partes de la barrera arcillosa de un repositorio nuclear durante los primeros meses, cuando la arcilla aumenta su temperatura debido al calor que genera el residuo sin variar apreciablemente su humedad global, ya que el frente de hidratación avanza lentamente al tratarse de una arcilla muy poco permeable. De este modo, puede estudiarse el movimiento de agua y calor motivado sólo por inyección de este último. En cualquier caso, el movimiento de agua en forma de vapor juega un papel importante en todo el proceso de hidratación de la barrera.

5.4.1 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

Se ha desarrollado el equipo cuyo esquema se puede ver en la figura 5.4.1.1. Consta de dos muestras cilíndricas iguales de arcilla compactada (38 mm de diámetro y 78 mm de altura) enfrentadas una frente a la otra y separadas por un calentador (figura 5.4.2.1). En éste, se inyecta un flujo de calor constante en el tiempo manteniendo el extremo opuesto de ambas muestras a temperatura constante. Las muestras se rodean con sendas membranas de látex que permiten deformaciones pero que mantienen la humedad constante. El sistema se aísla con una envoltura de aislante térmico (5.5 cm de grosor) formado principalmente por polietileno expandido y lana de vidrio. El conjunto descrito está colocado en el interior de un tubo de metacrilato para dar rigidez al conjunto. El calentador es un cilindro de cobre (38 mm de diámetro por 50 mm de altura) que contiene cinco pequeñas resistencias en su interior. Éstas están conectadas a una fuente de alimentación que permite controlar la potencia, que oscila entre 0 y 5 W. En los ensayos realizados, se ha utilizado una potencia que oscilaba entre 2.1 y 2.2 W, aunque en algunos casos ha sido superior, con un intervalo de temperaturas máximas que ha variando entre 70-90° C. En las bases frías se impuso una temperatura de 30° C. Las variaciones de temperatura de estas bases eran menores de 0.5° C.

Para evitar en todo lo posible las fugas de agua, la membrana de látex se untó con silicona, que solidificaba a las pocas horas. Sin embargo y pese a las medidas adoptadas, la fuga de agua era de aproximadamente 0.1 g/día. Las muestras se colocaban en posición vertical. Para asegurar un buen contacto entre el calentador y la muestra, se colocaba un peso encima del conjunto que proporciona una tensión vertical de 0.035 MPa. A partir de los análisis numéricos realizados sobre el ensayo, se pudo cuantificar que la cantidad de calor fugado (que no llegaba a la base de la muestra opuesta al calentador), era aproximadamente un 60% del total inyectado. El calor se fugaba principalmente por las paredes laterales.

Durante los ensayos, se midieron las temperaturas en tres puntos situados en el interior de la muestra y en la zona del calentador en contacto con la misma, también se midió la temperatura en la muestra simétrica y en la parte exterior del conjunto, una para comprobar la simetría del flujo de calor y la otra para imponerla como condición de contorno en los análisis numéricos, ya que la temperatura en el metacrilato que rodea el sistema es ligeramente superior a la del laboratorio. Al finalizar el ensayo, se medía el diámetro de la muestra en siete puntos

con un calibre de 0.01 mm de error máximo. Finalmente, la muestra se cortaba en seis pequeños cilindros para medir la distribución de humedad. El corte se realizaba con una sierra de cortar metal con la probeta encajada en un molde metálico, tal como se muestra en la figura 5.4.1.5.

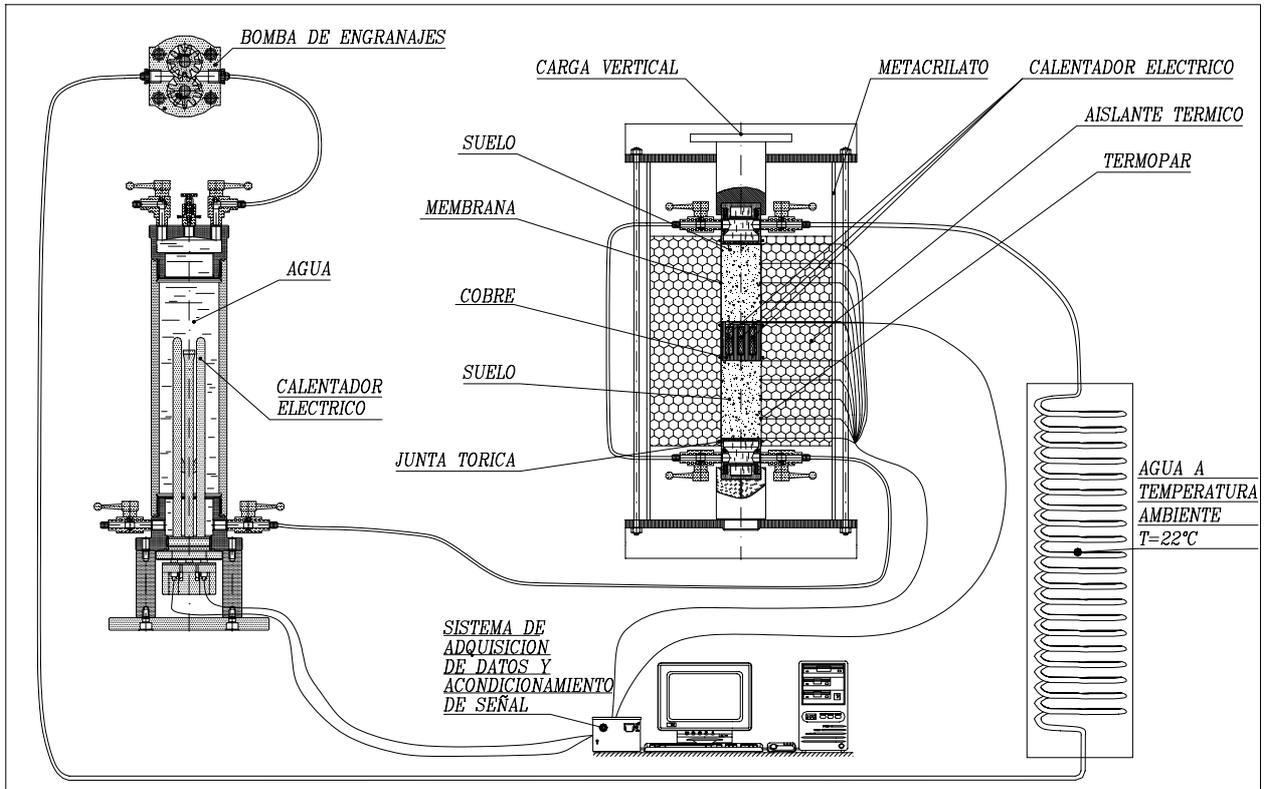


Figura 5.4.1.1 Célula de ensayo utilizada.



Figura 5.4.1.2 Calentador.

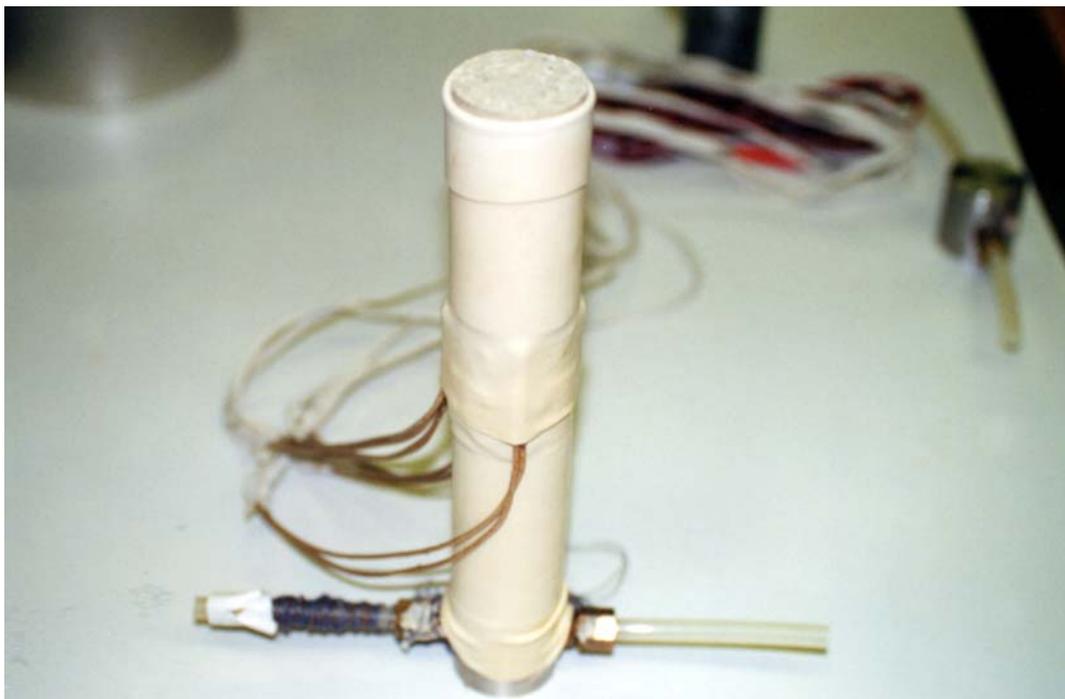


Figura 5.4.1.3 Muestras preparadas para el ensayo.

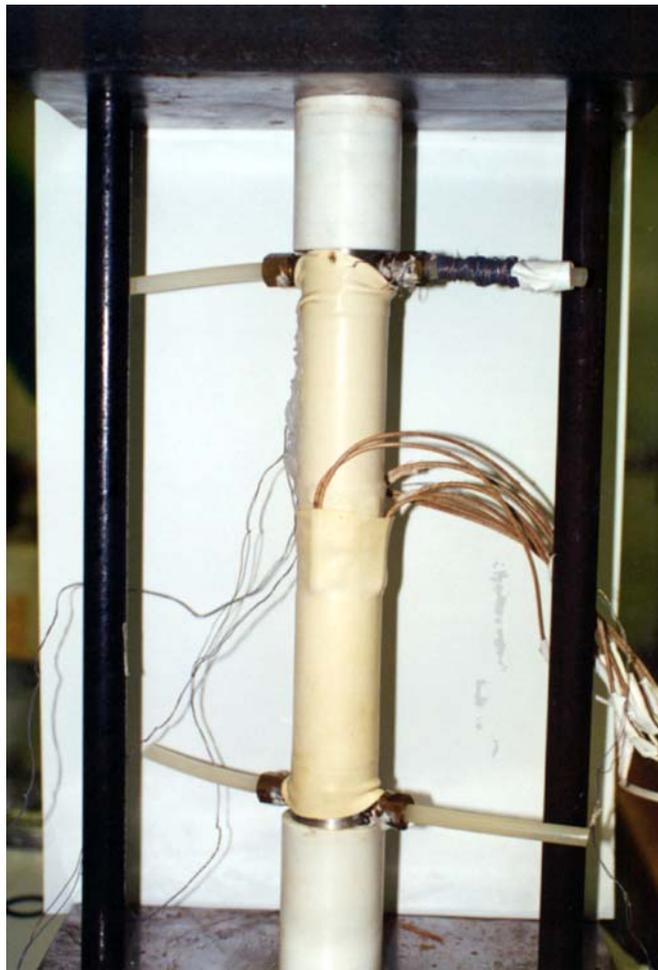


Figura 5.4.1.4 Muestras preparadas en la bancada de ensayo.

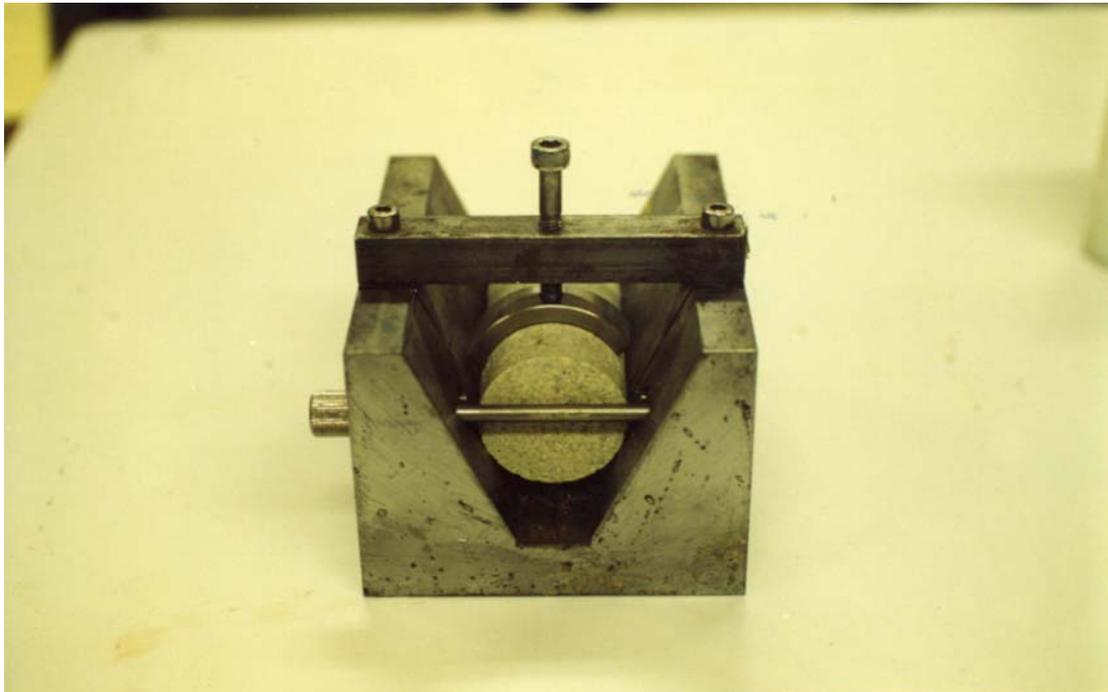


Figura 5.4.1.5 Muestra antes de ser cortada.

5.4.2 RESULTADOS OBTENIDOS

Se han realizado un total de cuatro ensayos donde se variaba la densidad seca inicial entre 1.56 y 1.63 g/cm³ y el grado de saturación inicial entre 55.1 y 88.3 %. En la tabla 5.4.2.1 se detallan la γ_d inicial, la ω inicial y el S_r inicial y final. También se ha considerado importante cuantificar la pérdida de agua.

La distribución de temperaturas en función del tiempo en varios puntos puede verse en las figuras 5.4.2.1-5.4.2.4. La longitud de las muestras es de 78 mm de longitud (L), los puntos de medida se encuentran en el calentador de cobre y a distancias de L/4, L/2 y 3L/4 del mismo. La distribución final de temperaturas es casi lineal en el estado estacionario (figura 5.4.2.5). En el contacto de la muestra con el calentador, la temperatura debería aumentar con el tiempo, ya que al secarse la muestra, disminuye su conductividad térmica; en la parte de la muestra cercana al extremo a temperatura constante, aumenta la humedad al condensar el vapor procedente del entorno del calentador, al aumentar la conductividad térmica, la temperatura disminuye. Estas variaciones de temperatura no siempre se aprecian, ya que son bajas, sin embargo, en las figuras 5.4.2.6 y 5.4.2.7, donde se muestra el resultado de un ensayo con un grado de saturación alto (79.8 %), se puede observar claramente esta variación de temperatura. La oscilación de la temperatura que aprecia en estas figuras tiene ciclos de 24 horas, esto se debe a que a pesar de estar la muestra en el interior de una célula aislada, se ve influida por el cambio de temperatura del laboratorio.

Ref ensayo	γ_d (g/cm ³) (inicial)	$\omega_{inicial}$	S_{ri}	S_{rf} (global)	Pérdida de agua (g/día)
130799a	1.56	15.00	55.10	53.03	0.12
010699a	1.59	15.86	60.56	58.44	0.12
170399a	1.63	15.33	62.38	62.38	0.0
060599a	1.62	22.50	88.30	79.80	0.36

Tabla 5.4.2.1 Lista de los ensayos presentados

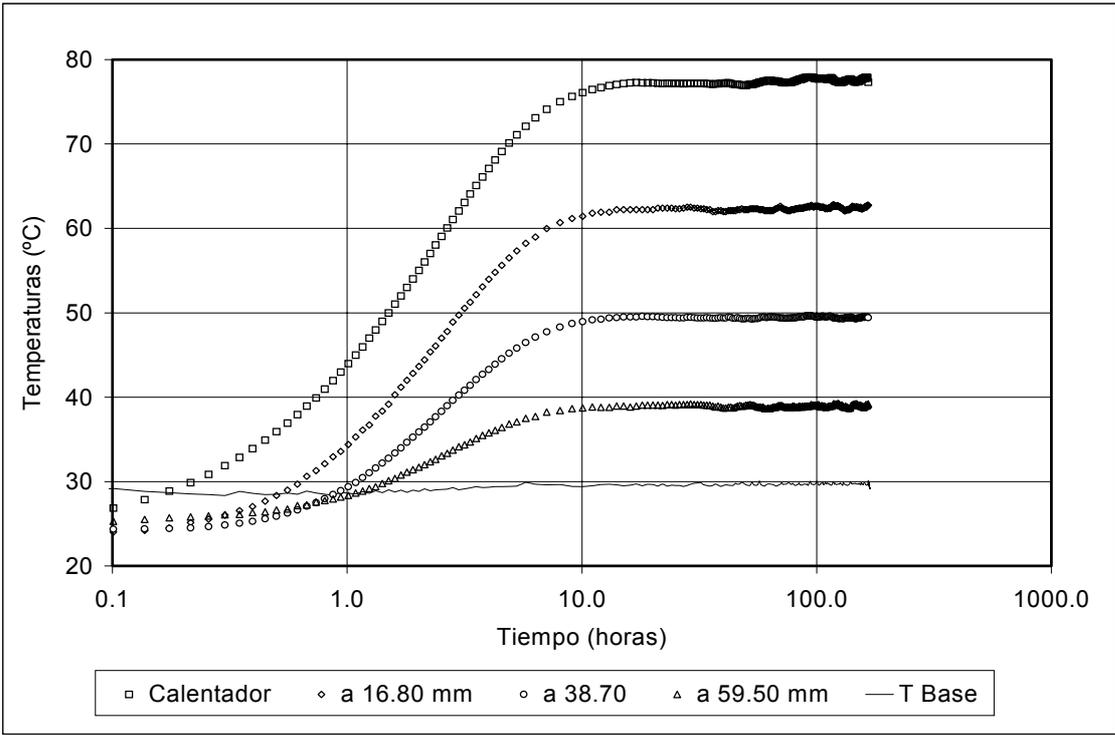


Figura 5.4.2.1 Evolución de las temperaturas en función del tiempo en varios puntos. Ensayo 130799a. $S_{rf}=53.03\%$. Calor inyectado=2.27 W

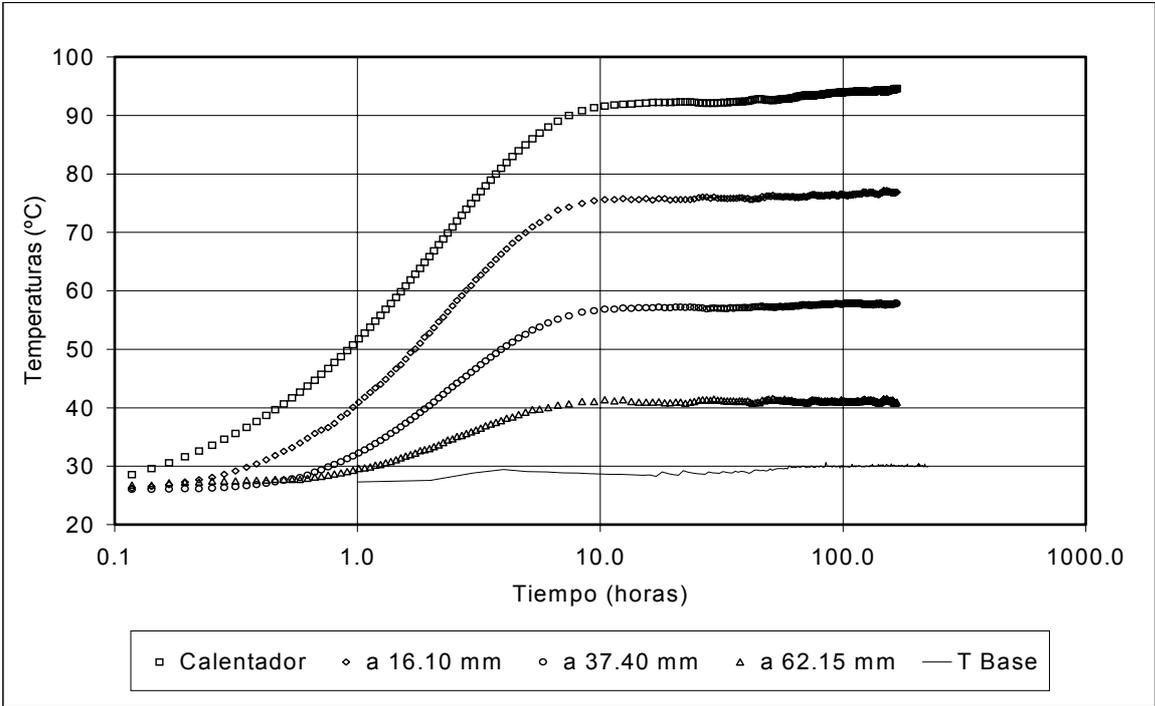


Figura 5.4.2.2 Evolución de las temperaturas en función del tiempo en varios puntos. Ensayo 010699a. $S_{rf}=58.44\%$. Calor inyectado=3.18 W

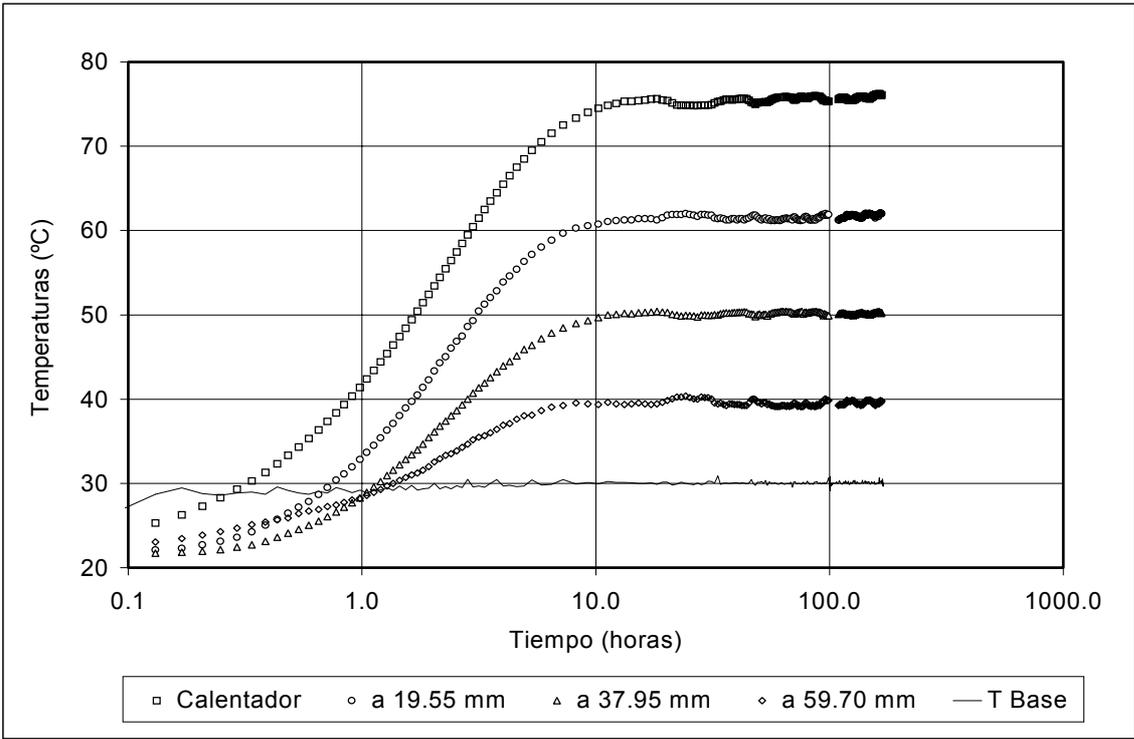


Figura 5.4.2.3 Evolución de las temperaturas en función del tiempo en varios puntos. Ensayo 170399a. $S_{rf}=62.38\%$. Calor inyectado=2.17 W.

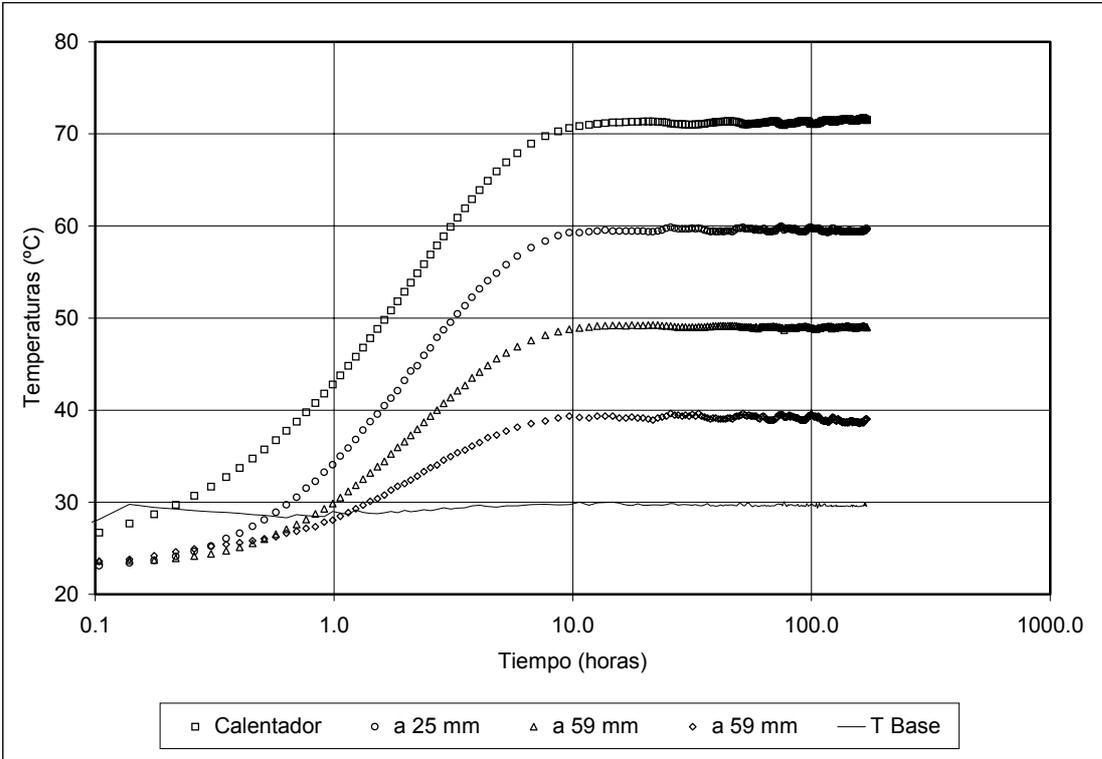


Figura 5.4.2.4 Evolución de las temperaturas en función del tiempo en varios puntos. Ensayo 060599a. $S_{rf}=79.8\%$. Calor inyectado=2.73 W.

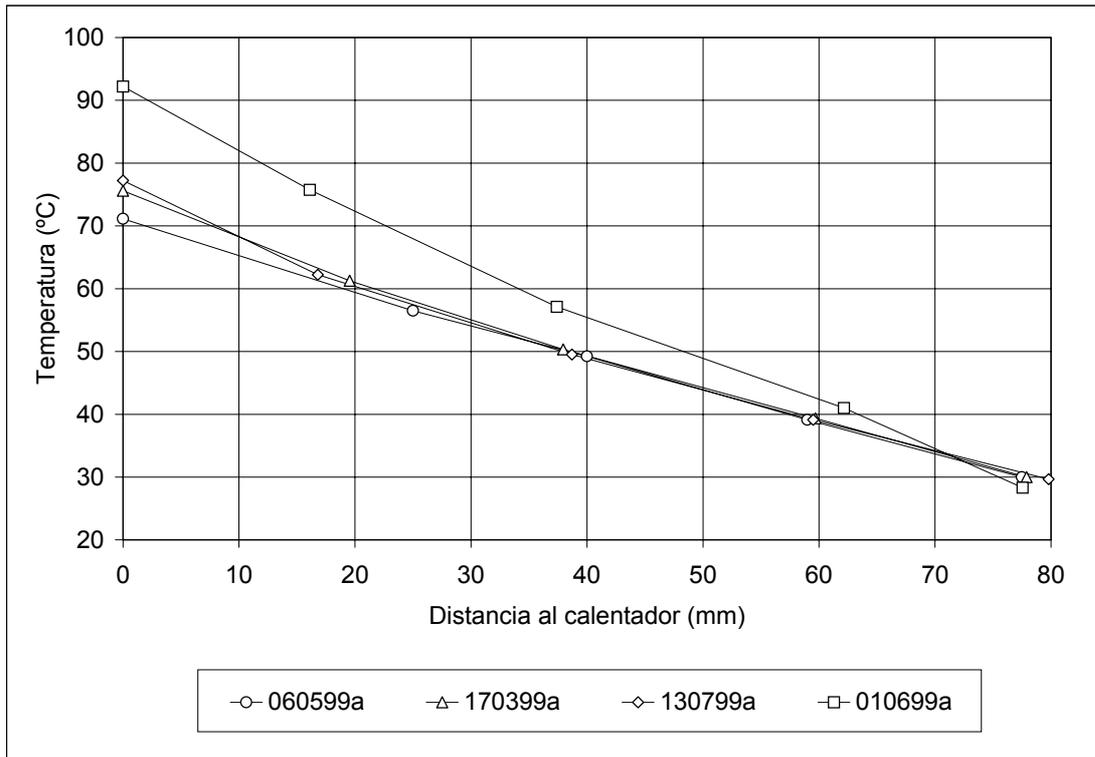


Figura 5.4.2.5 Temperaturas en función de la distancia al calentador en estado estacionario

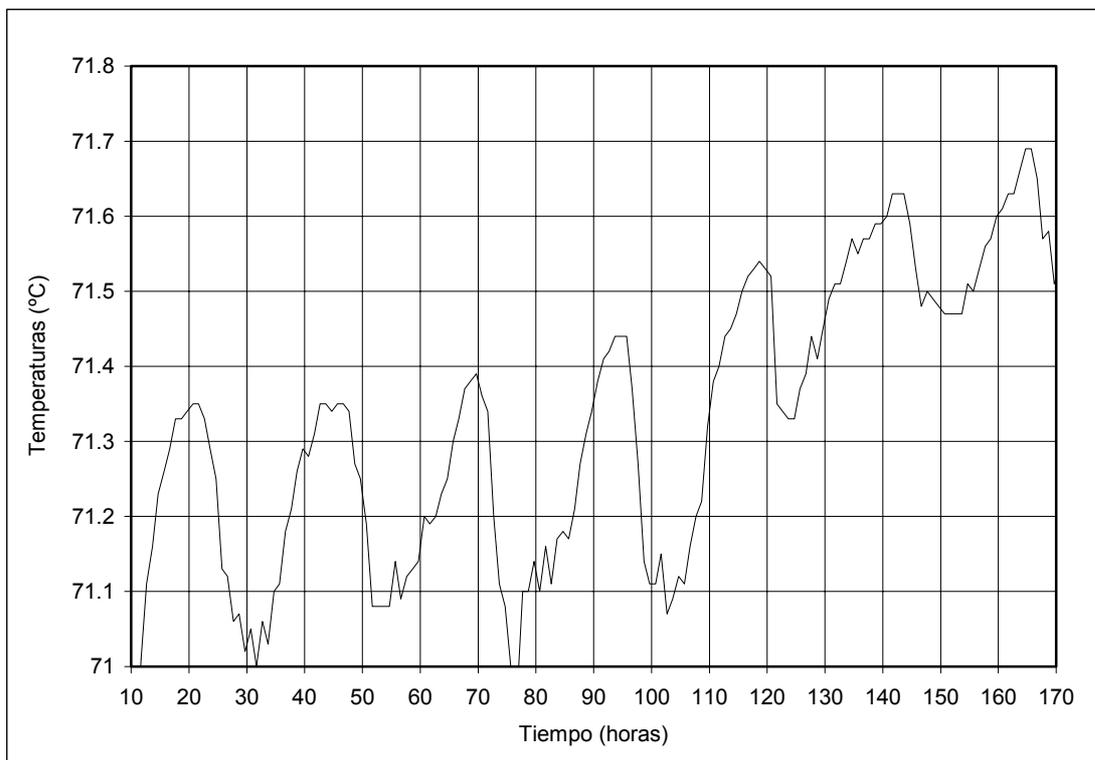


Figura 5.4.2.6 Temperatura en el calentador. Ensayo 060599a.

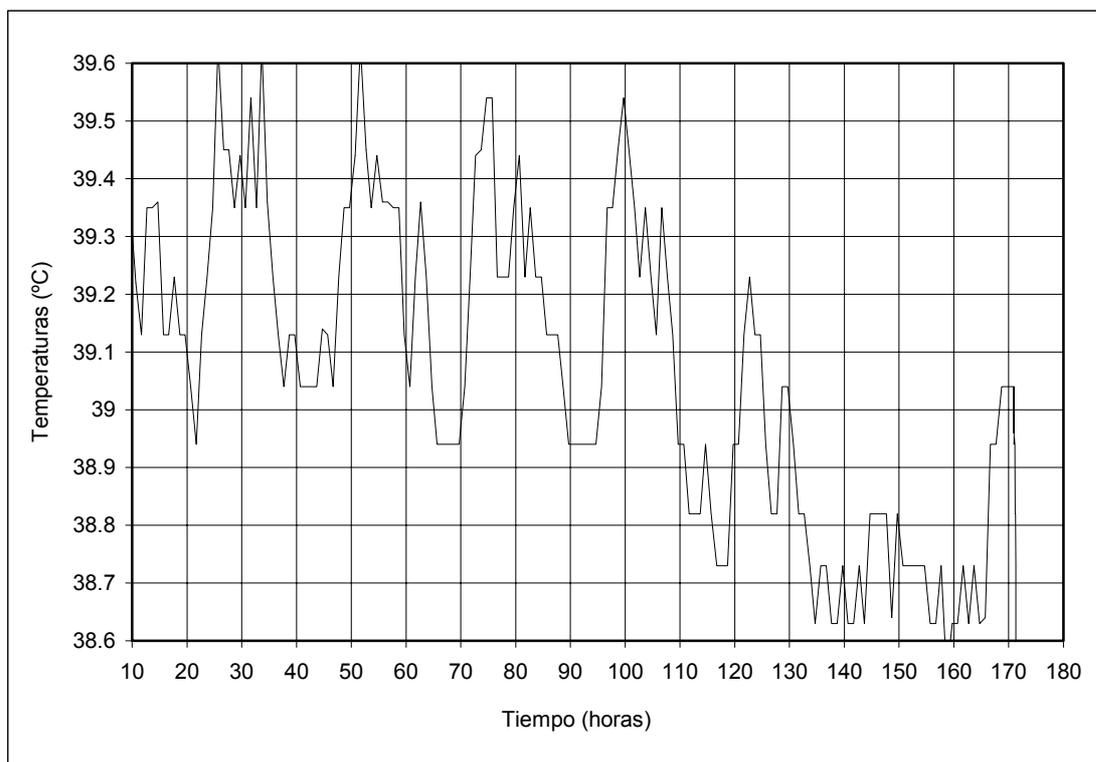


Figura 5.4.2.7 Temperatura en el centro de la mitad inferior de la muestra. Ensayo 060599a.

La distribución de humedad al final del ensayo puede verse en las figuras 5.4.2.8 y 5.4.2.9 y los diámetros finales en la 5.4.2.10 y 5.4.2.11. Las líneas a trazos reflejan el estado inicial y las líneas continuas, el final. En algunos ensayos, podían tenerse medidas anormales debido a la fuga de agua, que podía conllevar una retracción generalizada de la muestra en la que los diámetros finales medidos podían ser todos menores que el diámetro inicial o bien, humedades finales excesivamente bajas. Esto se pone de manifiesto en el ensayo con un grado de saturación del 88.3. %, en el cual, la humedad final promedio es visiblemente menor que la inicial. La pérdida de agua también se refleja en el diámetro promedio final, el cual, es claramente inferior al inicial. También se aprecia que la pendiente media de la distribución de humedad respecto al eje de la muestra depende de la cantidad de calor inyectado, a mayor cantidad, mayor pendiente. Con este ensayo se pretende encontrar la tortuosidad, la permeabilidad relativa al agua líquida y la conductividad térmica cuando la muestra está saturada. Puesto que estos parámetros se deben determinar a partir de la calibración del modelo, en este capítulo no se presentan resultados obtenidos y se deja para el siguiente capítulo, donde además, se detallará como se han obtenido.

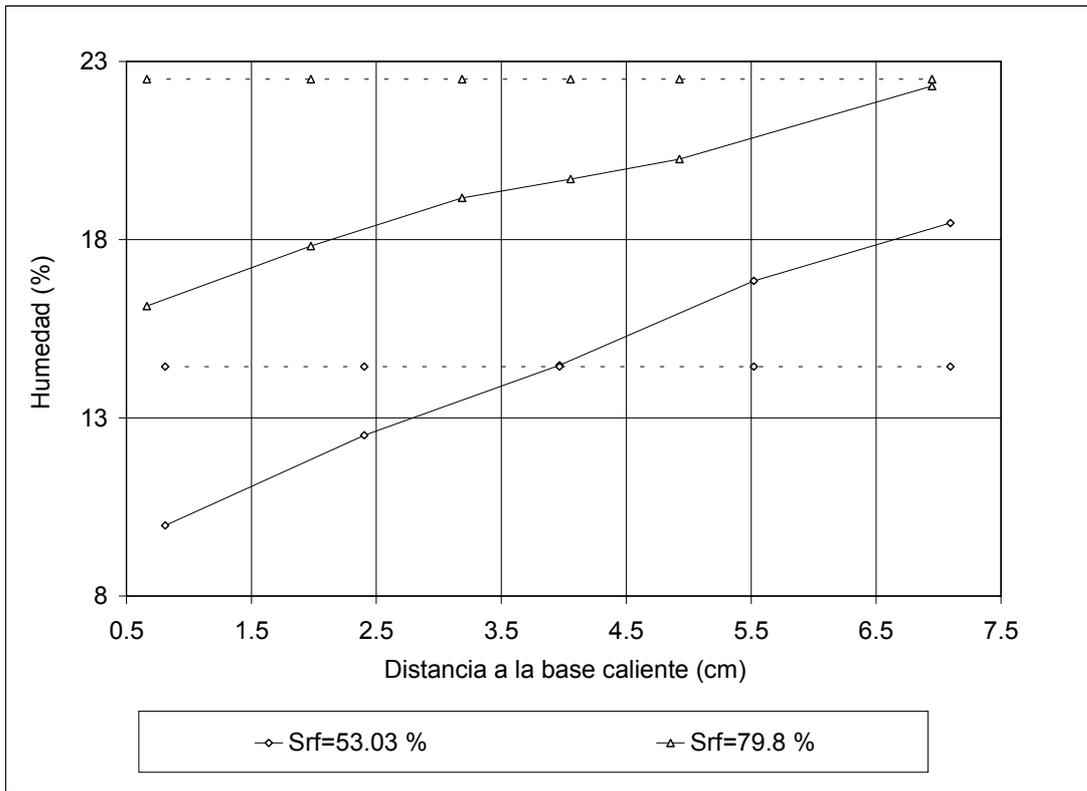


Figura 5.4.2.8 Distribución inicial y final de humedad en los ensayos 130799a y 060599a. Las líneas discontinuas indican las humedades iniciales.

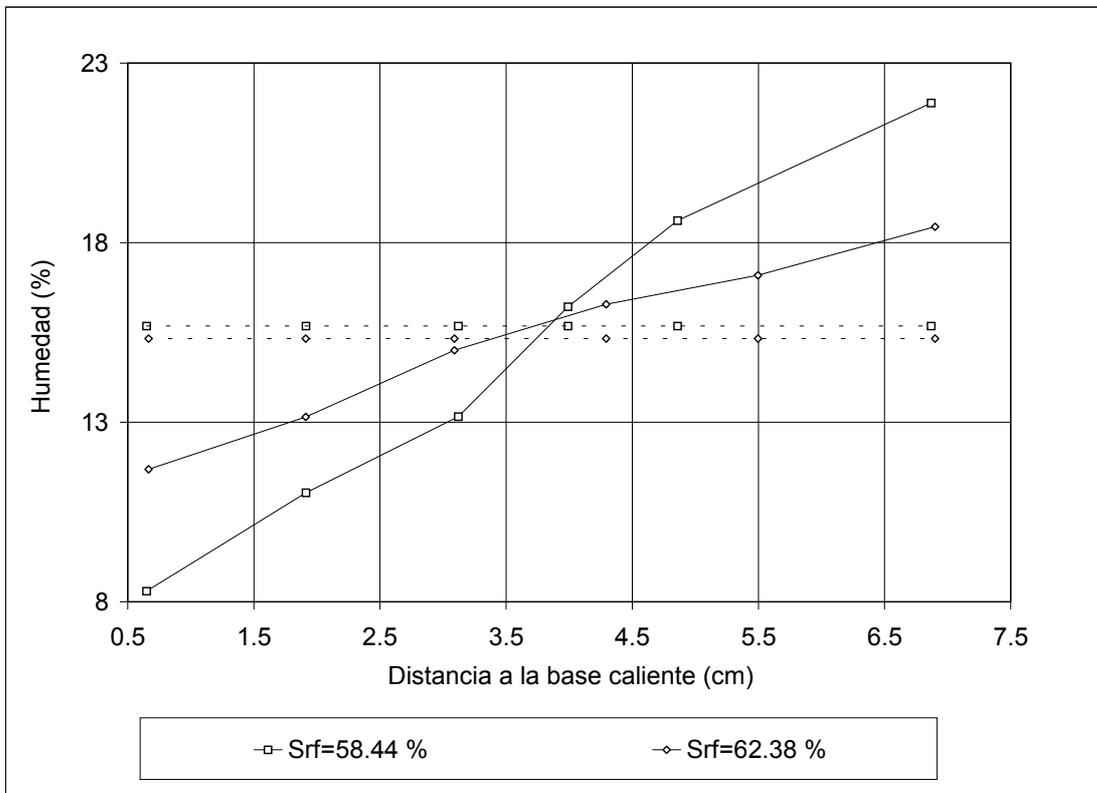


Figura 5.4.2.9 Distribución inicial y final de humedad en los ensayos 010699a y 170399a. Las líneas discontinuas indican las humedades iniciales.

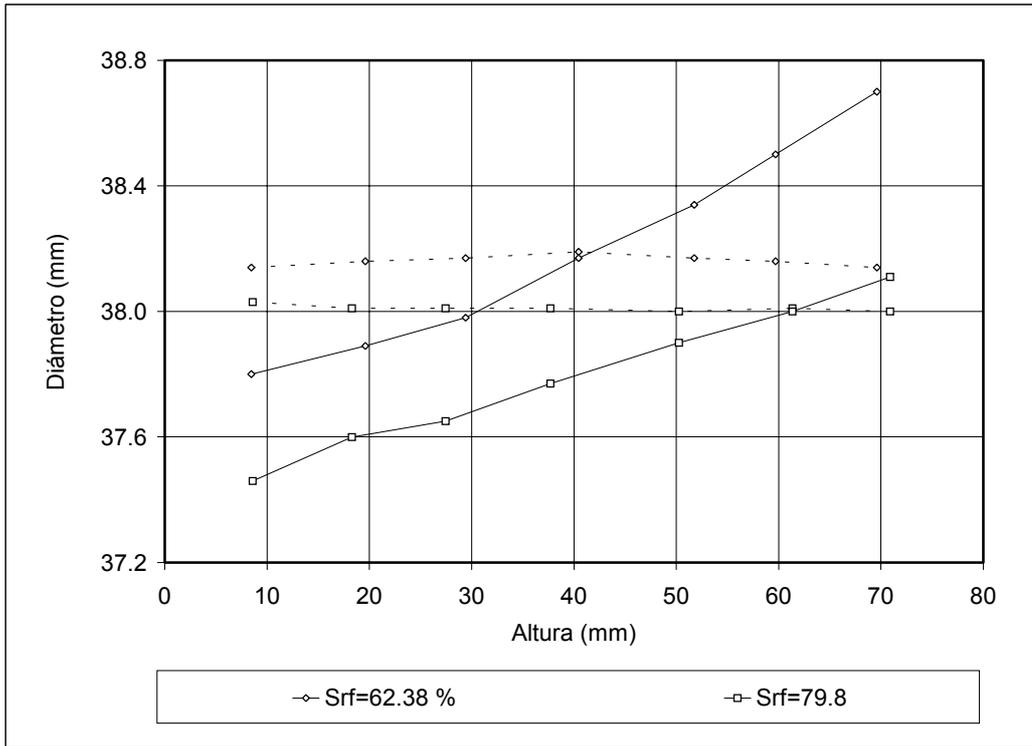


Figura 5.4.2.10 Diámetros iniciales y finales en los ensayos 170399a y 060599a. Las líneas discontinuas corresponden a los diámetros iniciales.

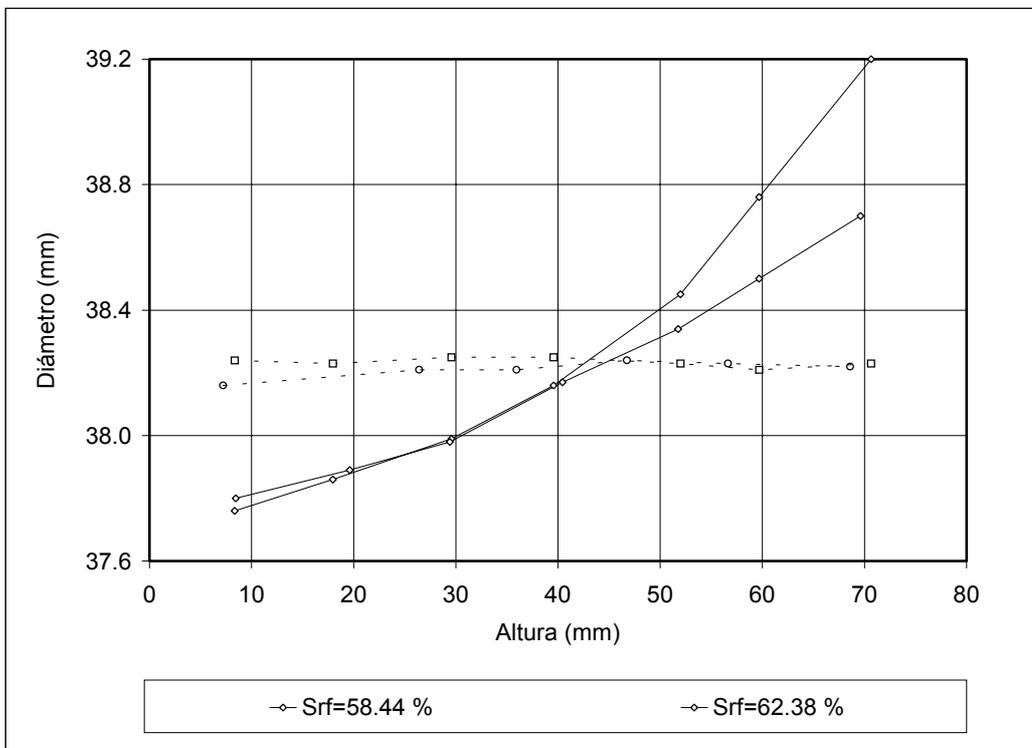


Figura 5.4.2.11 Diámetros iniciales y finales en los ensayos 010699a y 170399a. Las líneas discontinuas corresponden a los diámetros iniciales.

6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

6.1 SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE ENSAYOS

Uno de los objetivos planteados inicialmente en esta tesis, fue estudiar la posibilidad de utilizar los métodos numéricos como herramienta de ayuda en el diseño de equipos y en el estudio de los procesos termo-hidro-mecánicos (T-H-M), que tienen lugar en un ensayo de laboratorio.

Con este fin, se han realizado una serie de simulaciones numéricas que tienen como objetivo estudiar y analizar los fenómenos descritos en capítulos anteriores, los cuales se producen en las muestras que se ensayan con los equipos descritos en el capítulo precedente. Los ensayos considerados han sido los de un cambio de succión en un ensayo edométrico con succión controlada, la fase de enfriamiento en un ensayo de medida de la dilatación a humedad global constante y un ensayo de flujo de calor a través de una muestra con humedad global constante sin confinamiento.

El código de elementos finitos utilizado para realizar estos análisis, ha sido CODE_BRIGHT (Olivella, 1995). El pre-postproceso ha sido realizado con GiD (Ribó, 2000).

6.2 SIMULACIÓN DE ENSAYOS EDOMÉTRICOS

Este tipo de ensayos es sencillo de realizar y permite controlar con muy buena precisión las tensiones y desplazamientos verticales. El inconveniente es que las tensiones radiales no se conocen y este hecho dificulta utilizar estos ensayos para identificar parámetros de tipo mecánico al no conocerse la evolución de esta tensión. Sin embargo, es un ensayo muy útil para verificar modelos de manera cualitativa, validar los parámetros obtenidos con otros ensayos y, en caso de no disponer de éstos, acotarlos o bien obtener una aproximación que en algunos casos puede ser suficiente.

En los ensayos edométricos que se han realizado, la succión se ha controlado mediante transferencia de agua en forma de vapor, por tanto, el estudio del movimiento del

agua en fase gaseosa es de gran relevancia en el análisis de los resultados. En un ensayo edométrico con un cambio de succión, se tiene una fase transitoria cuya duración es determinante en el diseño de una campaña de ensayos. En una arcilla de las características de la utilizada en esta tesis, la duración de los ensayos es muy larga si se utilizan células que imponen la succión de manera estática (Esteban, 1990). Como se ha comentado en el capítulo 5, la succión se ha impuesto mediante un flujo de aire a través de la muestra cuando el grado de saturación es bajo, o por sus bases cuando es alto, lo que disminuye la duración de los ensayos. A continuación se estudia mediante modelación numérica el desarrollo de un escalón de reducción de succión haciendo énfasis en el análisis del efecto de ese flujo de aire

6.2.1 SIMULACIÓN DEL FLUJO DE GAS A TRAVÉS DE LA MUESTRA

El hecho de secar o humedecer las muestras al hacer circular aire con una humedad relativa impuesta a través de la misma, implica un nuevo mecanismo de cambio de succión. En los ensayos con imposición de succión sin circulación de aire, el vapor de agua se condensa o el agua líquida se evapora en la superficie de la muestra. Este hecho genera en el interior de la muestra un gradiente de presión de líquido (provoca un flujo advectivo) y de fracción másica de vapor en el gas (provoca un flujo no advectivo) que equilibra su succión con la humedad relativa de la atmósfera. Al final del proceso, la succión en la muestra es la misma en todos sus puntos.

La circulación de gas a través de la muestra, forzada por una bomba, implica que en estado estacionario entre aire mezclado con vapor por un extremo y salga por el otro. Esta circulación está asociada a un gradiente de presión de gas y presión de líquido de un extremo al otro que provoca el movimiento de las especies presentes en la muestra. En función del caudal de gas inyectado, la permeabilidad al líquido y la permeabilidad al gas, se tendrán unos gradientes de presión de gas y líquido determinados. Es importante que estos gradientes no sean excesivamente grandes, debido al hecho de que como se verá más adelante, las presiones de líquido en el interior de la muestra al alcanzar el estado estacionario, pueden alejarse de la que se pretende imponer. Por ello, se deberá cuidar que el caudal inyectado no sea excesivo para que la máxima diferencia de succiones entre dos puntos de la muestra en condiciones estacionarias sea aceptable.

A continuación, se expone la simulación del comportamiento de las diferentes fases presentes en el suelo durante un escalón de cambio de succión de 128 a 84 MPa en el ensayo correspondiente a la trayectoria 1 descrita en el capítulo anterior. En este ensayo, se ha utilizado la técnica de forzar un flujo de gas con humedad relativa controlada a través de la muestra para imponer la succión final.

6.2.1.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL

Para el análisis numérico, se ha utilizado una malla unidimensional de 25 nodos equiespaciados y 24 elementos. Las variables del sistema han sido el desplazamiento vertical, la presión de líquido, la presión de gas y la temperatura.

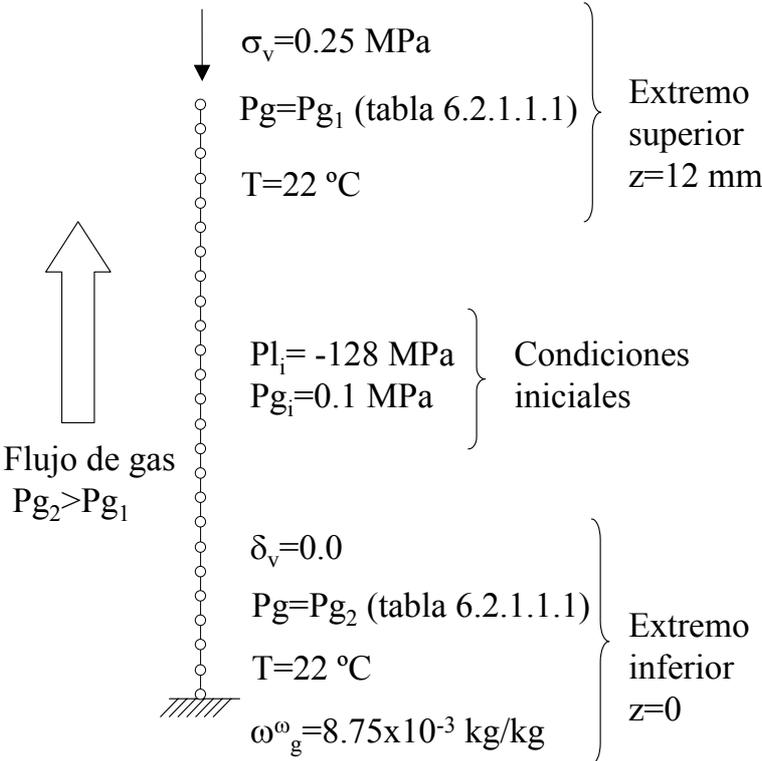


Figura 6.2.1.1.1. Modelo conceptual del ensayo

	Pg ₁ (MPa)	Pg ₂ (MPa)	ΔPg (MPa)	A gas
Caso 1	0.098	0.102	0.004	3.85E+09
Caso 2	0.08	0.12	0.04	3.85E+09
Caso 3	0.098	0.102	0.004	3.85E+08
Caso 4	0.08	0.12	0.04	3.85E+08

Tabla 6.2.1.1.1 Valores del incremento de presión de los extremos de la muestra y del parámetro A en la permeabilidad del gas utilizados en los diferentes casos analizados.

La técnica de hacer circular el aire a través de la muestra permite trabajar con un depósito donde la relación volumen/superficie de evaporación acelera el equilibrio entre la disolución y la atmósfera que la rodea, también acelera el cambio de succión al añadir el mecanismo de transporte de vapor advectivo a la difusión molecular para secar o humedecer la muestra. En esta simulación, el mecanismo de difusión molecular no se ha tenido en cuenta en los contornos de la muestra puesto que a la luz de los resultados obtenidos en el laboratorio (el tiempo de equilibrado puede descender de tres semanas a cuatro días según el movimiento de vapor sea debido a difusión o se imponga la circulación forzada del aire), puede considerarse despreciable, aunque posteriormente se estudiará este mecanismo al simular el secado de las muestras cuando el gas circula sólo por las piedras porosas.

Dado que la velocidad del gas pudiera ser elevada, también debe comprobarse si se cumple la hipótesis de equilibrio entre fases (ecuaciones referentes a la ley de Henry y a la ley psicrométrica), Carrera y Galarza (1991), lo que permite que no se tengan que formular las ecuaciones de cambio de fase. El equilibrio entre las fases de vapor y líquido del agua se cumple si el tiempo necesario para que se verifique la ley psicrométrica a partir de unas condiciones locales arbitrarias es mucho menor que el tiempo necesario para que se produzcan los procesos de infiltración. La validez de la ley psicrométrica se comprueba al calcular el tiempo necesario para que una molécula de agua situada en el perímetro de un poro de tamaño D_{90} llegue al centro del mismo por difusión molecular. Este tiempo se compara con el tiempo necesario para que una molécula de vapor atraviese este mismo poro moviéndose por diferencias de presión. Si el primer tiempo es mayor que el segundo, significa que en la fase gaseosa no se tiene equilibrio local al “pasar de largo” el gas que circula por advección, sin equilibrarse con el gas del poro. Por otra parte, se asume que el paso del agua de la pared del poro al interior del suelo es instantáneo. Para las temperaturas sucede lo mismo: las tres

fases deben permanecer juntas el suficiente tiempo como para que tengan las tres la misma temperatura. Esta explicación intuitiva se puede traducir a lenguaje matemático. El tiempo adimensional para los procesos de difusión se define: $t_{DD} = \frac{Dt}{l^2}$, donde t_{DD} es el tiempo adimensional de difusión, D es la difusividad, l es una longitud característica y t es el tiempo real.

De todos los procesos de movimiento de agua líquida en el suelo, el más rápido es la infiltración, que se puede caracterizar como $t_{Di} = \frac{it}{\phi l}$, donde t_{Di} es el tiempo adimensional para la infiltración, Φ la porosidad e i la velocidad (LT^{-1}). Al cociente entre el tiempo adimensional de difusión y el tiempo adimensional de advección se denomina número de Peclet, que cuantifica cual de los dos procesos es más importante. Si se toman valores extremos (infiltración en una arena gruesa, con $\Phi=0.5$, $D=0.1 \text{ cm}^2/\text{s}$, $l=0.1 \text{ cm}$ e $i=0.01 \text{ cm/s}$), se tiene que la infiltración es 50 veces más lenta que el equilibrio entre el vapor y la fase líquida. En caso de flujo de gas, hay que afinar mejor los valores de l al tener una velocidad del vapor mayor. En esta arcilla se supone $l=(1/2)D_{90}$, con lo que el valor de l es 0.005 cm si se supone que D_{90} es del orden de $100 \text{ }\mu\text{m}$. En estos ensayos, hay una inyección de gas con una velocidad máxima del gas de 2.4 cm/s , con lo que se tiene que el flujo advectivo de aire es diez veces más lento que los procesos de difusión en los poros. Puesto que el valor de l asociado al diámetro de los poros aplicado puede considerarse como una cota superior, se puede garantizar el equilibrio de fases.

Puesto que en este ensayo no hay indicios de cambio de temperatura, se supone que existe equilibrio térmico, por lo que se considera que se cumple la restricción de equilibrio de fases tanto en presiones como en temperaturas.

La masa de aire transportada por flujo advectivo es varios órdenes de magnitud superior que la que transporta el agua en disolución, por lo que la validez o no de la ley de Henry tampoco tiene importancia en este caso.

El estudio del flujo a través de la muestra implica tener en cuenta el flujo advectivo del aire húmedo que circula por la misma. Este flujo se calcula siguiendo la ley de Darcy. El

programa CODE_BRIGHT calcula la permeabilidad al gas teniendo en cuenta la permeabilidad intrínseca, la densidad del fluido y el factor de permeabilidad relativa

La expresión elegida para relacionar la permeabilidad al gas k_g con la permeabilidad intrínseca k_{0g} y la permeabilidad relativa k_{rg} de este material es: $k_g = k_{0g} k_{rg} = A k_{0l} k_{rg}$. Para poder tener en cuenta este hecho, se introduce un parámetro A que multiplica a la permeabilidad intrínseca del modelo para aumentar la permeabilidad al gas. La permeabilidad intrínseca para un gas en este material es varios órdenes de magnitud superior a la del líquido. Para la arcilla ensayada en esta tesis, el valor obtenido por Villar (2000) es $k_{0g} = 4 \times 10^{-12} \times e^{4.17} \text{ m}^2$, donde e es el índice de poros. La permeabilidad relativa k_{rg} se puede evaluar como $k_{rg} = S_g^n$, donde $S_g = I - S_r$ y n un parámetro del modelo que en este material se cuantifica en 4.30, según Lloret et al. (1999). El valor aproximado del parámetro A obtenido a partir de los resultados de Villar (2000) para las características de la muestra simulada, es de 3.85×10^8 .

Se ha realizado un estudio de sensibilidad a la permeabilidad al gas y la diferencia de presión entre los extremos de la muestra según los valores que se muestran en la tabla 6.2.1.1.1.

Puesto que lo que se pretende modelar es el efecto de un solo escalón de cambio de succión, se ha decidido utilizar un modelo mecánico de superficies de estado para poder comparar desplazamientos medidos en los ensayos con desplazamientos calculados por el programa. La ley utilizada ha sido (Lloret y Alonso, 1985):

$$\Delta \varepsilon_v = \alpha_1 \times \ln(\sigma - P_g) + \alpha_2 \times \ln(P_g - P_l + 0.1) + \alpha_3 \times \ln(\sigma - P_g) \times \ln(P_g - P_l + 0.1)$$

$\alpha_1 = -0.12$, $\alpha_2 = -0.067$ y $\alpha_3 = -0.006$. α_1 y α_3 tienen el mismo valor que el utilizado por Gens et al. (1998) en base a otros ensayos (Villar, 2000) no recogidos en esta tesis; α_2 se ajusta a partir de la deformación medida en el escalón analizado, el valor utilizado en Gens et al. (1998) es -0.06.

Las condiciones iniciales en todos los casos han sido una porosidad de 0.404, una presión de gas de 0.1 MPa, una presión de líquido de -128 MPa y una temperatura de 22 °C. El gas que entra por un extremo de la muestra tiene una humedad relativa del 54 %, que equivale, a una temperatura de 22°C, a una fracción másica de vapor en el gas entrante de 8.75×10^{-3} kg/kg y a una densidad del gas de 1.169 kg/m^3 . La temperatura se fija en el nodo de entrada. En el otro extremo no se fija ni la humedad relativa ni la densidad del gas, que son grados de libertad, aunque sí se fija la temperatura. La succión de equilibrio sería de 84 MPa si el ensayo fuese estático. En cada uno de los extremos se ha impuesto una presión de gas fija e igual a los valores de la tabla 6.2.1.1.1. Según mediciones realizadas en el laboratorio, los valores de los gradientes de presiones impuestos por la bomba son parecidos a los de los casos 1 y 3. Los casos 2 y 4 se han estudiado para realzar el efecto de estos gradientes en el desarrollo del ensayo. Por otra parte, como se indica más adelante, utilizar una mayor permeabilidad al gas ($A=3.85 \times 10^9$) ha permitido obtener evoluciones de las deformaciones de la muestra que se ajustan más a la realidad que las predicciones realizadas con el valor del parámetro A derivado de los ensayos de Villar (2000).

6.2.1.2 RESULTADOS OBTENIDOS

En la figura 6.2.1.2.1 se pueden apreciar resultados de la simulación con los gradientes indicados en la tabla 6.2.1.1.1. Se comparan las cuatro simulaciones con los resultados obtenidos en un ensayo edométrico con succión controlada en términos de desplazamiento vertical, al ser la única magnitud física medida directamente durante el desarrollo del ensayo. Puede observarse que la deformación final a la que se llega no es igual en los cuatro casos. Esto se debe a que la succión de equilibrio de la muestra no es la misma en todos ellos, como puede deducirse de las figuras 6.2.1.2.2 y 6.2.1.2.3. Con el conjunto de parámetros correspondiente al caso 1 se ha conseguido un buen ajuste entre los desplazamientos verticales medidos y calculados.

De las figuras 6.2.1.2.2 y 6.2.1.2.3 se deduce que el flujo advectivo del agua se produce en sentido contrario al gradiente de presiones de gas, sin embargo, el flujo no advectivo se produce en el mismo sentido. Intuitivamente no parece lógico puesto que la densidad de vapor en el extremo de entrada de aire es mayor que en el opuesto, sin embargo, el flujo no advectivo viene regulado por el gradiente de la fracción másica y no por el de

densidad de vapor (ley de Fick). El valor de la densidad de vapor está afectado por la presión de gas, que es mayor a la entrada que a la salida de la muestra.

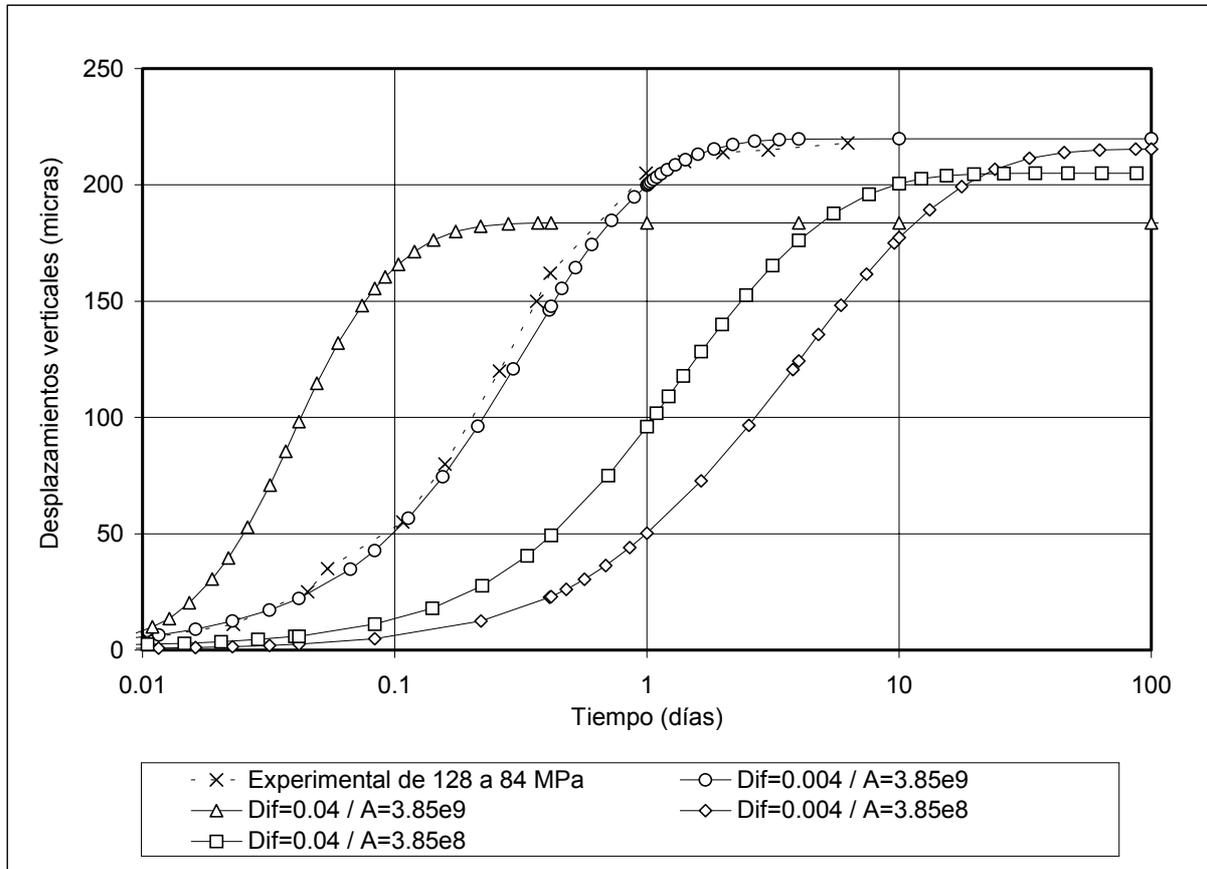


Figura 6.2.1.2.1 Evolución temporal de los desplazamientos medida y calculada para los cuatro casos indicados en la tabla 6.2.1.1.1. Los resultados experimentales pertenecen a una muestra con las siguientes características: $\gamma_{di}=1.62 \text{ g/cm}^3$, $\gamma_{df}=1.55 \text{ g/cm}^3$, $\sigma_v=0.15 \text{ MPa}$ (trayectoria número 1).

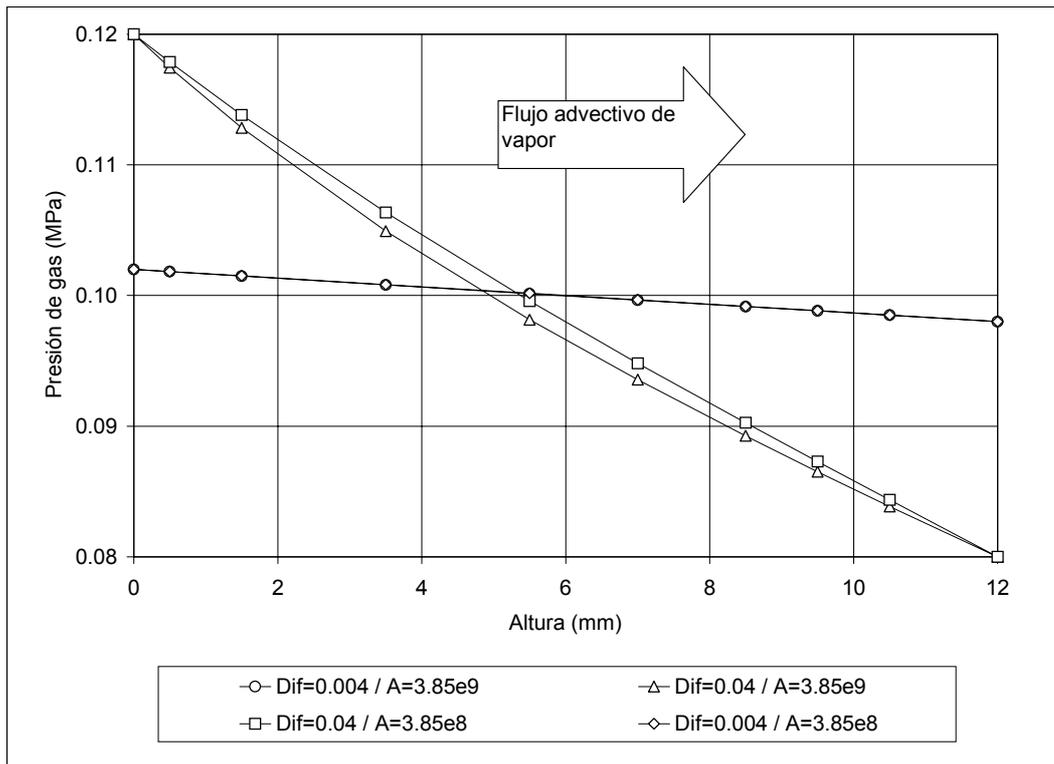


Figura 6.2.1.2.2 Presión de gas en estado estacionario.

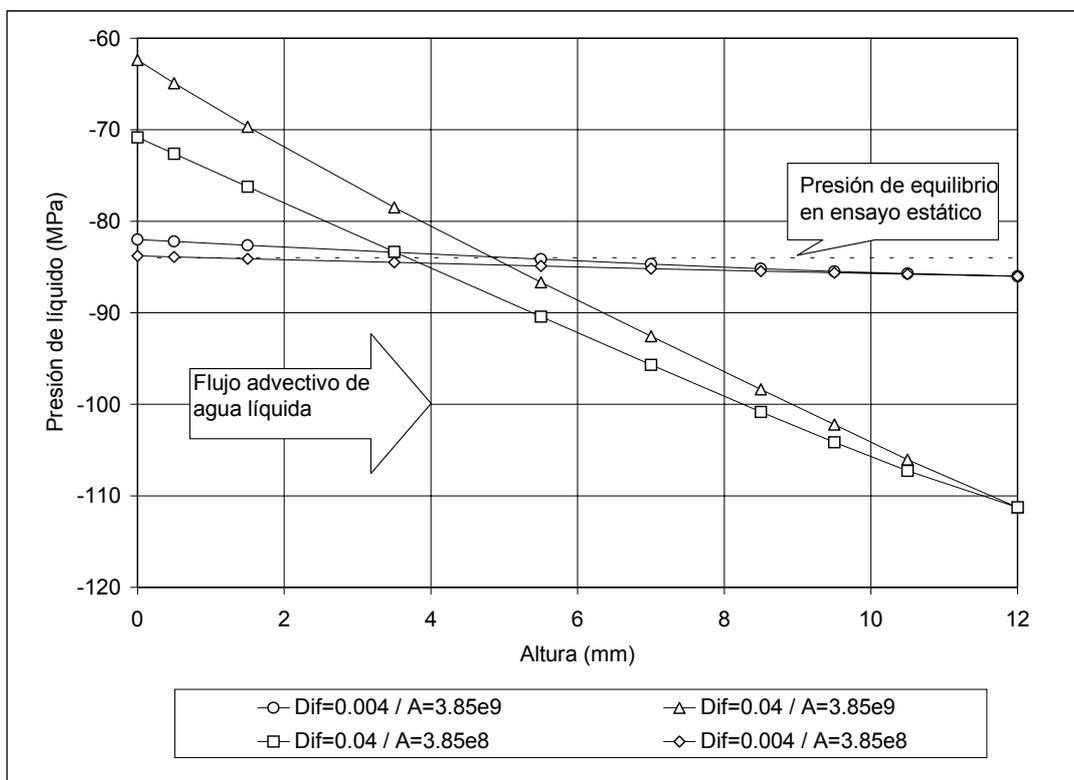


Figura 6.2.1.2.3 Presión de líquido en estado estacionario.

El flujo de agua se produce básicamente en forma de vapor por advección, mezclado con el aire seco. El flujo de vapor por difusión molecular y el flujo de agua líquida son varios órdenes de magnitud menores que el anterior. En el caso donde $\Delta P_g = 0.004$ MPa y $A = 3.85 \times 10^9$ y en condiciones estacionarias, el caudal de vapor másico en el nodo de entrada es 2.71×10^{-5} de kg/sm^2 , el flujo advectivo de vapor calculado varía entre 2.69×10^{-5} kg/sm^2 en el elemento de entrada de gas y 2.71×10^{-5} en el de salida, el flujo de agua líquida varía entre 2.29×10^{-7} kg/sm^2 en el elemento de entrada y 8.88×10^{-8} en el de salida. La suma de ambos flujos es igual al flujo de entrada El flujo no advectivo de vapor medio es de 2.28×10^{-8} kg/sm^2 en sentido contrario a los anteriores.

En la figura 6.2.1.2.4 puede apreciarse la fracción másica de vapor en el gas en condiciones estacionarias. Se observa que la ω_g^0 en el nodo de salida es igual a la ω_g^0 del gas que entra, con lo que se cumple que la masa de vapor que entra es igual a la que sale. Puede observarse también que para que se produzca el gradiente de presión de líquido, una parte del vapor que entra inmediatamente pasa a forma líquida, reduciendo la succión del elemento de entrada y generando un flujo advectivo de agua líquida en la dirección del flujo de gas.

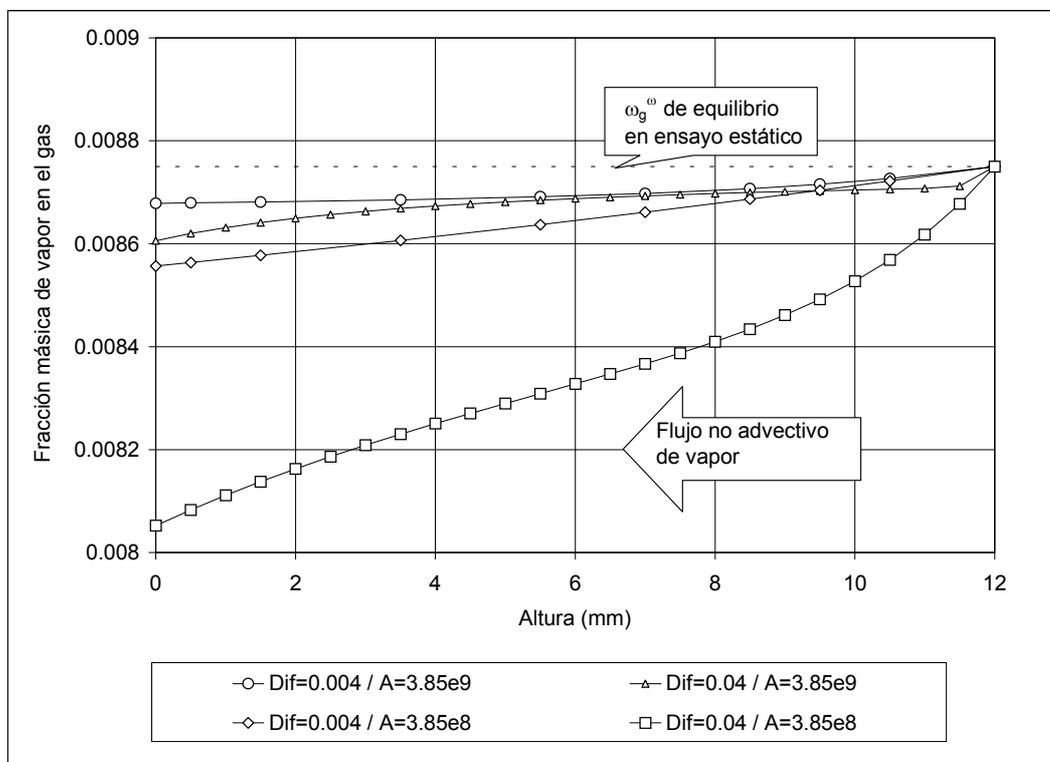


Figura 6.2.1.2.4 Fracción másica de vapor en el gas en estado estacionario.

Se han analizado los resultados de la modelación del caso 1 durante la fase transitoria. En la figura 6.2.1.2.5, puede observarse que la cantidad de vapor que entra en la muestra va disminuyendo con el tiempo debido a que la muestra se vuelve menos permeable al gas a medida que aumenta el grado de saturación. Es interesante resaltar también que hasta que se alcanzan las condiciones estacionarias, la cantidad de vapor que entra es mayor que la que sale, motivo por el que aumenta el grado de saturación de la muestra. Por otra parte, puede observarse como a partir de unas 45 horas, se alcanzan las condiciones estacionarias y el vapor que entra es igual al que sale.

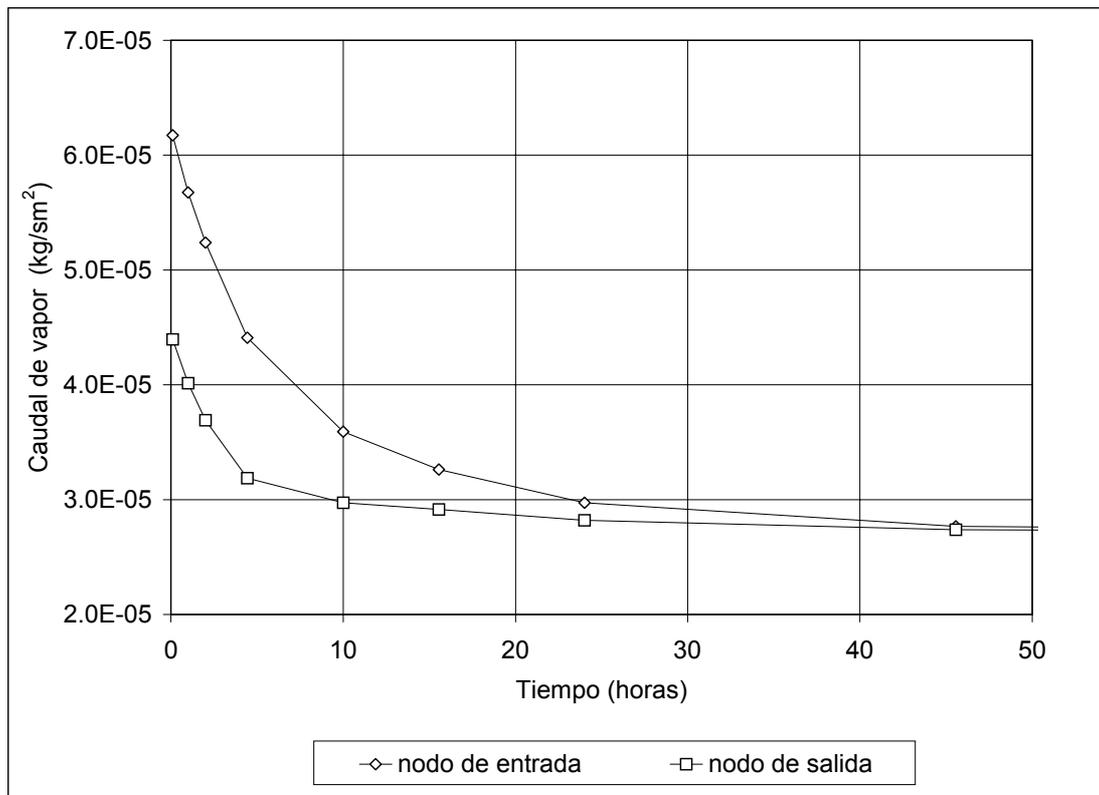


Figura 6.2.1.2.5 Caudal de vapor en los nodos de entrada y salida durante la fase transitoria del caso 1.

En la figura 6.2.1.2.6 se presenta la distribución de la presión de gas en la muestra en varios tiempos durante el escalón de cambio de succión. Como puede apreciarse, la presión de gas en el centro de la muestra disminuye hasta alcanzar un mínimo, que se produce a las pocas horas de comenzar a inyectar el gas, posteriormente vuelve a aumentar hasta recuperar una distribución prácticamente lineal a lo largo de la muestra.

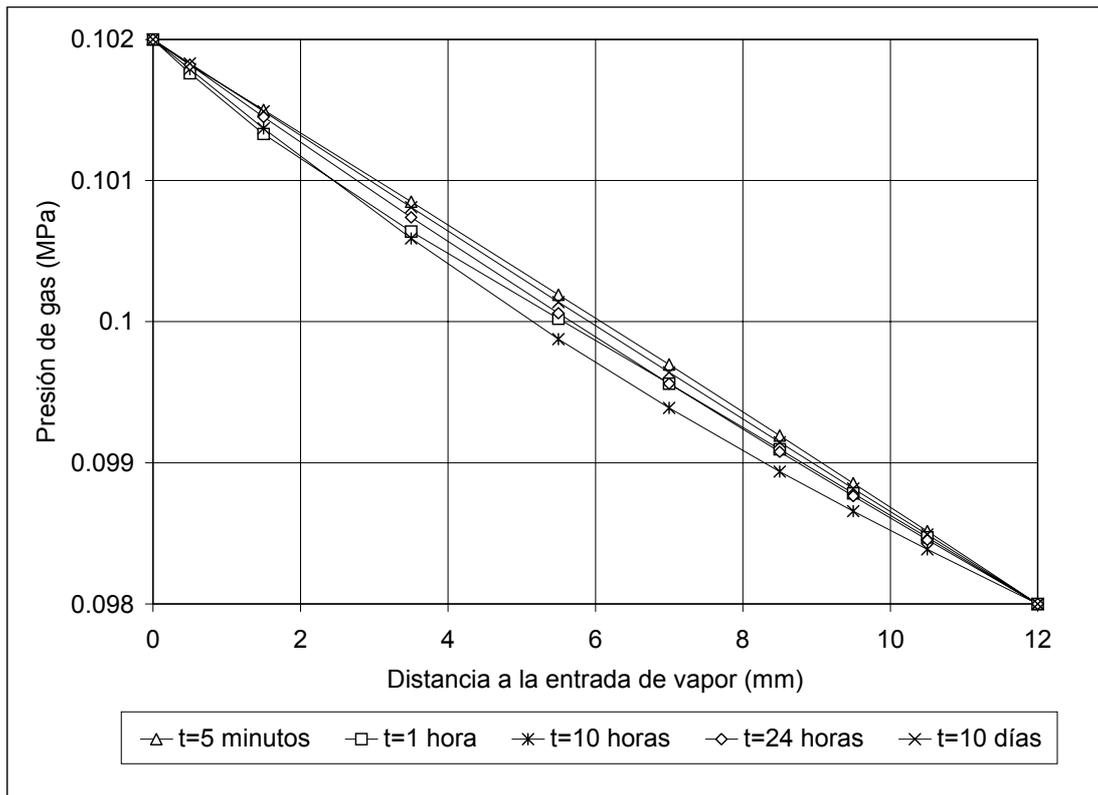


Figura 6.2.1.2.6 Presión de gas durante la fase transitoria del caso 1.

En las figuras 6.2.1.2.7 y 6.2.1.2.8 se dibuja la distribución de la presión de líquido y la fracción másica del vapor en el gas respectivamente. Puede observarse que el sentido del flujo de agua líquida y de vapor no advectivo son iguales excepto cuando se van a alcanzar condiciones estacionarias.

De los resultados obtenidos, se deduce que si bien la técnica de imponer flujo de aire a través de la muestra reduce sensiblemente el tiempo necesario para llegar a las condiciones estacionarias, puede provocar errores al llegar a una succión distinta de la que se pretendía inicialmente. El método de ensayo para garantizar los resultados obtenidos consiste en estimar la permeabilidad al gas, factor fundamental que determina la viabilidad del ensayo, y en controlar el flujo de gas que circula por la muestra. En la figura 6.2.1.2.9 se representa la succión en el nodo intermedio de la muestra en condiciones estacionarias para cada uno de los cuatro casos analizados. Puede observarse que si el gradiente de presión es excesivo, la succión de equilibrio dista mucho de la que se pretende imponer. Por tanto, para asegurar desde un punto de vista práctico el correcto desarrollo del ensayo, es necesario mantener un

gradiente de presión de gas no excesivamente alto, para ello puede ser interesante controlar mediante un transductor el valor de la presión de gas a la entrada de la muestra.

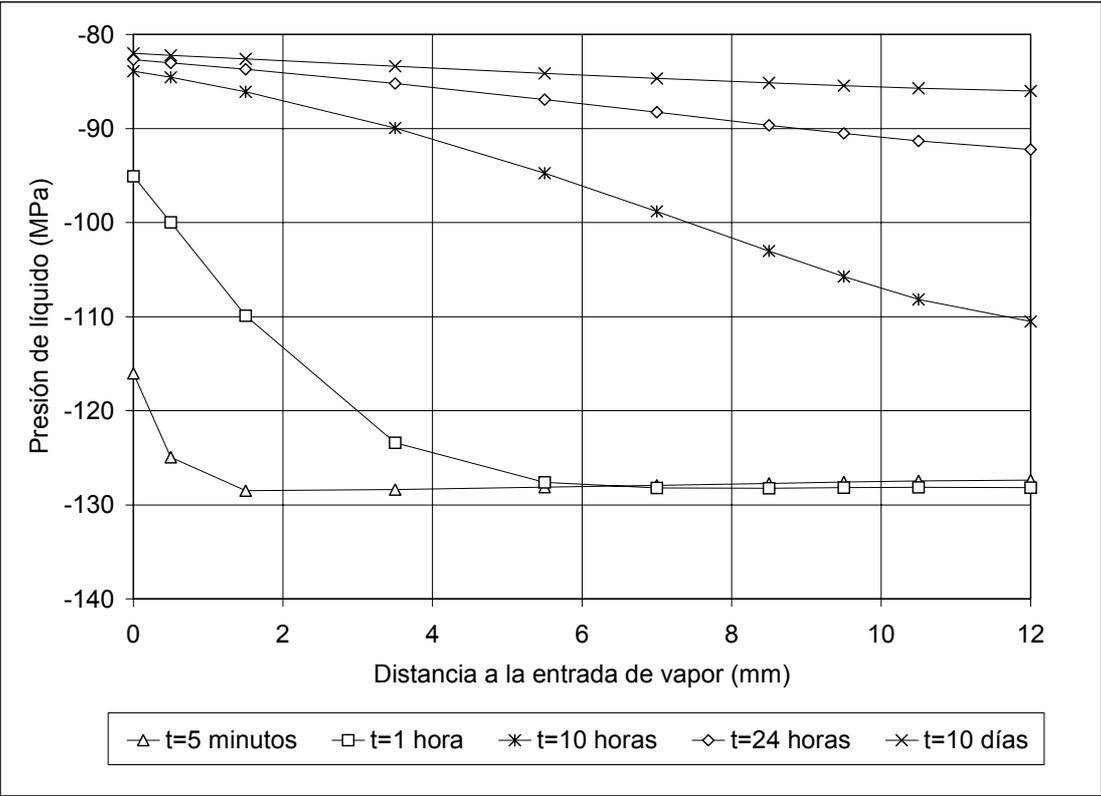


Figura 6.2.1.2.7 Presión de líquido durante la fase transitoria del caso 1.

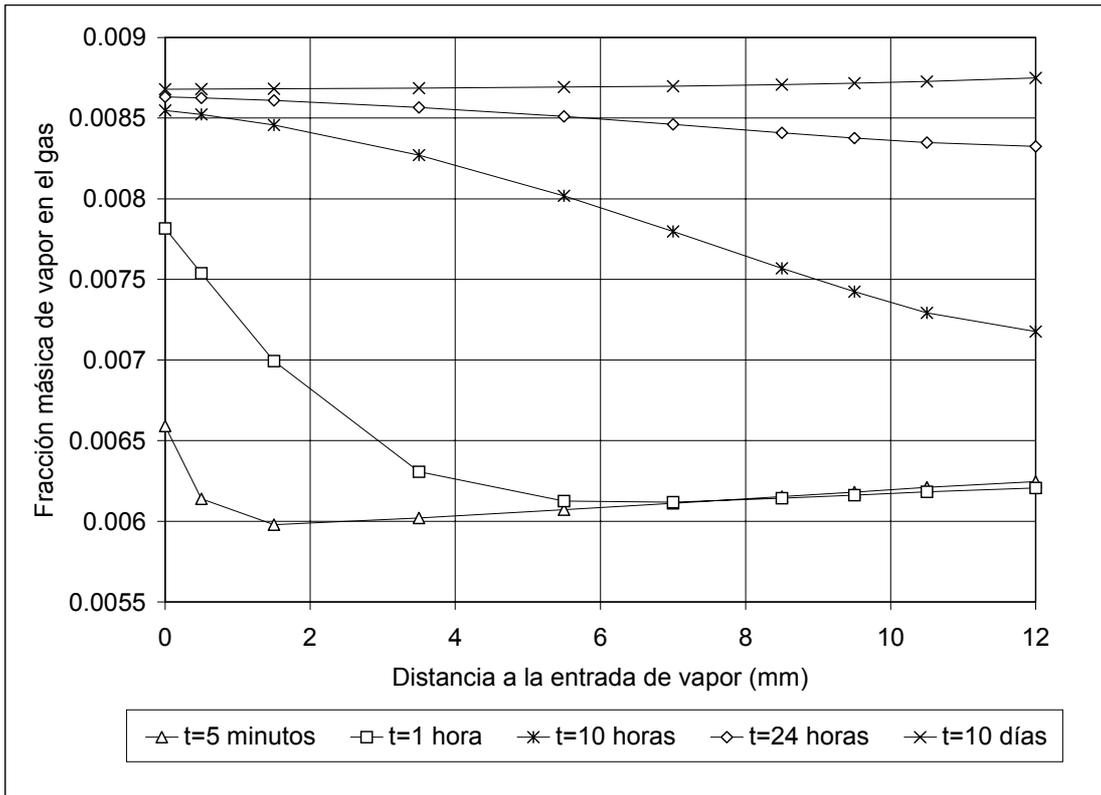


Figura 6.2.1.2.8 Fracción másica de vapor en el gas durante la fase transitoria del caso 1.

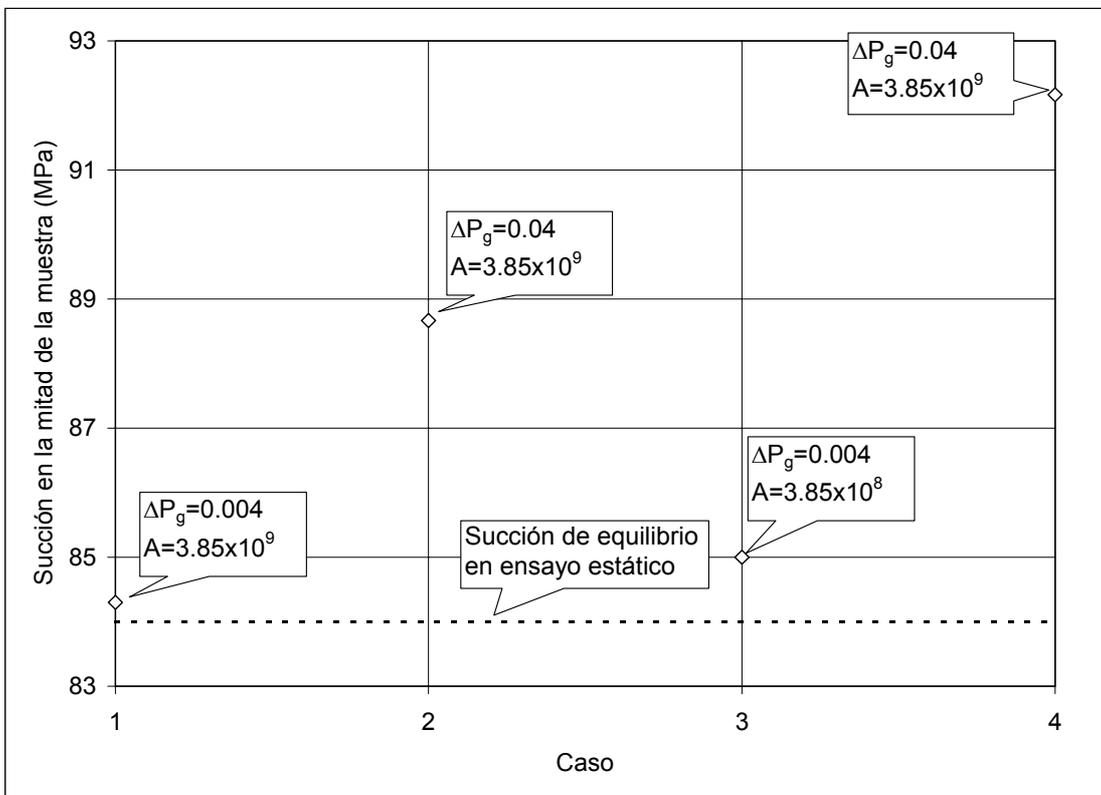


Figura 6.2.1.2.9 Succión de equilibrio en el punto medio de la muestra para los casos estudiados.

6.2.2 SIMULACIÓN DEL FLUJO DE GAS POR LAS BASES DE LA MUESTRA

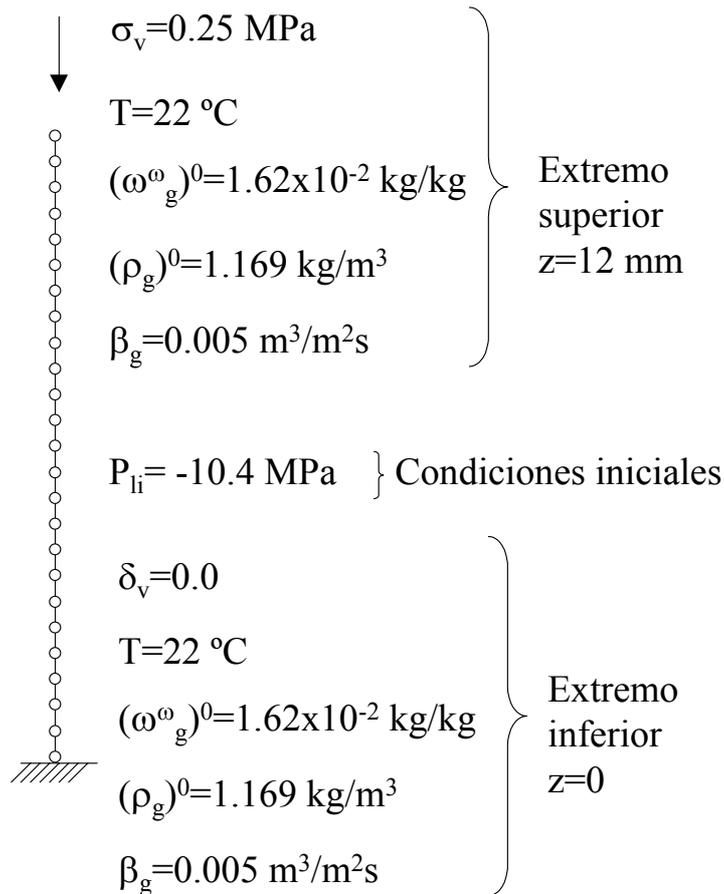
En los ensayos donde se impone la succión de manera estática (Esteban, 1990; Villar, 2000), el caudal másico de agua que entra o sale de la muestra (j_g^{ω}) se puede evaluar según la expresión (Wilson et al., 1994): $j_g^{\omega} = \beta_g \left(\omega_g^{\omega} \rho_g - (\omega_g^{\omega} \rho_g)^0 \right)$, donde $\omega_g^{\omega} \rho_g$ es la densidad de vapor en la superficie de la muestra y $(\omega_g^{\omega} \rho_g)^0$ es la densidad de vapor en la atmósfera circundante. Físicamente, indica que la evaporación es proporcional a la diferencia entre la densidad de vapor en la atmósfera y la que hay en la lámina de aire en contacto con la muestra. El valor de β_g depende de las condiciones del movimiento de aire en la superficie de evaporación, así por ejemplo, la evaporación en una atmósfera con corrientes de aire es mayor que si éstas no existen. Se han medido valores de β_g a partir de ensayos realizados con el mismo tipo de material (Rodríguez Pacheco, comunicación personal). Los ensayos consistieron en colocar en bandejas suelo procedente de un residuo minero compactado en la atmósfera del laboratorio a temperatura controlada. La densidad seca inicial estaba en torno a 1.45 g/cm^3 , con una humedad inicial alrededor del 45 %. En el contorno, la humedad relativa era del 63 % y la temperatura de 22°C . El espesor inicial del suelo colocado en la bandeja variaba entre 2 y 4 cm y la superficie de evaporación era de 450.5 cm^2 . El agua del suelo inicialmente saturado, se evaporaba libremente en el ambiente del laboratorio y se medía la pérdida de peso, la reducción de espesor y las grietas que aparecían. También se midieron valores de β_g con ensayos de muestras cilíndricas puestas encima de una balanza en contacto con la atmósfera del laboratorio. Así como en el caso de los ensayos de evaporación con bandejas, la temperatura del laboratorio era de unos 22°C y su humedad relativa de un 63%, en el caso de las muestras cilíndricas, el control de la atmósfera ambiental no fue tan exhaustivo, pero el promedio de la temperatura y humedad ambiental era aproximadamente la misma. El valor de β_g medido fue de $0.002 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{s}$. Un aspecto importante a considerar en los ensayos en cámara hermética, es el tiempo necesario para que la atmósfera de la cámara donde se realiza el ensayo se equilibre con la disolución de ácido que se introduce en la misma. Este tiempo será función del volumen de la cámara y la superficie de evaporación. También las piedras porosas perturban la evaporación del agua, retrasándola.

Como se ha comentado anteriormente, cuando el empaquetamiento de la arcilla es grande (baja porosidad debido a una alta tensión vertical) o cuando el grado de saturación

aumenta, el flujo de gas a través de la muestra queda seriamente dificultado al perder continuidad la fase gaseosa, lo cual hace ineficaz el método de cambiar la succión forzando el paso del aire con humedad relativa controlada a través de la muestra. En estos casos se cambia la dirección del flujo y se hace pasar a través de las piedras porosas. De este modo, se favorece el secado de la muestra debido a que el vapor que llega a las piedras porosas es retirado rápidamente por el aire en circulación. El humedecimiento se ve favorecido por el aporte continuo de vapor, con lo que el valor de β_g se puede aumentar y, con ello, reducir el tiempo de equilibrio de la succión de la muestra con la humedad relativa del ambiente que la rodea.

6.2.2.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL

La simulación numérica de este ensayo se ha realizado con el programa CODE_BRIGTH. La malla de elementos finitos utilizada ha sido la misma que el caso anterior (malla unidimensional con 25 nodos equiespaciados y 24 elementos). En la figura 6.2.2.1 se muestra el modelo conceptual utilizado en la modelación del ensayo. Las incógnitas a resolver en este caso se reducen a tres: desplazamiento vertical, presión de líquido y temperatura, ya que la presión de gas se supone constante e igual a 0.1 MPa. Como se ha dicho anteriormente, este método se aplica cuando la succión de la muestra es baja. A continuación, se expone la modelación de la reducción de succión en una muestra desde 10.3 MPa a 3.7 MPa (trayectoria 1). La condición de contorno de flujo ha sido $\omega_g^o = 1.62 \times 10^{-2}$, $\rho_g = 1.169 \text{ kg/m}^3$ y $T = 22^\circ\text{C}$ en ambos extremos. El valor de β_g se ha deducido por el método de prueba y error a partir del ajuste de los ensayos realizados. El valor estimado ha sido $0.005 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{s}$. Para ajustar los valores de las deformaciones medidas, el valor del parámetro α_2 del modelo constitutivo mecánico se reduce a 0.04. Esta disminución de la capacidad de hinchamiento se puede explicar por tener la muestra una densidad seca inicial menor que la considerada en la simulación del ensayo de hinchamiento con flujo de gas a través de la muestra.



En ambos extremos, $j_g^\omega = \beta_g \left(\omega_g^\omega \rho_g - (\omega_g^\omega \rho_g)^0 \right)$, la presión de gas es constante e igual a 0.1 MPa.

Figura 6.2.2.1.1 Modelo conceptual utilizado

6.2.2.2 RESULTADOS OBTENIDOS

En la figura 6.2.2.2.1 se presentan los resultados desplazamientos verticales - tiempo experimentales comparados con los obtenidos de la simulación numérica. En ella puede observarse el efecto de la velocidad de transferencia de agua a través del valor del parámetro β_g .

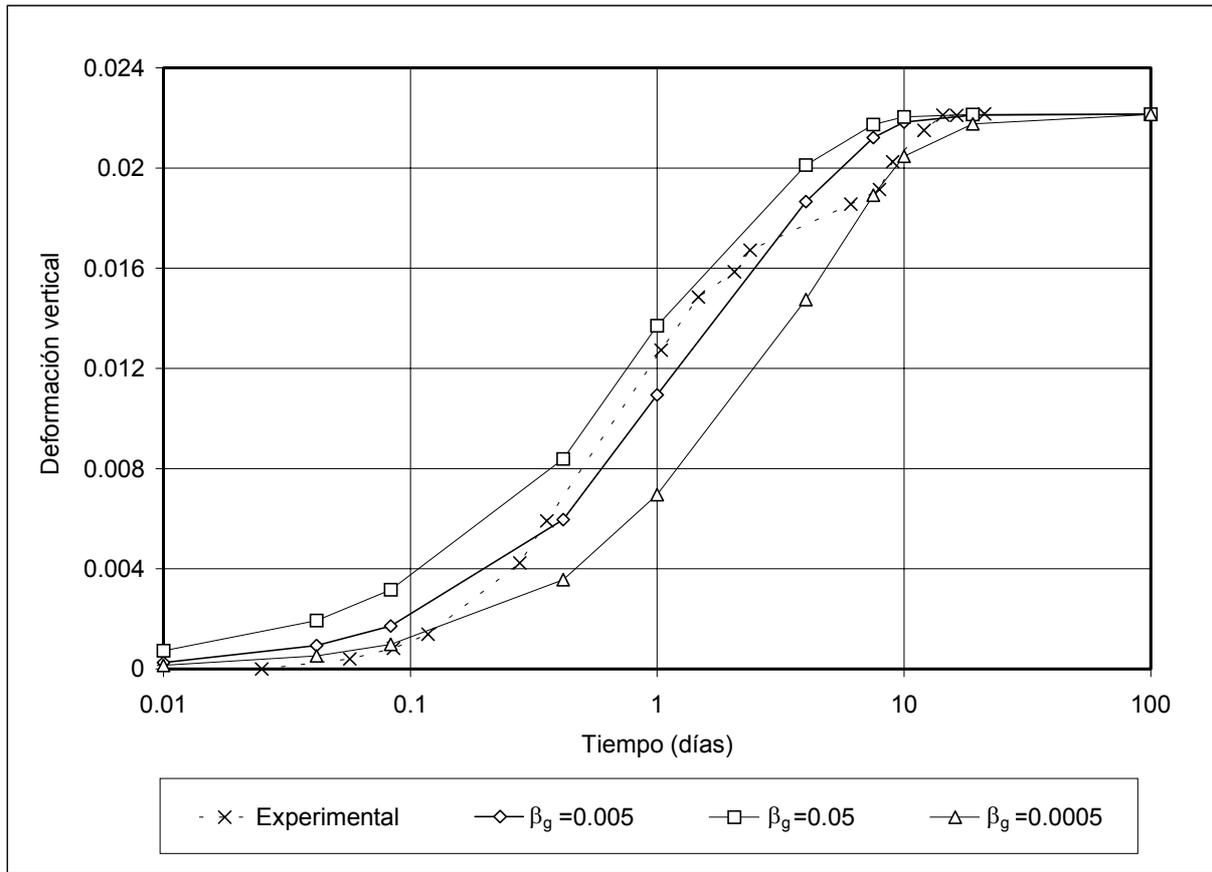


Figura 6.2.2.2.1 Efecto del parámetro β_g en la velocidad de la deformación vertical. Circulación de aire en los extremos de la muestra $\gamma_{di}=1.62 \text{ g/cm}^3$, $\gamma_{df}=1.55 \text{ g/cm}^3$, $\sigma_v=0.15 \text{ MPa}$ (trayectoria número 1).

Otro aspecto interesante en este tipo de ensayos es la distribución de las presiones de líquido y de la fracción másica de vapor en el gas, que son los dos mecanismos de transporte de agua en este tipo de ensayos (figuras 6.2.2.2.2 y 6.2.2.2.3). En la figura 6.2.2.2.4 se representa el caudal de agua que sale de la muestra por una de sus bases en función del tiempo. Este caudal procede básicamente del movimiento de agua líquida (más del 98 %), el resto se debe al flujo no advectivo de vapor.

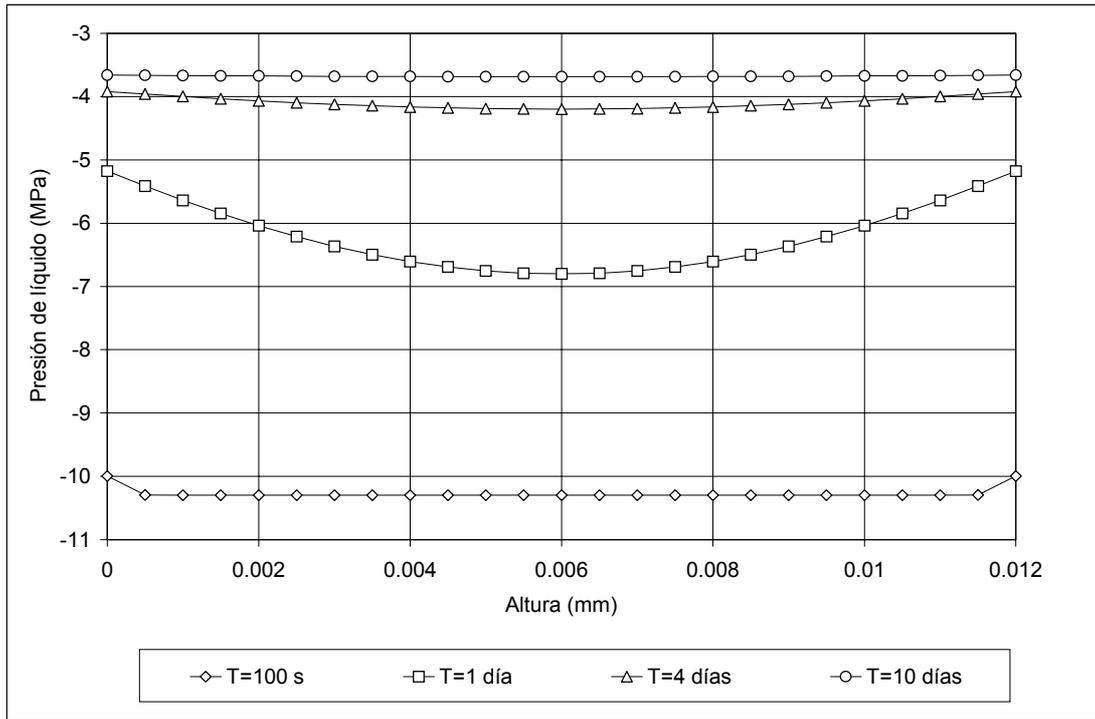


Figura 6.2.2.2 Distribución de la presión de líquido. Circulación de aire por los extremos de la muestra.

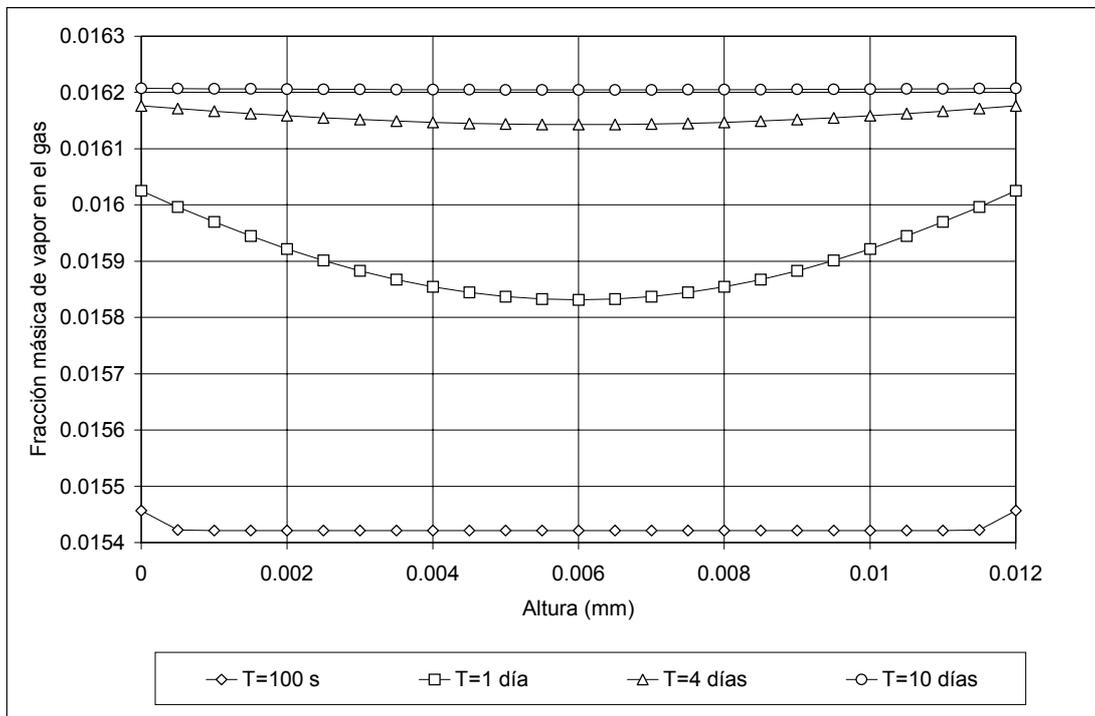


Figura 6.2.2.3 Distribución de la fracción másica de vapor en el gas. Circulación de aire por los extremos de la muestra.

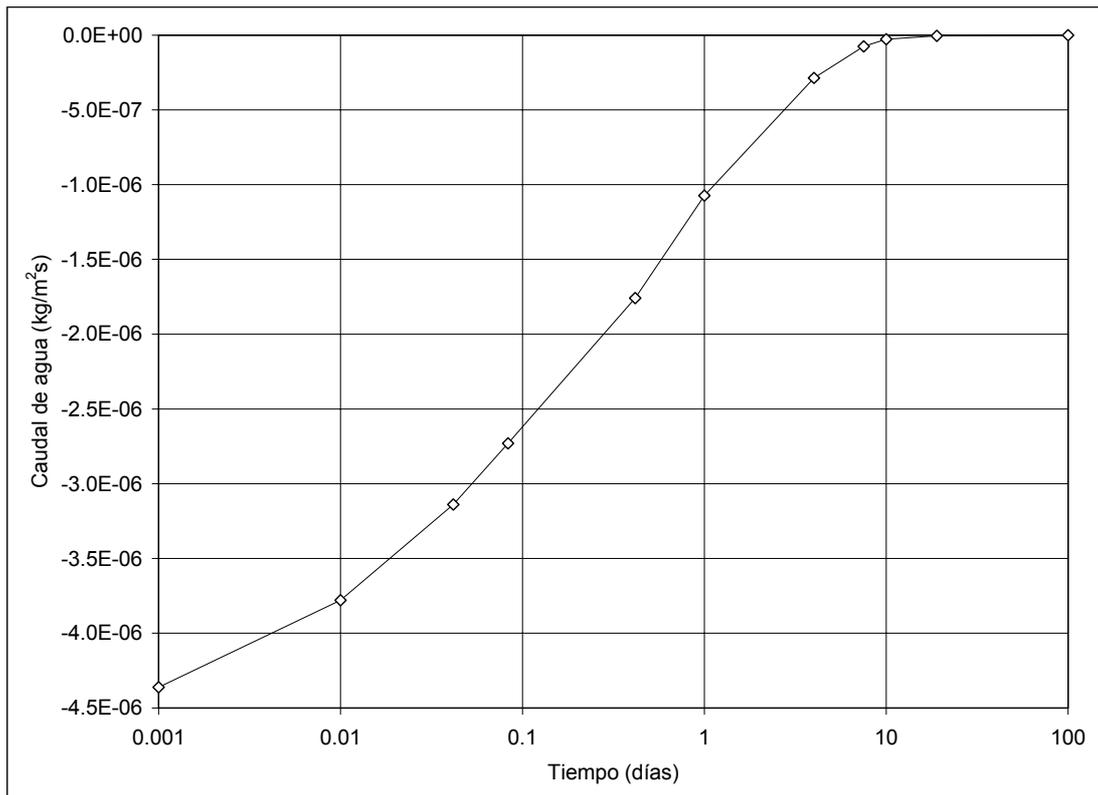


Figura 6.2.2.2.4 Caudal másico de agua que sale por uno de los extremos de la muestra. Circulación de aire por los extremos de la muestra.

También se han comparado los resultados obtenidos en esta tesis con los obtenidos por Villar (2000), que imponía la succión mediante el método estático. Se ha realizado una simulación numérica donde los parámetros mecánicos han sido los mismos que los presentados por Gens et al. (1998), solo que en este caso se ajustó el valor de α_2 , que pasa de ser -0.06 a -0.067 , y se ha ajustado el valor de β_g a los resultados experimentales de Villar (2000). Este valor es menor que el medido en los ensayos de las bandejas y es de $0.0005 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{s}$, diez veces menor. La succión inicial de la muestra simulada era de 13.8 MPa . En un principio se podría esperar un valor de β_g parecido al obtenido de los ensayos de las bandejas, el menor valor puede ser debido a que la evaporación en las muestras situadas dentro del edómetro, entorpecida por las piedras porosas, es más difícil que en las bandejas, las cuales, están en contacto directo con la atmósfera y la evaporación se ve beneficiada por las perturbaciones propias del laboratorio que pueden favorecer la renovación del aire que rodea la muestra. El ambiente del laboratorio está abierto y, por tanto, el agua evaporada se mueve mucho más fácilmente (viento, gradientes de temperatura, etc.) que en un ambiente cerrado y pequeño como el interior de las células utilizadas en CIEMAT.

En la figura 6.2.2.2.5 se presenta un resultado de Villar (2000) obtenido para el mismo cambio de succión (de 13.8 a 3.7 MPa aproximadamente), las deformaciones son sensiblemente superiores porque la muestra tenía una densidad seca inicial de 1.71 g/cm^3 , mayor que las muestras utilizadas en esta tesis. Se compara la simulación del ensayo con una simulación suponiendo que la capacidad de evaporación del entorno de la muestra es la misma que en el ambiente del laboratorio ($\beta_g=0.002 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{s}$). Puede observarse que el tiempo necesario para equilibrar es aproximadamente diez veces menor.

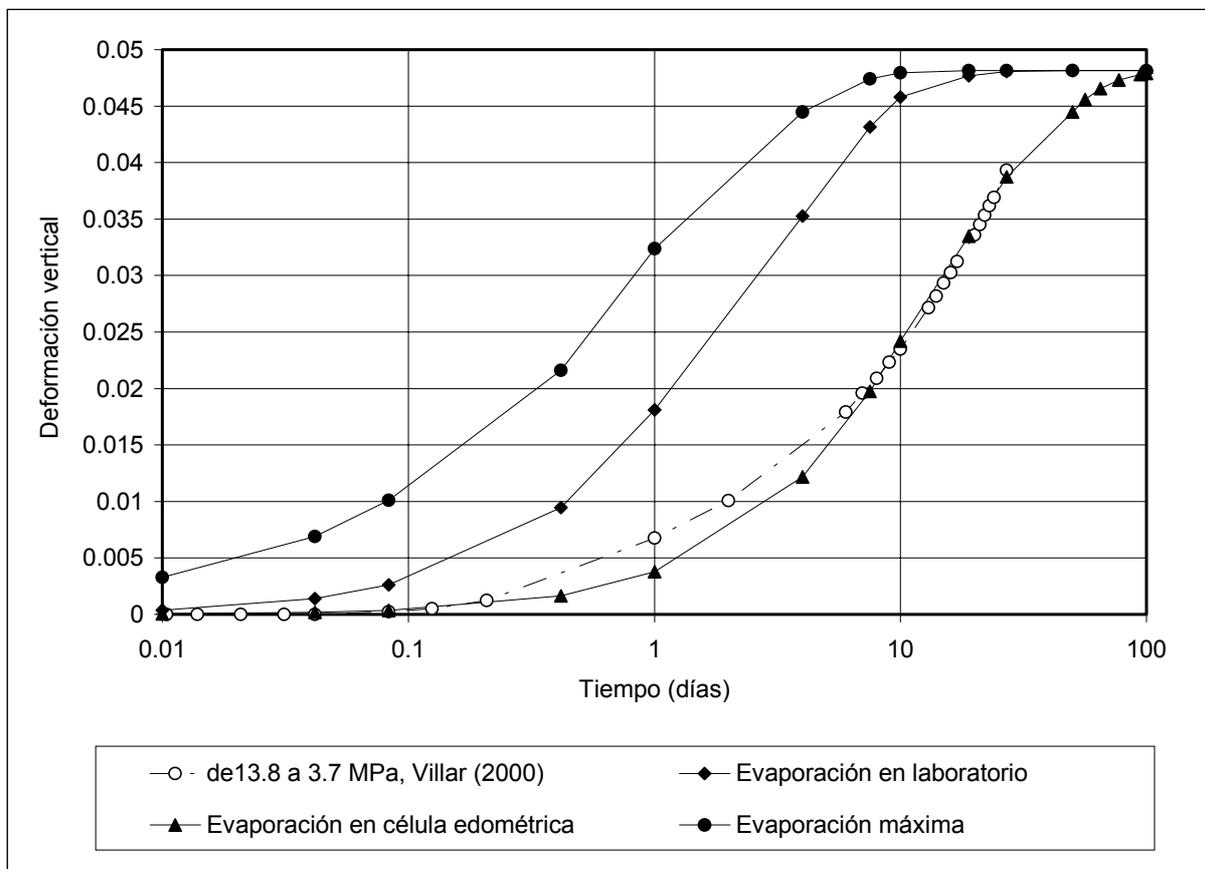


Figura 6.2.2.2.5 Deformación vertical en función del tiempo. Probeta ensayada CIEMAT. $\gamma_{di}=1.57 \text{ g/cm}^3$, $\gamma_{df}=1.52 \text{ g/cm}^3$, $\sigma_v=0.1 \text{ MPa}$.

De los resultados obtenidos, se puede deducir que forzar la circulación del aire alrededor de la muestra reduce sensiblemente el tiempo necesario para alcanzar el equilibrio entre la succión de la muestra y la succión del ambiente que la rodea. El parámetro β_g se puede deducir por retroanálisis a partir de los resultados obtenidos en los ensayos y se puede observar que el tiempo de equilibrio es inversamente proporcional a su valor. Aumentar el

valor de β_g y reducir la duración del ensayo se puede conseguir de una manera relativamente sencilla, basta con hacer circular el aire con ayuda de una bomba sin tener que cambiar la estructura de los equipos de ensayo. Sin embargo, hay que tener en cuenta que si la velocidad de circulación de aire es muy alta y la capacidad de evacuación del gas en movimiento supera la cantidad de agua que llega al contorno desde el interior del suelo debido al gradiente de succión (evaporación instantánea de la figura 6.2.2.2.5), entonces la velocidad de secado o humedecimiento será máxima y no podrá aumentarse por mucho que aumente la velocidad de circulación de aire. En esta situación, es como si se fijara la succión en el contorno (β_g infinito) y la velocidad del agua en el interior del suelo es la que controla el proceso.

6.3 SIMULACIÓN DEL ENSAYO DE DILATACION TÉRMICA

En este apartado, se presenta la modelación del comportamiento T-H-M de la bentonita en un escalón de cambio de temperatura con humedad global constante como los descritos en el apartado 5.3. En primer lugar se ha estudiado de forma analítica el efecto que tienen en un elemento de volumen de suelo los cambios de temperatura (dilatación del esqueleto sólido del suelo) y de la succión, considerando que esta última sólo cambia por efecto del cambio de la tensión superficial con la temperatura. Seguidamente se realiza la simulación numérica del ensayo considerándolo un problema de contorno, donde el cambio de temperatura en los bordes de la muestra se transmite hacia el interior de la misma creando un transitorio. Por otra parte, los cambios de temperatura inducirán cambios de succión que se traducirán en un movimiento de agua en el interior de la muestra.

En la simulación numérica de este ensayo se debe resolver un problema termo-hidro-mecánico acoplado. El modelo constitutivo elegido está descrito en el apartado 3.2.3 e implementado en CODE_BRIGHT. Los parámetros utilizados son los empleados en la modelación de los experimentos a escala real en el proyecto FEBEX (Gens et al., 1997) y se recogen en las tablas 6.3.1, 6.3.2 y 6.3.3. El significado de cada parámetro y la ley a la que está asociado puede verse en 3.2.3. El coeficiente de dilatación térmica varía linealmente con la temperatura según la ley $\alpha(T)=\alpha_0+\alpha_2(T-T_0)$. Los parámetros α_0 y α_2 se estimaron con el procedimiento de prueba y error. En esta calibración no se consideró necesario utilizar el análisis inverso debido a la poca información disponible y la sencillez del modelo utilizado.

También hay que tener en cuenta que el modelo no reproduce las deformaciones irreversibles que, sistemáticamente, han aparecido en el primer ciclo de cambio de temperatura. Otro aspecto que desaconseja una evaluación cuantitativa en profundidad es el hecho de que, como se verá posteriormente, el cambio de succión con la temperatura es el que condiciona el flujo de agua en el interior de la muestra. Como se ha mencionado en el capítulo 4, el cambio de la curva de retención con la temperatura es un aspecto que no está completamente cerrado para este material y debe ser analizado con mayor detalle. En la simulación numérica presentada aquí, el cambio de succión con la temperatura se supone motivada por el cambio en la tensión superficial del agua y sigue la relación presentada en el apartado 3.1.3.2.

k_{i0}	k_{s0}	ν	$\alpha_{ss} (MPa^{-1})$	$\alpha_{is} (MPa^{-1})$	α_{sp}	T_{ref}	$\alpha_0 (^\circ C^{-1})$	α_2
5×10^{-2}	2.5×10^{-1}	0.4	-0.03	-0.003	-0.161	29.6	4×10^{-5}	1.7×10^{-5}
$\varepsilon_v^e = -\frac{k_i}{1+e_0} \ln \frac{p}{p_i} - \frac{k_s}{1+e_0} \ln \left(\frac{s+p_{at}}{s_i+p_{at}} \right) + \alpha(\Delta T, p) \Delta T; \quad k_i = k_{i0} (1 + \alpha_{is} s)$ $k_s = k_{s0} (1 + \alpha_{sp} \ln(p/p_i)) \exp(\alpha_{ss} s); \quad \alpha(\Delta T, p) = \alpha_0^* + \alpha_2 \Delta T + (\alpha_1 + \alpha_3 \Delta T) \ln \frac{p}{p_i}$								

Tabla 6.3.1 Parámetros mecánicos elásticos

Curva de retención						Flujo de líquido		Difusión de vapor
$P_0 (MPa)$	λ	S_{rl}	S_{ls}	$P_s (MPa)$	λ_s	$k_0 (m^2)$	k_{rl}	τ
35	0.3	0.01	1	4000	1.5	2.07×10^{-21}	S_l^3	1
$S_e = \left(\frac{1}{1 + ((P_g - P_l)/P)^{1/(1-\lambda)}} \right)^\lambda \left(1 - \frac{P_g - P_l}{P_s} \right)^{\lambda_s}$ $S_e = (S_l - S_{rl}) / (S_{ls} - S_{rl}); \quad P = P_0^* \sigma / \sigma_0$						$\mathbf{q}_l = -\mathbf{K}_l \nabla \left(z + \frac{P_l}{\gamma_l} \right)$ $\mathbf{K}_l = k_{0l} \mathbf{I} \gamma_l k_{rl} / \mu_l$		$\mathbf{i}_g^w = -\mathbf{D}_g^w \nabla \omega_g^w$ $D_g^w = D_0^w \tau$

Tabla 6.3.2 Parámetros hidráulicos

C_e (J/kg)	λ_{dry} (W/mK)	λ_{sat} (W/mK)
800	0.65	1.15
$\mathbf{i}_c = -\lambda \nabla T$; $\lambda = \lambda_{sat}^{S_i} \lambda_{dry}^{1-S_i}$		

Tabla 6.3.3 Parámetros térmicos

6.3.1 ESTUDIO DE LA SOLUCIÓN ANALÍTICA

Se analiza un caso teórico con los parámetros que se muestran en las tablas 6.3.1 y 6.3.2. Se trata de calcular las deformaciones de un elemento diferencial de volumen debidas a la disminución de temperatura y de analizar las deformaciones debidas estrictamente al cambio de temperatura y las debidas al cambio de succión (por cambios en la tensión superficial del agua) con la temperatura. Los parámetros de la curva de retención figuran en la tabla 6.3.3. La temperatura inicial es de 39.3°C, la final 29.6°C y la succión inicial 70 MPa.

Las ecuaciones utilizadas para calcular la deformación axial han sido:

$$\Delta \varepsilon_z = -\frac{k_s}{1+e_0} \times \ln\left(\frac{s+P_{at}}{s_0+P_{at}}\right) / 3 \quad \text{para la deformación debida al cambio de succión,}$$

con e_0 igual a 0.58 y P_{at} a 0.1 MPa.

$\Delta \varepsilon_z = (\alpha_0 + \alpha_2 \times (T - T_0)) \times \Delta T / 3$ para la deformación debida al cambio de temperatura.

En la figura 6.3.1.1, se puede observar que las deformaciones en este ensayo se deben principalmente a la dilatación. Se ha representado la deformación axial suponiendo un comportamiento isótropo para poder comparar los resultados con los ensayos realizados y la modelación numérica (en una probeta cilíndrica y para pequeñas deformaciones, $\varepsilon_v = 2 \times \varepsilon_r + \varepsilon_z$). La succión, depende de la temperatura según la ley mencionada en el apartado 3.1.3.2. Este hecho provoca que la muestra cambie de volumen. También se debe tener en cuenta que al variar la temperatura, hay un intercambio de masa de agua entre la fase vapor y la fase líquida del agua, sin embargo, la masa de agua involucrada en este cambio de fase es

muy inferior al volumen de agua líquida de los poros (cuatro órdenes de magnitud menos). El grado de saturación permanece prácticamente constante.

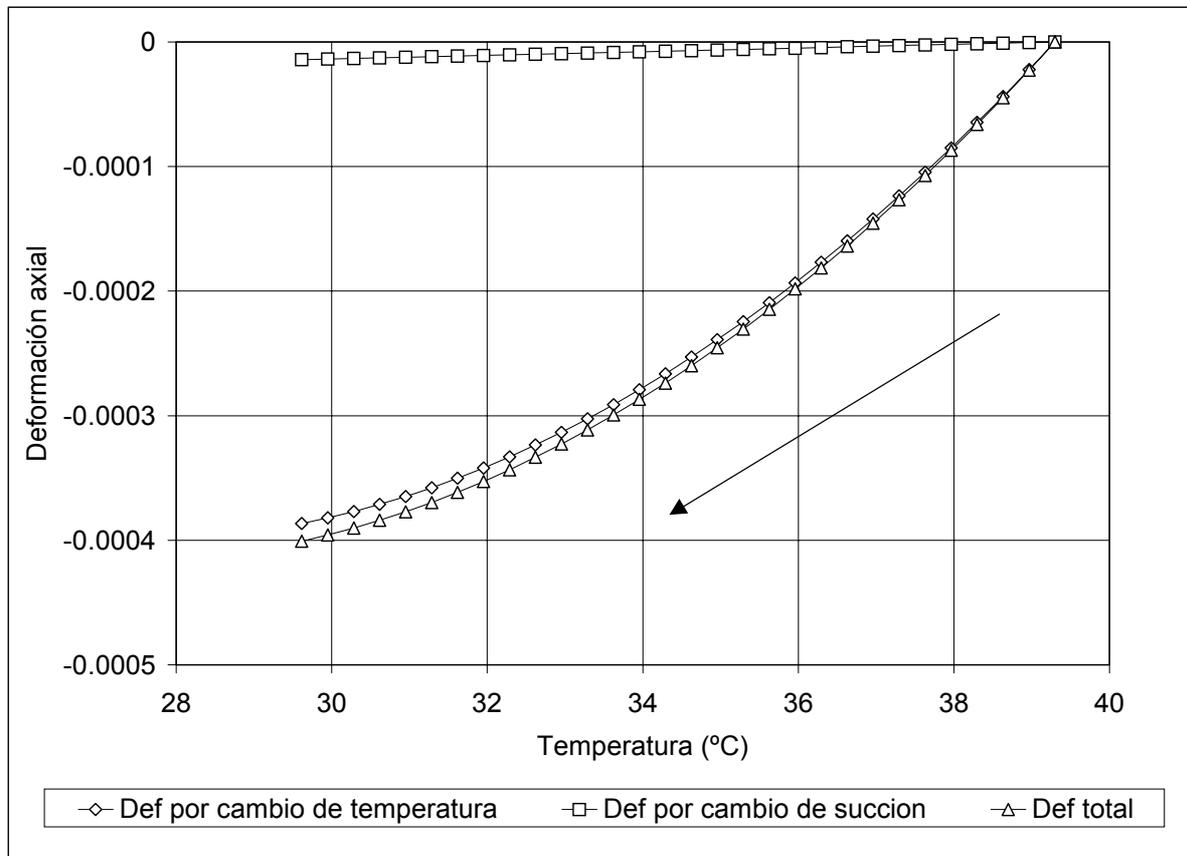


Figura 6.3.1.1. Deformación volumétrica debida al efecto mecánico del cambio de temperatura y al cambio de succión por efecto térmico.

6.3.2 ESTUDIO DE LA SOLUCIÓN NUMÉRICA

Durante el proceso de cambio de temperatura, fase transitoria del ensayo, se genera un gradiente de presión de líquido debido al cambio de succión con la temperatura. La hipótesis contemplada en CODE_BRIGHT para explicar este cambio de succión es que se debe a la variación de la tensión superficial del agua con la temperatura. También se genera un gradiente de la fracción másica de agua en el gas que origina un movimiento de vapor en sentido contrario al del líquido. Al contrario que el ensayo de flujo de calor sin confinamiento, al llegar al estado estacionario no hay flujo, ya que la distribución de temperaturas es uniforme en toda la muestra.

6.3.2.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL

Se ha simulado un proceso de descenso de temperatura en una muestra cilíndrica de 38 mm de diámetro por 76 mm de altura, discretizándola en 192 elementos cuadrangulares con un total de 225 nodos. En la figura 6.3.2.1.1 se muestra la malla y las condiciones de contorno utilizadas en la modelación. El código utilizado ha sido CODE_BRIGTH con la opción tridimensional con axisimetría. Se ha modelado el comportamiento termo-hidro-mecánico de la muestra, con lo que las variables han sido los desplazamientos radiales, los desplazamientos verticales, la presión de líquido y la temperatura. La presión de gas se mantuvo constante e igual a la atmosférica puesto que, tal como se puede apreciar en las figuras 6.3.2.1.2 y 6.3.2.1.3, donde se comparan resultados obtenidos teniendo en cuenta o sin tener en cuenta la variación de la presión de gas en el análisis, el no tener en cuenta las variaciones de la presión de gas tiene poca influencia en los resultados y se mejora sensiblemente el tiempo de cálculo (para simular un ensayo de 10 horas, se precisa 40 veces más tiempo si se considera la presión de gas como variable que si se considera fija). Se simuló el descenso de temperatura tras el primer ciclo, donde no se tienen deformaciones plásticas por cambio de temperatura.

Aunque no se pretende calibrar el modelo a partir de los resultados experimentales, la simulación se ha realizado con las mismas condiciones iniciales y de contorno de un ensayo de laboratorio. El ensayo elegido ha sido el 260898a. No ha habido ninguna razón especial por la que se haya elegido este ensayo.

Las condiciones de contorno han sido:

- Mecánicas: Tensión hidrostática neta ($p-P_{atmosférica}$) de 0.01 MPa de compresión y desplazamientos verticales nulos en la base.
- Hidráulicas: Todo el contorno impermeable
- Térmicas: Se ha simulado la fase de enfriamiento del primer ciclo. Las temperaturas han sido 58.3, 49.7, 39.3 y 29.6.

Las condiciones iniciales han sido una temperatura de 64.17°C, una succión de 76.2 MPa y una tensión hidrostática neta ($p-P_{atmosférica}$) de 0.01 MPa. En la modelación se ha supuesto que los cambios de temperatura se producen por escalones.

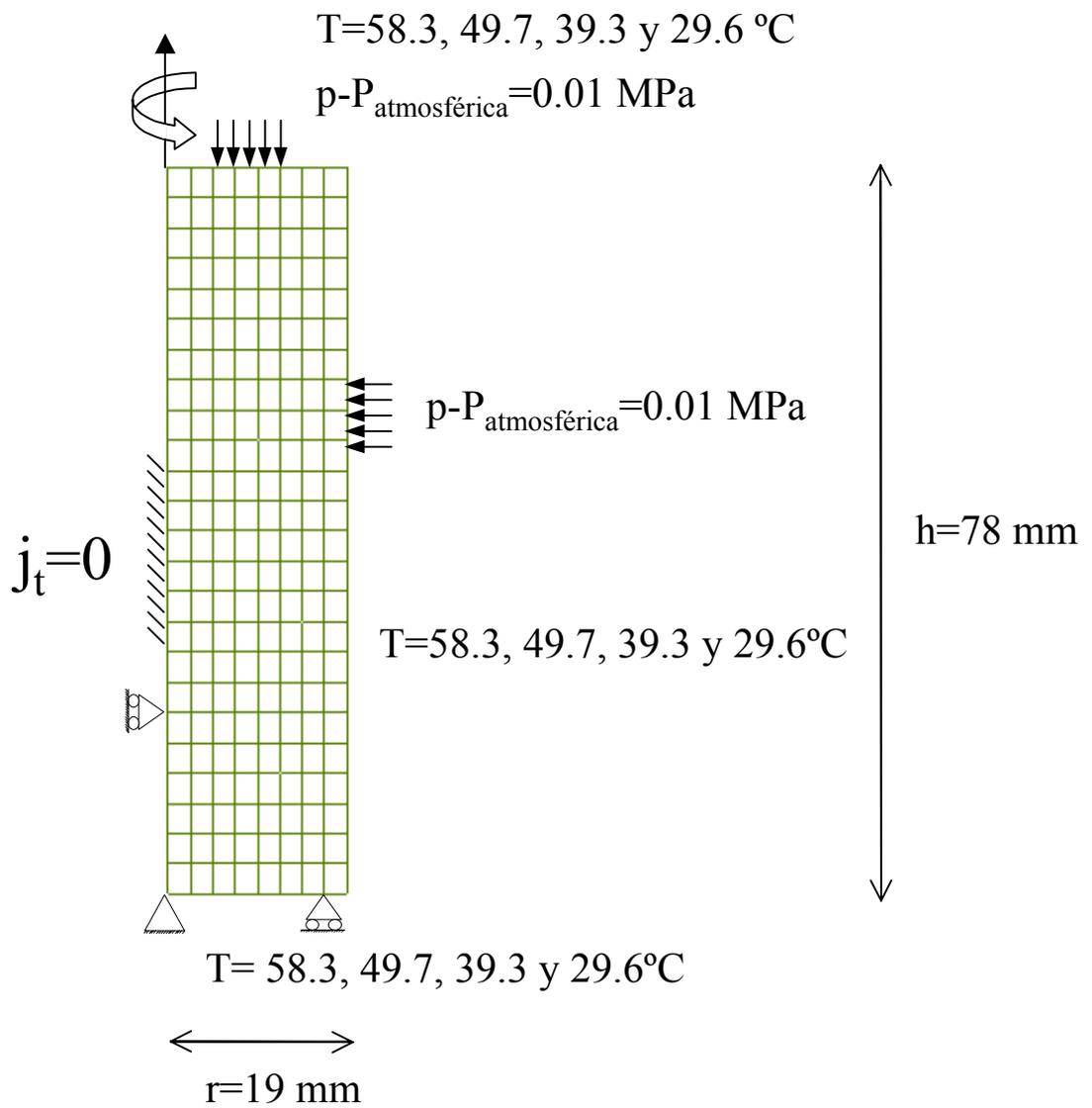


Figura 6.3.2.1.1 Malla de elementos finitos y condiciones de contorno

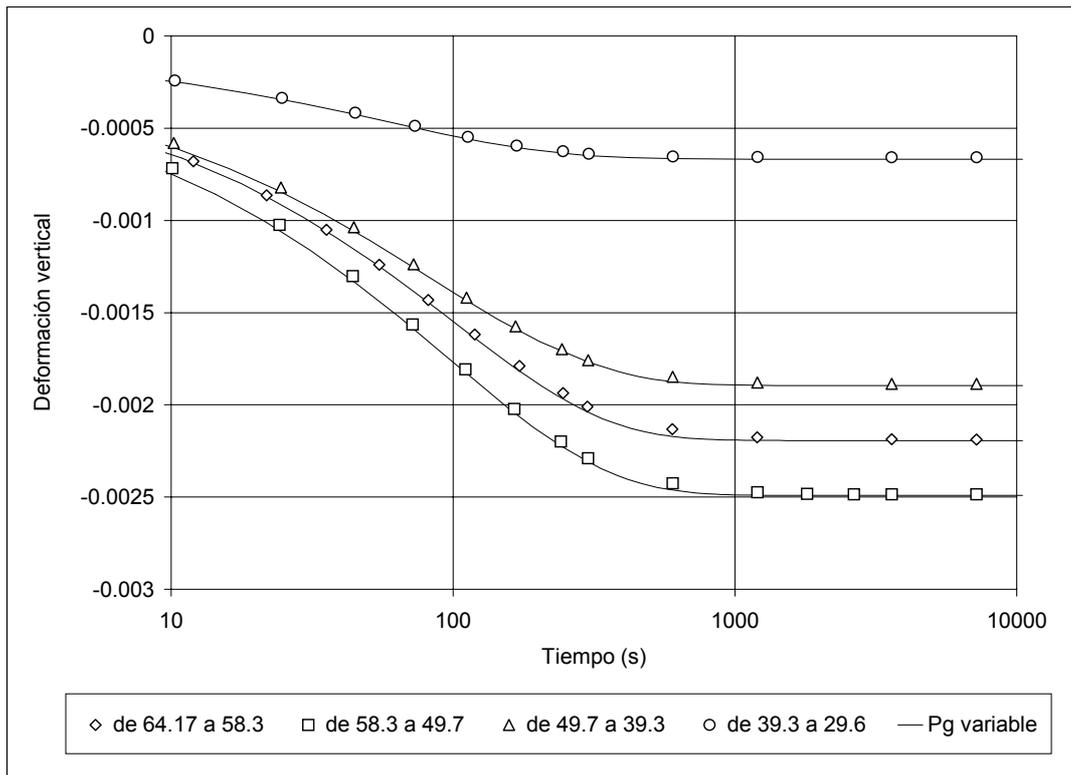


Figura 6.3.2.1.2 Deformación en función del tiempo para cuatro escalones de cambio de temperatura considerando presión de gas fija y variable. Fila superior de nodos.

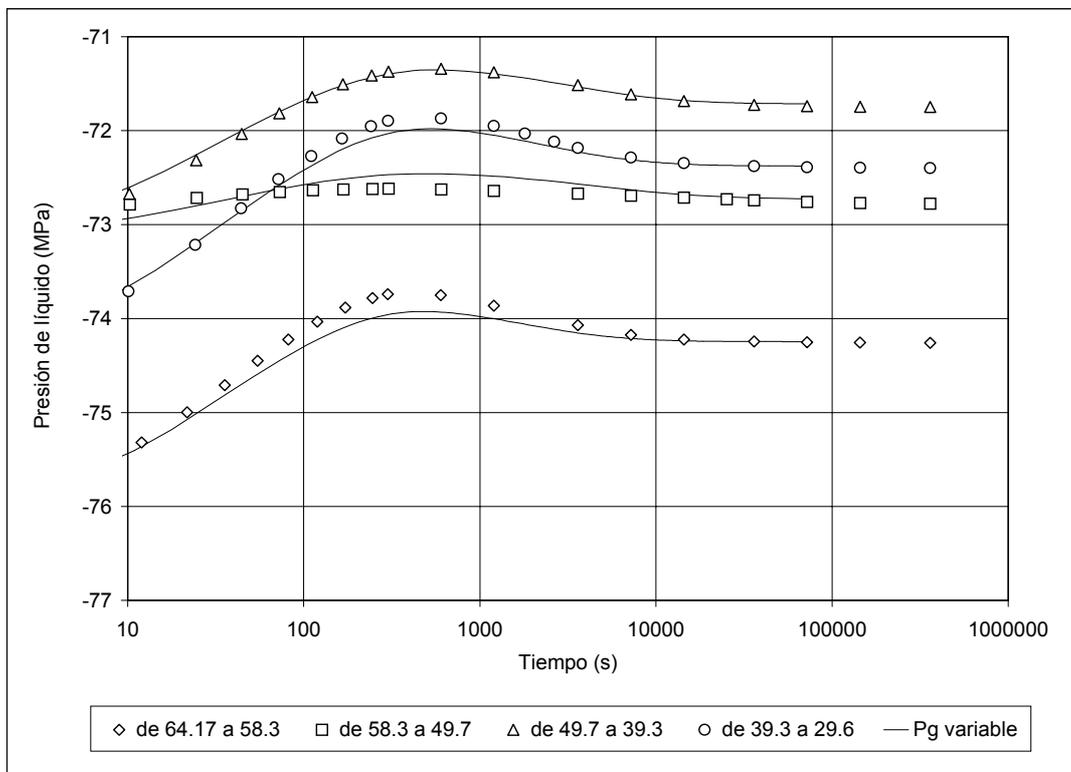


Figura 6.3.2.1.3 Presión de líquido en función del tiempo para cuatro escalones de cambio de temperatura considerando presión de gas fija y presión variable. Fila superior de nodos.

6.3.2.2 RESULTADOS OBTENIDOS

En la figura 6.3.2.2.4 se presenta la calibración del modelo en términos de deformación vertical realizada por el método de prueba y error. El parámetro estimado ha sido el coeficiente de dilatación térmica volumétrico dependiente de la temperatura según la relación $\alpha(T)=\alpha_0+\alpha_2(T-29.6)$, los valores estimados fueron $\alpha_0=4\times 10^{-5}$ y $\alpha_2=1.7\times 10^{-5}$.

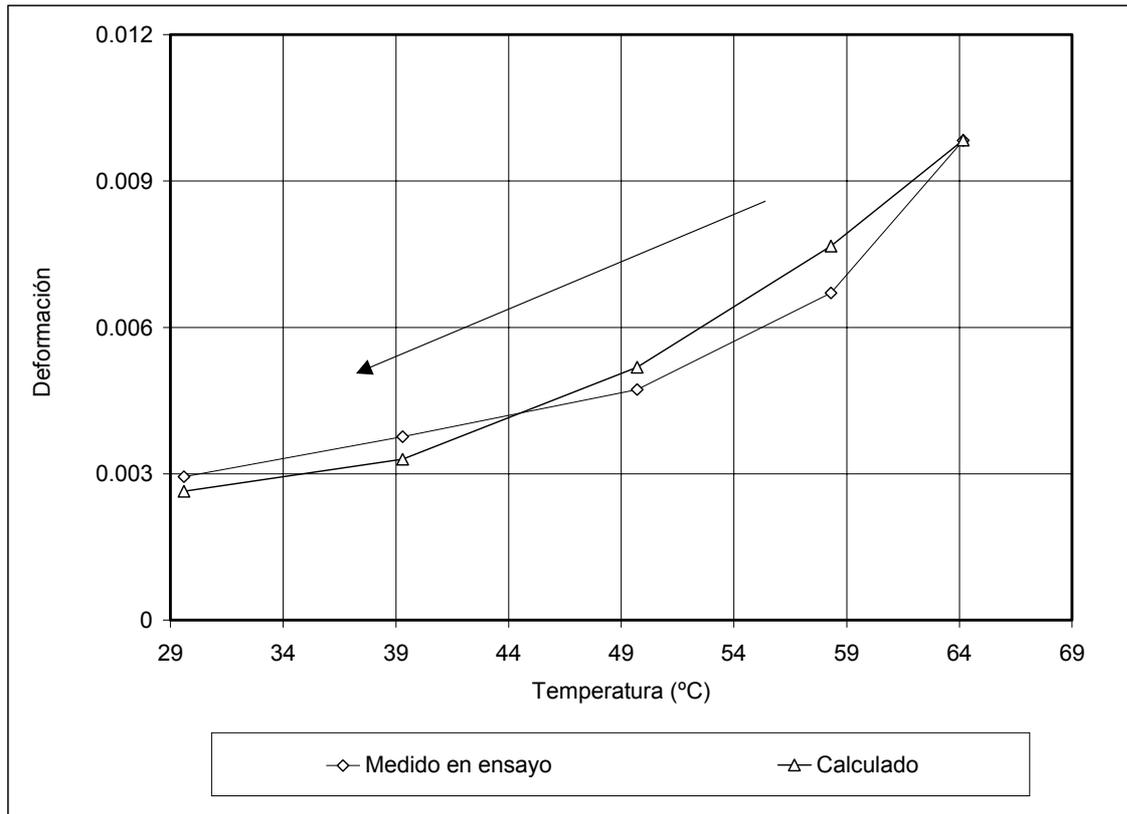


Figura 6.3.2.2.4 Deformación vertical en función de la temperatura

Durante la fase transitoria (se simula el escalón de cambio de temperatura entre 64.2°C y 58.3°C, figuras 6.3.2.2.5-6.3.2.2.9), se producen una serie de desequilibrios en la presión de líquido y la fracción másica de vapor en el gas que provocan un flujo de agua líquida que en los instantes iniciales, va desde la periferia de la muestra hacia el interior y un flujo de vapor desde el interior hacia el exterior. Este movimiento provoca un transporte de calor debido al flujo de masa de agua tanto en fase líquida como en fase gaseosa. El flujo másico de vapor puede llegar a ser dos órdenes de magnitud superior que el flujo de agua líquida.

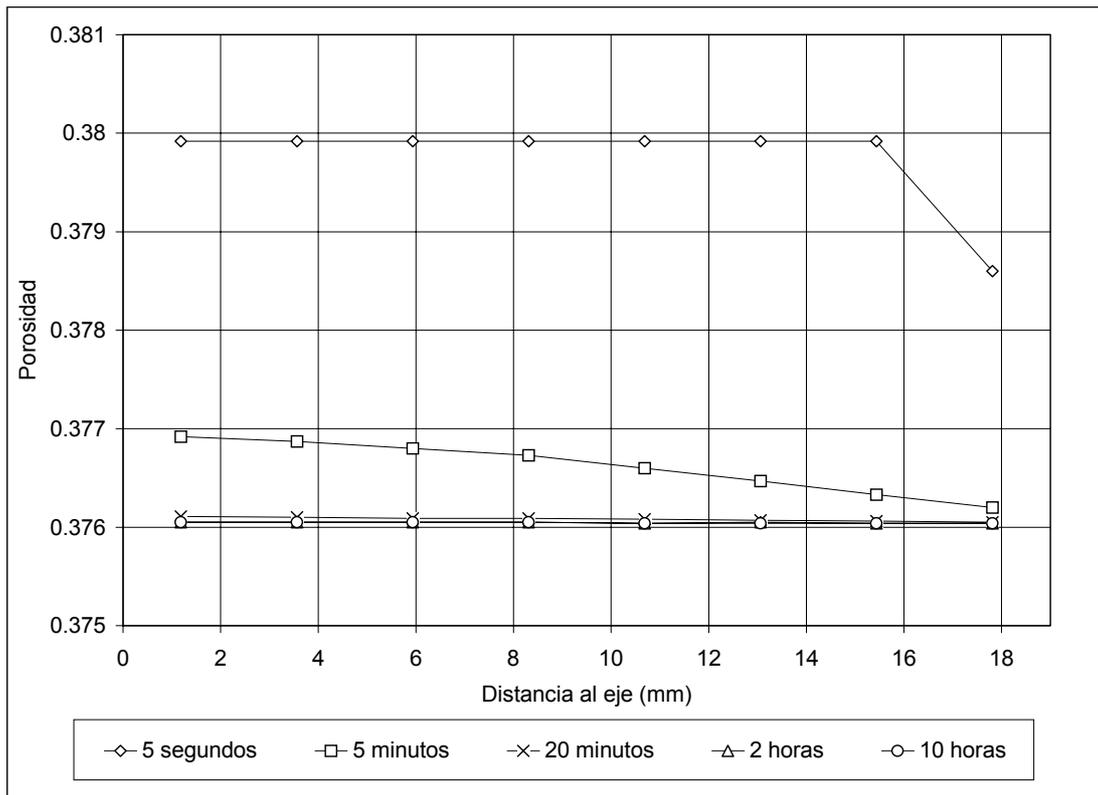


Figura 6.3.2.2.5 Porosidad en función del tiempo y de la posición. Fila central de nodos.

Cambio de temperatura entre 64.2°C y 58.3°C

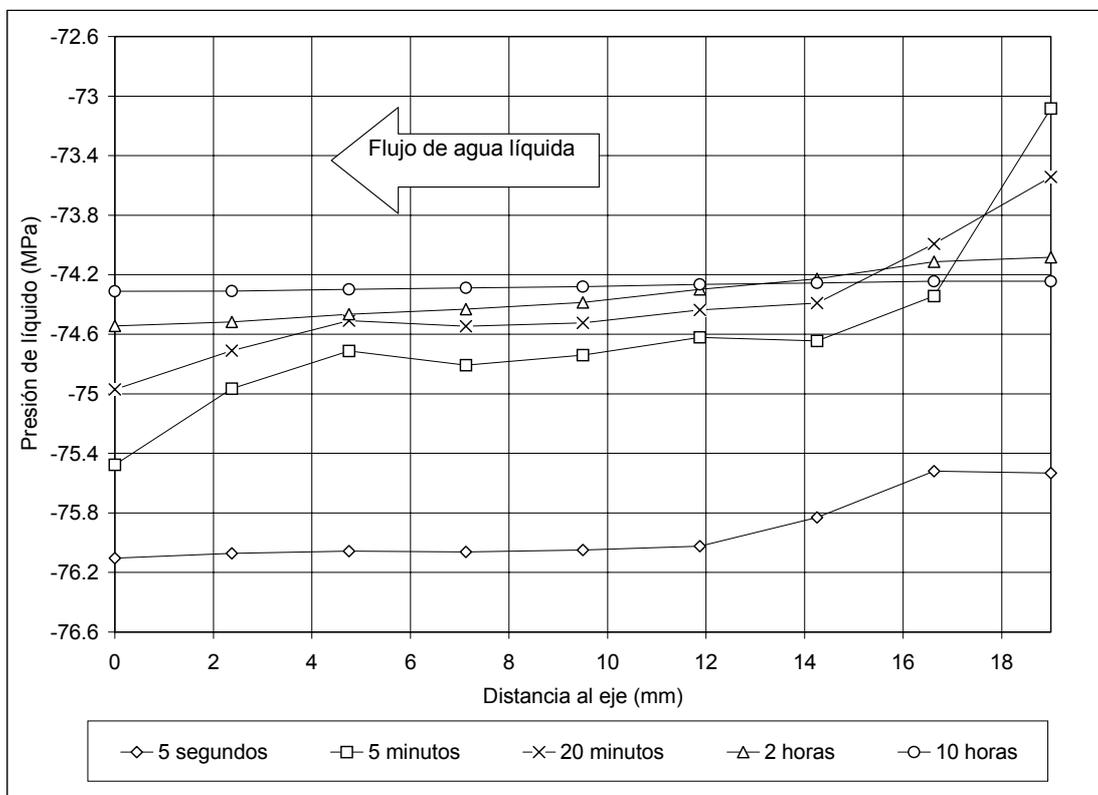


Figura 6.3.2.2.6 Presión de líquido en función del tiempo y de la posición Fila central de nodos. Cambio de temperatura entre 64.2°C y 58.3°C

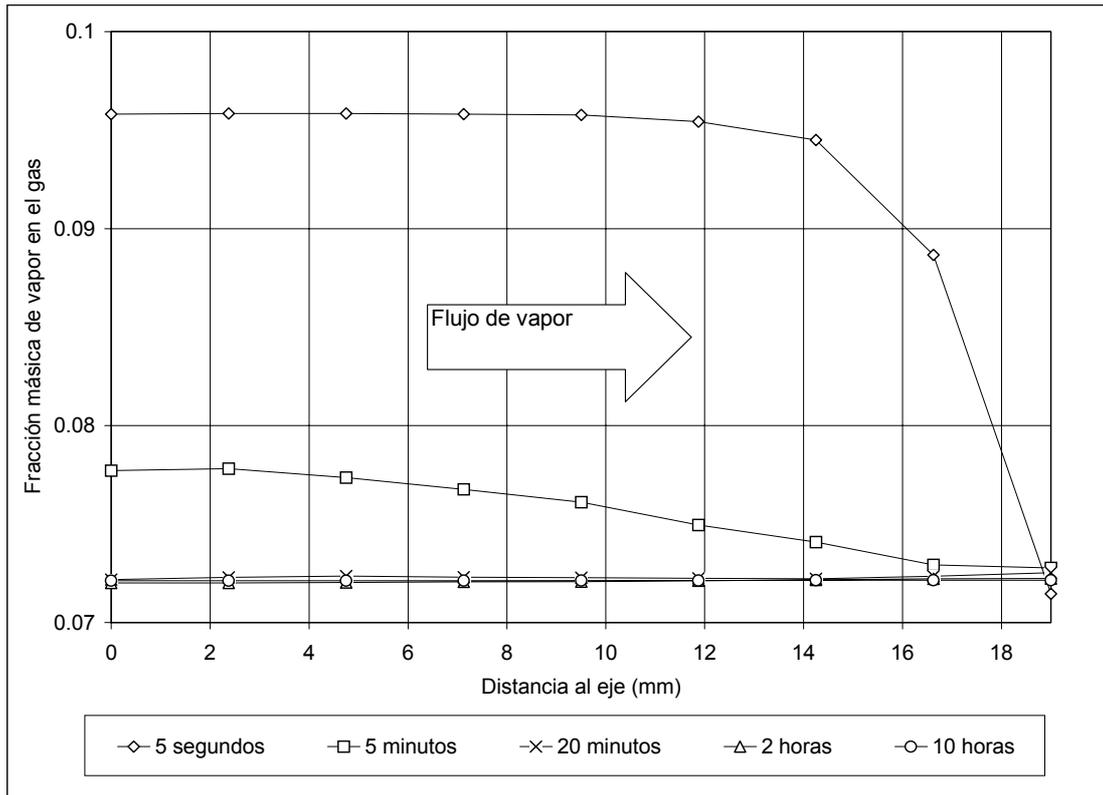


Figura 6.3.2.2.7 Fracción másica de vapor en el gas en función del tiempo y la posición. Fila central de nodos. Cambio de temperatura entre 64.2°C y 58.3°C

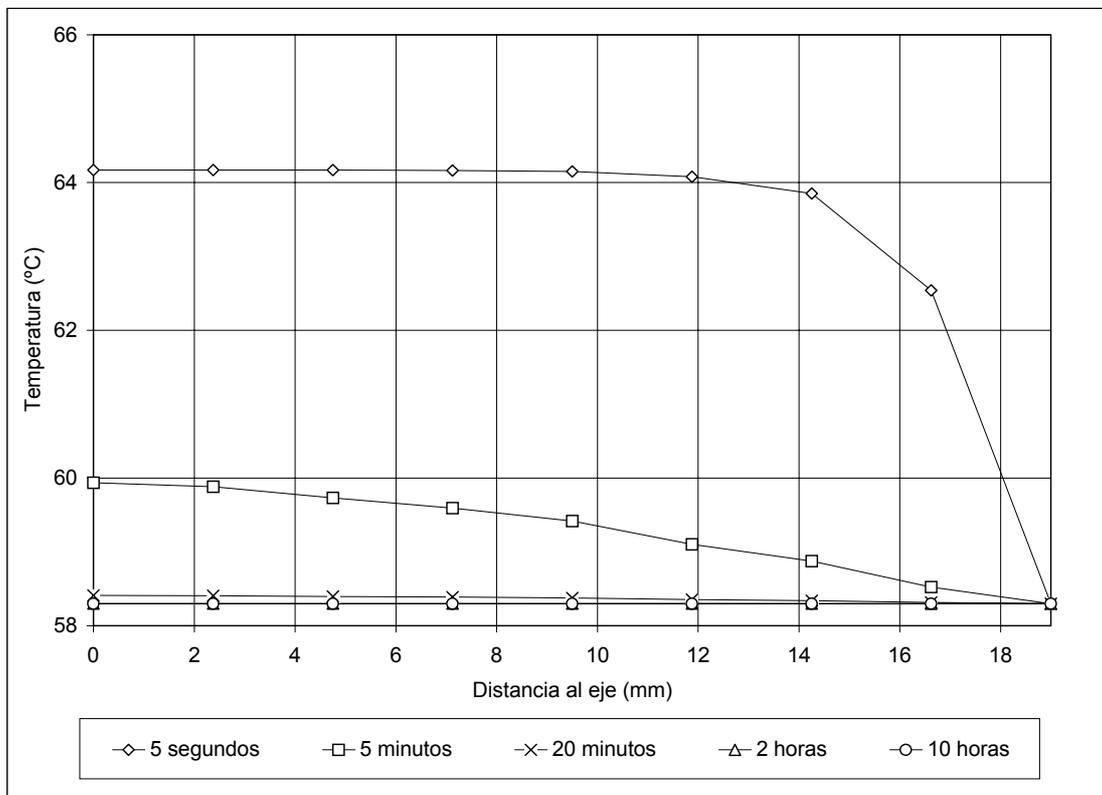


Figura 6.3.2.2.8 Temperatura en función del tiempo y la posición. Fila central de nodos. Cambio de temperatura entre 64.2°C y 58.3°C

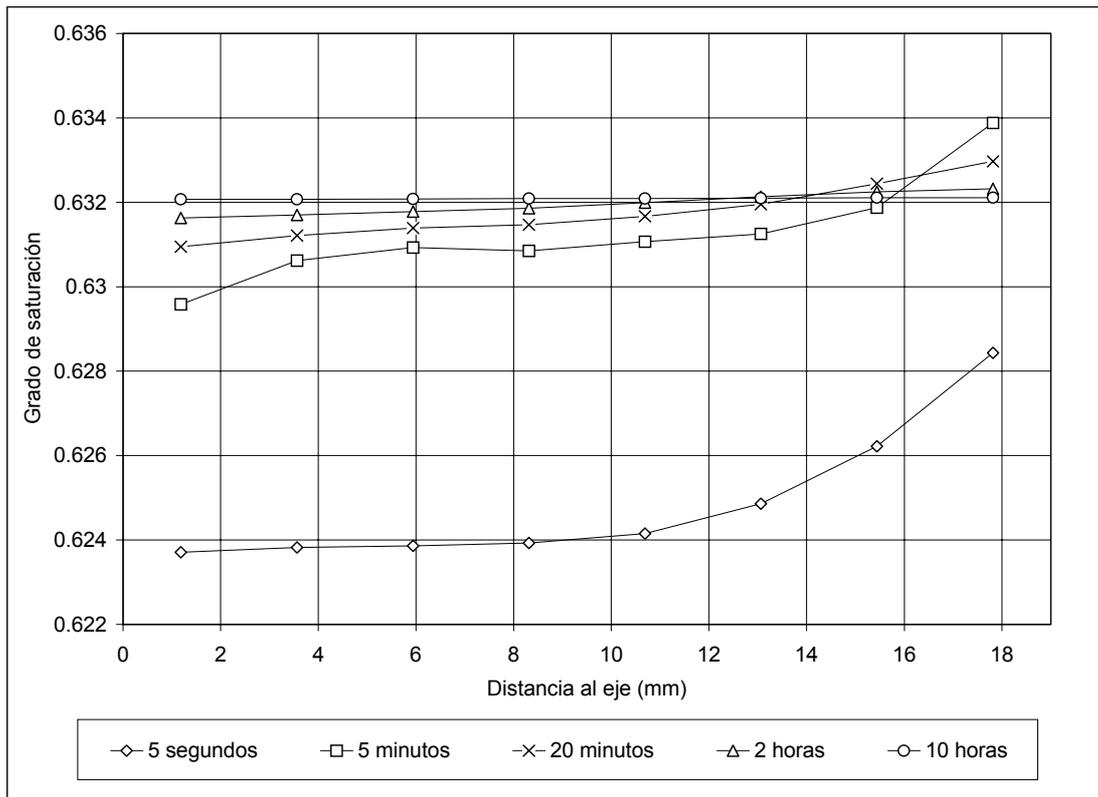


Figura 6.3.2.2.9 Grado de saturación en función del tiempo y la posición. Fila central de nodos. Cambio de temperatura entre 64.2°C y 58.3°C

Tal como se puede observar de los gráficos anteriores, la temperatura se equilibra antes que la presión de líquido y, puesto que el cambio de porosidad se debe principalmente a la dilatación, esta variable se estabiliza con la temperatura. Este desacoplamiento temporal de la temperatura y de la presión de líquido también se pudo apreciar en el ensayo de conductividad térmica sin confinamiento que se describe más adelante.

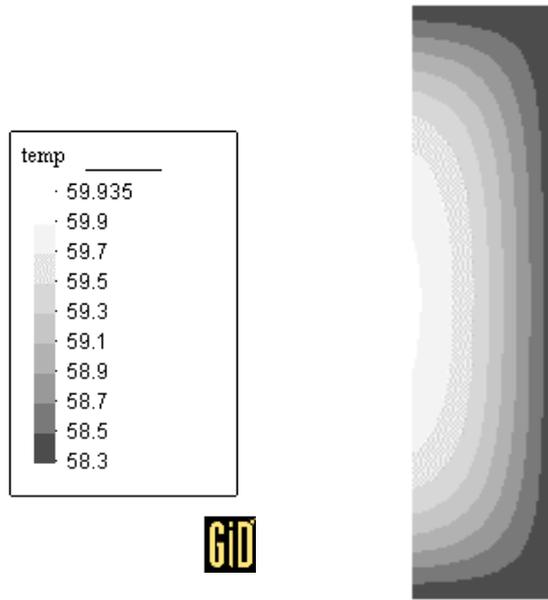


Figura 6.3.2.2.10 Distribución de temperaturas a los 5 minutos. (T en °C).

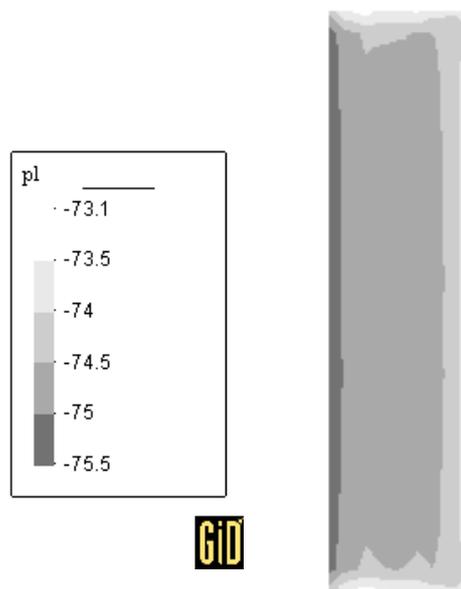


Figura 6.3.2.2.11 Distribución de la presión de líquido a los 5 minutos (P_1 en MPa).

Después de una hora de ensayo, la temperatura es uniforme en toda la muestra (la diferencia entre la máxima y la mínima es de 0.11°C), mientras que la presión de líquido todavía no está estabilizada, tal como se aprecia en la figura 6.3.2.2.12.

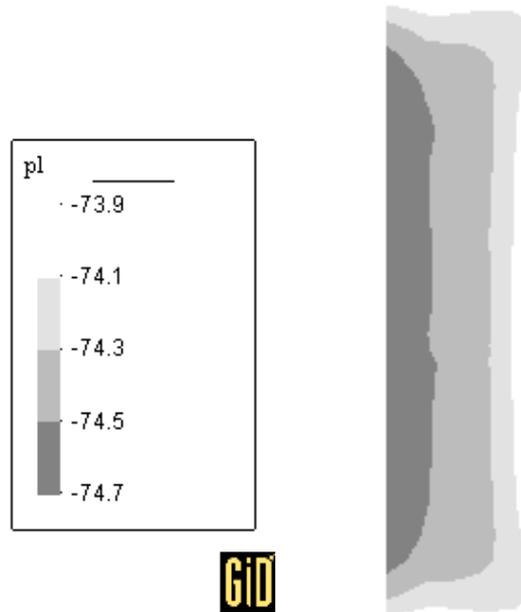


Figura 6.3.2.2.12 Distribución de la presión de líquido al cabo de una hora (P_1 en MPa).

Sin embargo, tal como se describe en el capítulo 5, el cambio de temperatura del baño durante los ensayos no se producía de manera instantánea. La figura 6.3.2.2.13 muestra el cambio de temperatura en función del tiempo cuando varía entre 49.7 y 39.3°C (puede observarse que la temperatura final oscila debido a la inercia del sistema de regulación de temperatura).

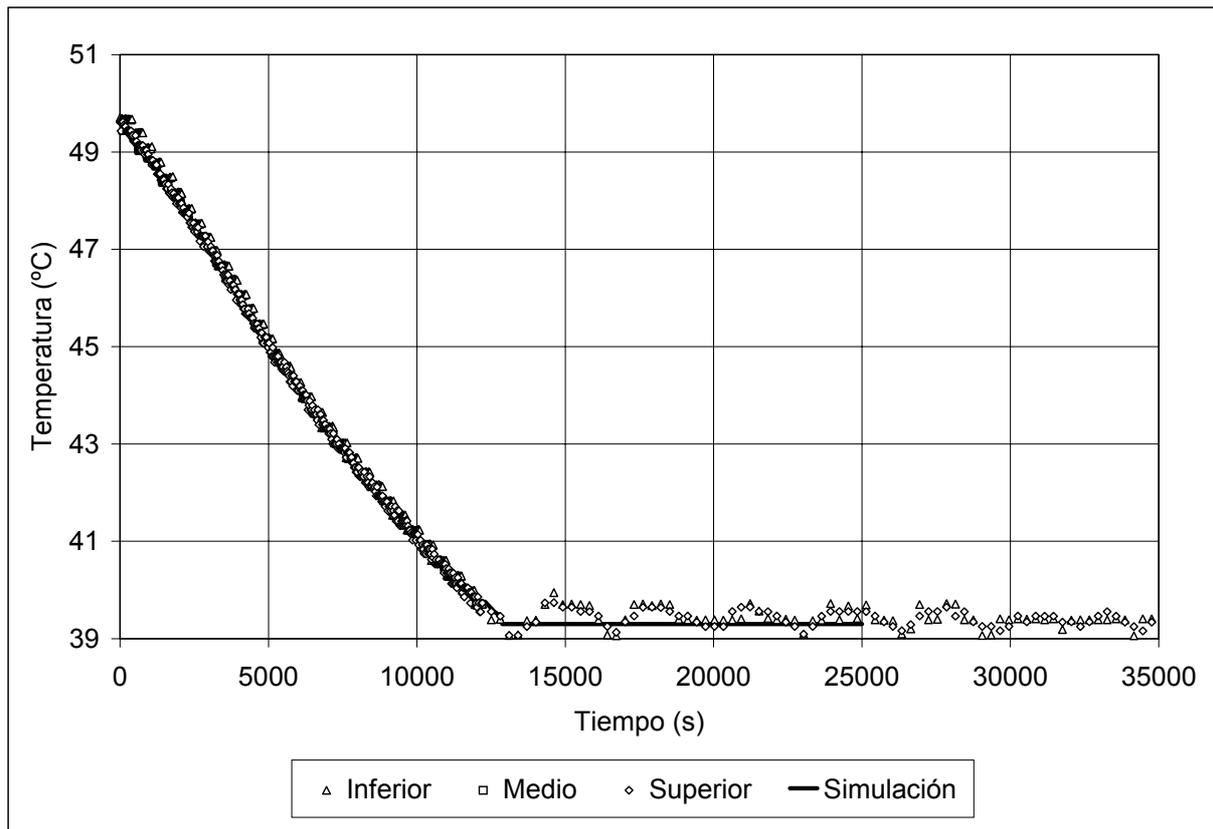


Figura 6.3.2.2.13 Temperatura medida por los termopares situados en la parte inferior, media y superior de la muestra y la condición de contorno de la simulación

En la figura 6.3.2.2.14, se representa la deformación vertical medida y la obtenida mediante una simulación con los parámetros térmicos adaptados a este escalón de cambio de temperatura y la evolución de la temperatura en el contorno indicada en la figura 6.3.2.2.13. Puede observarse que el modelo se ajusta con bastante aproximación a los resultados experimentales.

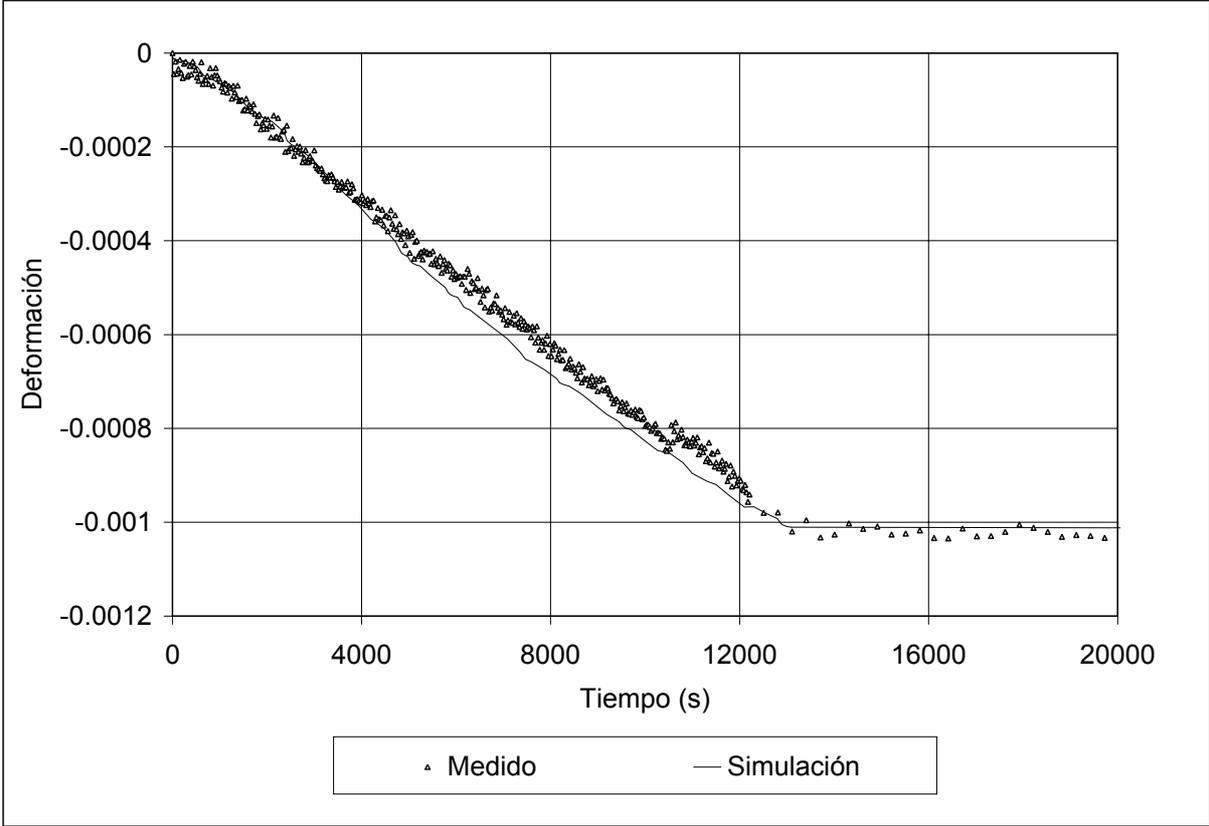


Figura 6.3.2.2.14 Deformación en función del tiempo

6.4 SIMULACIÓN DEL ENSAYO DE FLUJO DE CALOR SIN CONFINAMIENTO

El análisis del ensayo de flujo de calor en una muestra no confinada donde se mantiene la humedad global constante se ha realizado en diferentes niveles de complejidad. En primer lugar se ha utilizado una solución analítica para obtener las temperaturas en condiciones estacionarias en los diversos puntos del suelo y del material aislante que lo rodea. A continuación se ha utilizado el programa CODE_BRIGTH para simular el ensayo y analizar el comportamiento de la bentonita desde la óptica térmica, hidráulica y mecánica. Finalmente se ha utilizado la técnica del retroanálisis para obtener diversos parámetros térmicos e hidráulicos. El modelo mecánico implementado en dicho programa (BBM) no permite reproducir conjuntamente y con fiabilidad los importantes aumentos irreversibles que se producen al aumentar la humedad del suelo (sin confinamiento) y las retracciones (mucho más pequeñas) que se producen en las partes de la muestra que retraen al disminuir su humedad. Por tanto, en los retroanálisis se ha utilizado exclusivamente las partes térmicas e hidráulicas de dicho programa.

6.4.1 ESTUDIO DE LA SOLUCIÓN ANALÍTICA DEL PROBLEMA TÉRMICO

La solución analítica del modelo experimental permite realizar análisis rápidos, con los que se puede estudiar el desarrollo de un ensayo sin tener que recurrir a complejos análisis numéricos. También permite realizar estudios paramétricos, muy útiles para averiguar la importancia de las dimensiones de las células de ensayo, la influencia de las características de los materiales que las componen, etc.

El problema del transporte de calor y la resolución de la ecuación de Fourier son dos de los problemas clásicos de la física matemática (Carslaw, 1986; Arpaci, 1966). Se han desarrollado multitud de soluciones de dicha ecuación para distintas geometrías y condiciones de contorno. En Aviles-Ramos et al. (1998) se resuelve esta ecuación para aplicar la solución en la identificación de parámetros. En esta tesis se ha resuelto la ecuación de Fourier para régimen estacionario, pero la identificación de parámetros se hace con la solución numérica que proporciona un código de elementos finitos (CODE_BRIGTH).

Si se supone el suelo como un material homogéneo, es posible estudiar la distribución de temperaturas sin tener en cuenta el flujo de agua. Esta aproximación será válida mientras el cambio de humedad a lo largo de la muestra no haga variar demasiado su conductividad térmica. En muestras con un grado de saturación alto, se ha podido constatar experimentalmente que la temperatura cerca del borde del calentador aumenta con el tiempo mientras que en la zona lejana disminuye, ya que la muestra reduce su conductividad térmica cuando se seca y viceversa. El modelo numérico T-H utilizado para la simulación de este ensayo es capaz de reproducir estos cambios de temperatura.

No existe solución analítica del problema para el caso estacionario con la geometría del ensayo en dos dimensiones, por lo que se hicieron las siguientes hipótesis simplificativas:

- El problema es perfectamente simétrico respecto al plano medio horizontal del calentador.
- La inyección de calor es uniforme en toda la masa del calentador de cobre.
- El flujo de calor a través de la muestra y el cobre es axial mientras que en el aislante es radial. Esto significa que el vector de flujo de calor en el interior de la probeta tiene la misma dirección que la generatriz de la muestra. Esta aproximación sería exacta en caso que no hubiera fugas laterales. Sin embargo, como se verá más adelante, aunque existan pérdidas de calor en el perímetro lateral de la muestra, este planteamiento conduce a soluciones suficientemente aproximadas.

Con estas hipótesis, se plantean las siguientes ecuaciones diferenciales:

Para el aislante, la ecuación diferencial es:

$$\frac{d^2 T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} = 0$$

con las siguientes condiciones de contorno: $T(R)=T_1$ y $T(R_{ext})=T_2$. R es el radio de la muestra, el R_{ext} es el grosor del aislante más el radio de la muestra. T_1 la temperatura de la muestra (desconocida) y T_2 la temperatura impuesta en el contorno exterior del aislante. La solución

de esta ecuación diferencial proporciona un caudal de calor radial en función de la temperatura de la muestra.

Para el cilindro que forman el calentador de cobre y el suelo, se hace un balance de calor en una rebanada cualquiera y se tiene:

$$\frac{d^2 T}{dz^2} - \frac{2k}{\lambda_c R} T + \frac{Rq_0 + 2kT_2}{\lambda_c R} = 0 \text{ para el calentador de cobre.}$$

$$\frac{d^2 T}{dz^2} - \frac{2k}{\lambda_s R} (T - T_2) = 0 \text{ para el suelo.}$$

$$k = \frac{-\lambda_a}{R \ln(R/R_{ext})}$$

En las ecuaciones anteriores, q_0 es la potencia calorífica inyectada por unidad de volumen, λ_c la conductividad térmica del cobre, λ_s la del suelo y λ_a la del aislante.

La solución de esta ecuación diferencial es:

$$\text{Temperatura del cobre: } T_c(z) = A_1 \exp\left[\sqrt{\frac{2k}{\lambda_c R}} z\right] + B_1 \exp\left[-\sqrt{\frac{2k}{\lambda_c R}} z\right] + \frac{Rq_0 + 2kT_2}{2k}$$

$$\text{Temperatura del suelo: } T_s(z) = A_2 \exp\left[\sqrt{\frac{2k}{\lambda_s R}} z\right] + B_2 \exp\left[-\sqrt{\frac{2k}{\lambda_s R}} z\right] + T_2$$

$$\text{Temperatura del aislante: } T_a(r) = \frac{T - T_2}{\ln R/R_{ext}} \ln \frac{r}{R_{ext}} + T_2, \text{ con } R = \text{radio de la muestra de suelo y}$$

R_{ext} el radio de la muestra más el grosor del aislante, z es la coordenada vertical con origen en el plano medio del calentador.

Los parámetros A_1 , B_1 , A_2 y B_2 se calculan resolviendo las cuatro ecuaciones con cuatro incógnitas que se plantean al aplicar las condiciones de contorno:

$$z = 0: \frac{dT_c}{dz} = 0, \text{ plano de simetría en el calentador}$$

$$z = b: T_s = T_0, \text{ borde del suelo opuesto al calentador,}$$

$z = a : T_s = T_c$ Contacto entre el calentador y el suelo, por continuidad de las temperaturas y $\lambda_s \frac{dT}{dz} = \lambda_c \frac{dT}{dz}$ por continuidad de los flujos de calor.

La solución del problema permite ver la influencia de los distintos parámetros en la distribución final de temperaturas. Se ha elegido un caso genérico a partir del cual, se van modificando parámetros para ver la influencia de cada uno. Los parámetros geométricos son los mismos que los de la muestra ensayada ($R=19$ mm y $R_{\text{ext}}=75$ mm) y unas conductividades térmicas medias para el suelo y el aislante de 0.879 y 0.03755 W/mK respectivamente, la conductividad térmica del cobre es de 384 W/mK (Giek, 1995). Estos valores de los parámetros provienen de la calibración del ensayo 170399a para el caso térmico. La temperatura del borde exterior del aislante se fija en 25° C y la de la base de la muestra en 30° C. La potencia calorífica inyectada por unidad de volumen q_0 es de 38216 W/m³.

Con el fin de acotar la validez de la solución analítica, antes de estudiar el ensayo con la aproximación analítica, se van a comparar los resultados obtenidos con ella con los resultados obtenidos a partir de la solución numérica (3D con axisimetría) que simula con mayor aproximación el problema real y que será descrita con mayor detalle más adelante. En la figura 6.4.1.1, se pueden ver las distintas temperaturas calculadas en el contacto entre el suelo y el calentador para un caso genérico con los parámetros descritos anteriormente en función del grosor del aislante. A medida que éste aumenta, la pérdida de calor radial disminuye y aumenta el calor fugado por la base, con lo que la temperatura del aislante ya no sigue la ecuación diferencial anterior al existir transporte de calor en dos dimensiones. Para un diámetro del conjunto de 50 cm, el error cometido es de unos 13 grados, para la geometría de la célula utilizada en los ensayos (30 cm de diámetro), la diferencia de temperaturas no llega a 7 grados.

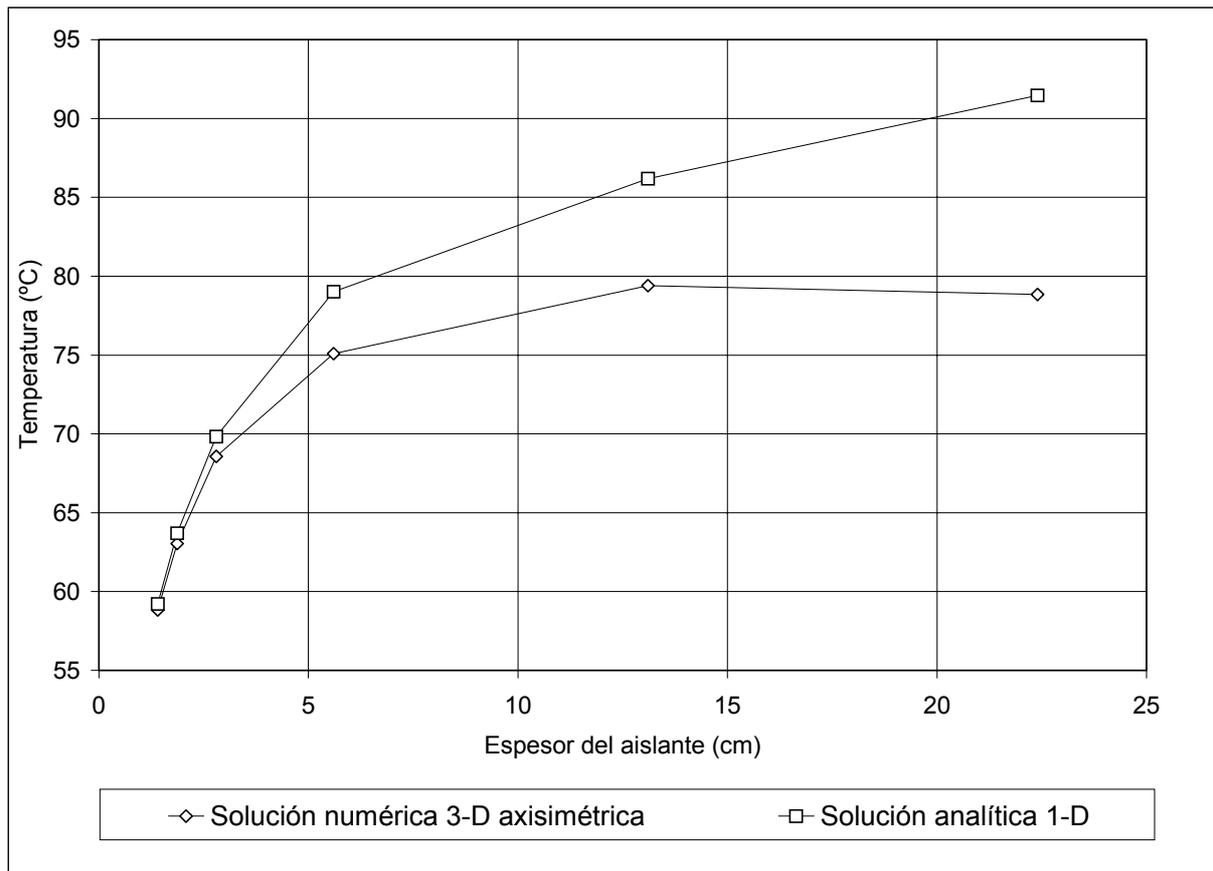


Figura 6.4.1.1. Temperatura en el contacto calentador de cobre - suelo en el eje del conjunto, calculados a partir de la simulación numérica 3-D con axisimetría y la aproximación analítica 1-D para varios espesores del aislante.

Se puede observar que existe dependencia entre las temperaturas que se alcanzan en la muestra y la conductividad térmica del aislante (figura 6.4.1.2). Este parámetro es difícil de cuantificar a priori por dos motivos: por un lado es debido a la propia dispersión de resultados que tienen los fabricantes al medirlo, por otro lado, a la variabilidad del montaje del aislante sobre de la muestra. Esto motivó el estudio previo del problema térmico, tanto en la muestra como en el aislante, como paso previo para estudiar el problema T-H-M del suelo. De este modo, se deduce la conductividad térmica del aislante para cada ensayo.

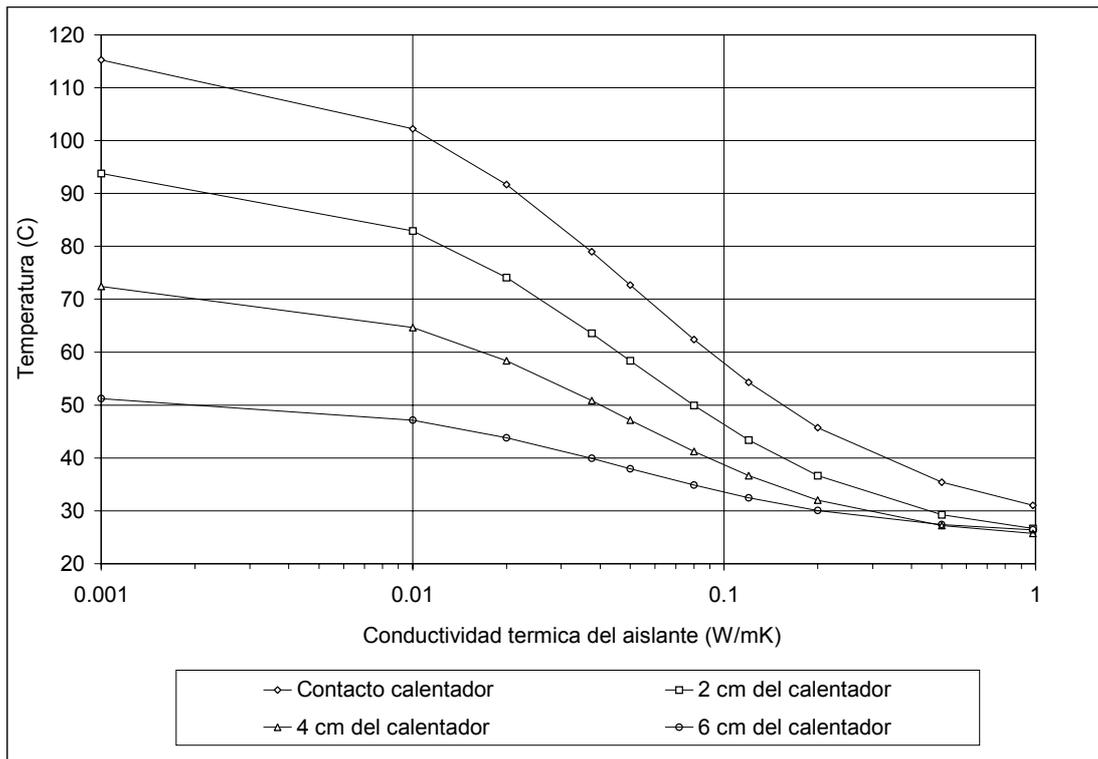


Figura 6.4.1.2. Influencia de la conductividad térmica del aislante en las temperaturas que se alcanzan en la muestra.

La influencia del radio del aislante se puede apreciar en la figura 6.4.1.3. Este parámetro sí se puede controlar bien, ya que se trata tan sólo de una medida de longitud. Sin embargo, hay que tener en cuenta que la fuga de calor radial viene controlada por el parámetro $k/\lambda_s R$, que depende del radio de la muestra, del radio del aislante y de la conductividad térmica de ambos (figura 6.4.1.4).

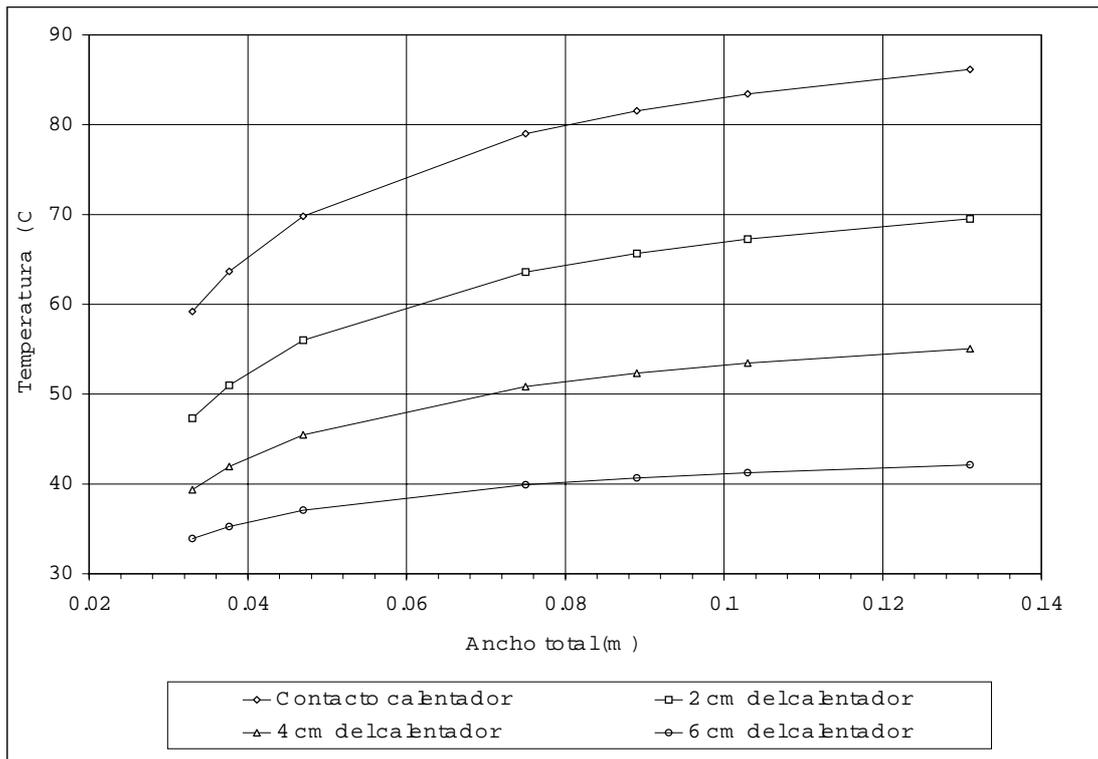


Figura 6.4.1.3. Influencia del radio del aislante en la temperatura de la muestra.

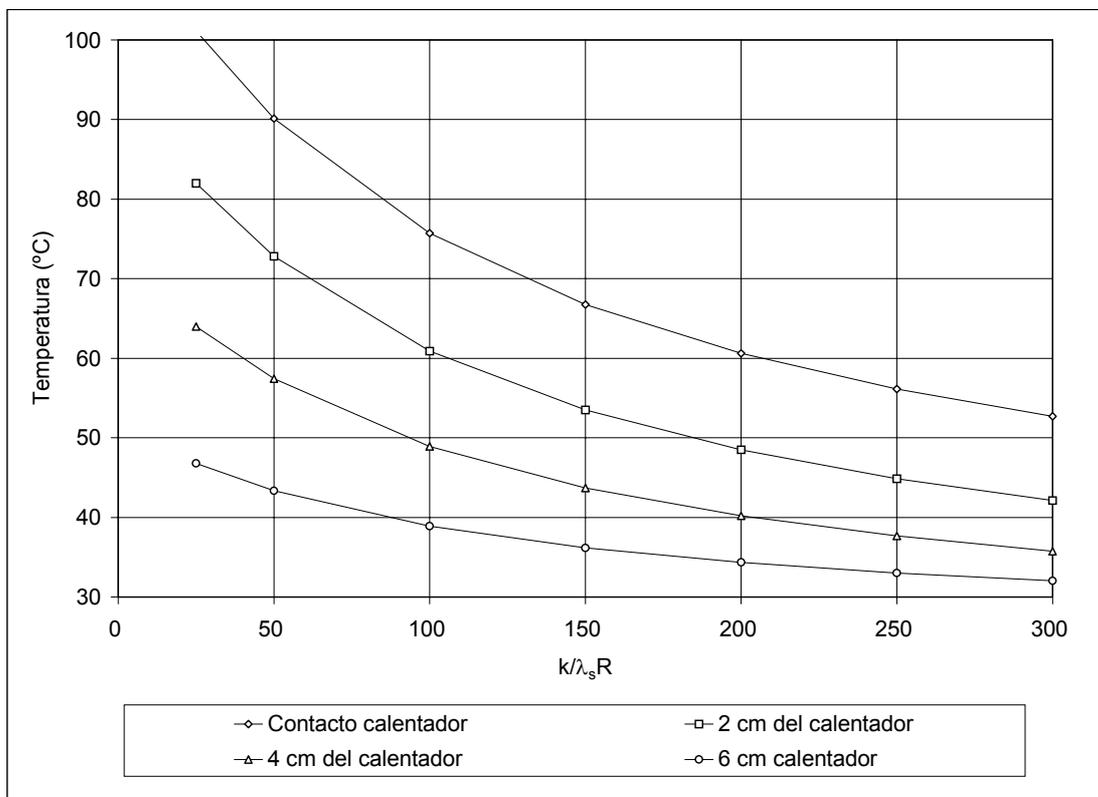


Figura 6.4.1.4. Influencia del parámetro k en la temperatura de la muestra.

Otro aspecto importante en un ensayo es saber dónde colocar los puntos de medida para optimizar el proceso de calibración. Los puntos idóneos son aquellos en los que la variable medida es más sensible a la variación del parámetro. En la figura 6.4.1.5 se muestra el valor de la derivada de la temperatura respecto a la conductividad térmica del suelo según la distancia al centro del calentador. Se puede ver que conforme la conductividad térmica disminuye, los puntos cercanos al calentador adquieren más importancia, también está claro que en cualquier caso, cuanto más cerca del calentador se está, mayor es la variación de la temperatura en los cambios de conductividad térmica del suelo.

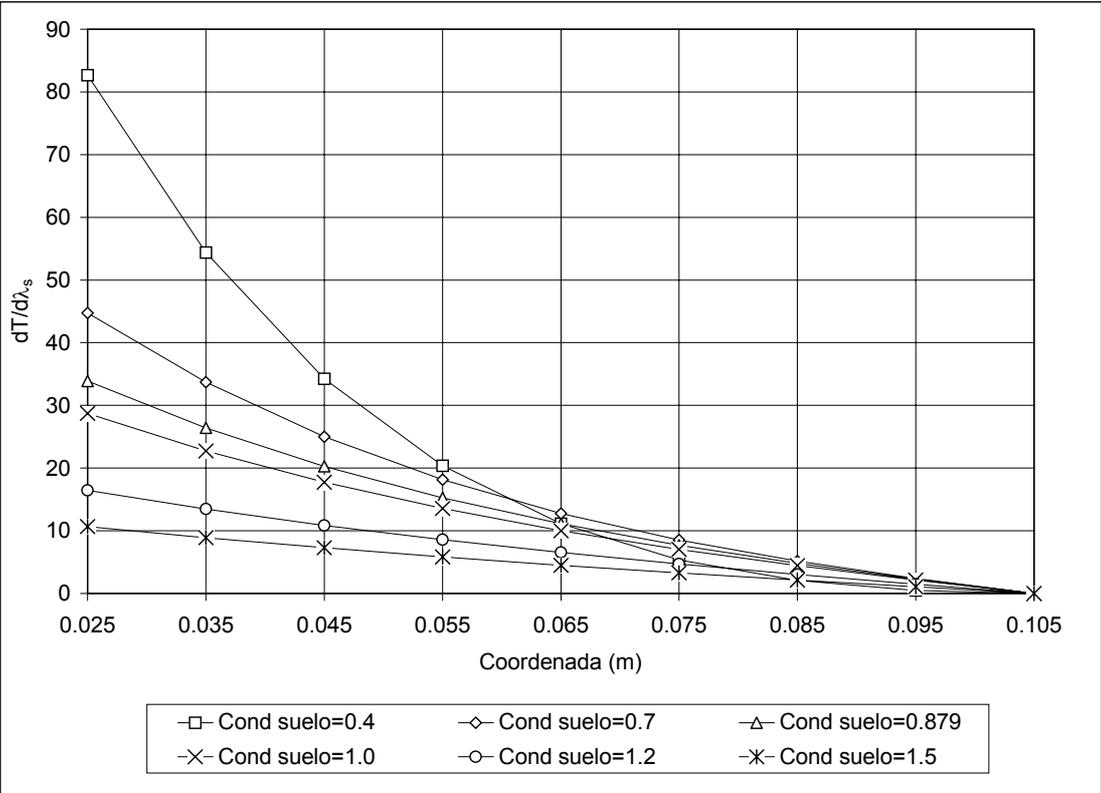


Figura 6.4.1.5. Derivada de la temperatura respecto la conductividad térmica del suelo en función de la posición para varias conductividades térmicas del suelo. El eje de abcisas indica la distancia al plano de simetría del calentador. Conductividades en W/mK.

Otro aspecto importante son las dimensiones del calentador. En la figura 6.4.1.6 se puede ver la variación de la derivada de la temperatura respecto a la conductividad térmica del suelo para varias longitudes del calentador según la distancia al centro del calentador. Del

gráfico se deduce que la longitud del calentador influye poco en la estimación de la conductividad térmica de la muestra.

En la figura 6.4.1.7 está dibujada la variación de la derivada de la temperatura respecto la conductividad térmica del aislante para varias longitudes del calentador. Puede observarse que esta conductividad se estima mejor cuanto mayor es la longitud del calentador, esto es de esperar puesto que el flujo de calor en el aislante es radial y cuanto más largo sea el calentador, más calor fugará por el aislante y por tanto, más sensible a su conductividad térmica será el ensayo.

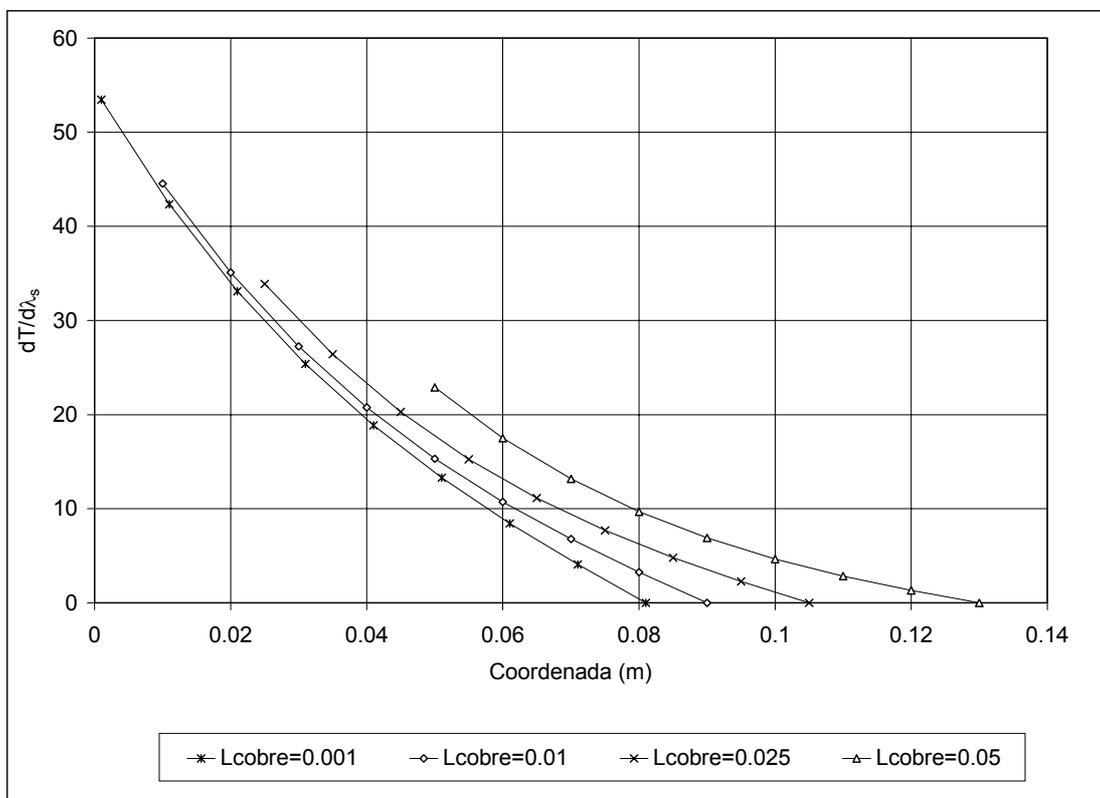


Figura 6.4.1.6. Derivada de la temperatura respecto la conductividad térmica del suelo para varias dimensiones del calentador. Longitudes en metros. Por simetría, en el ensayo de laboratorio, la longitud del calentador de cobre es la indicada en el gráfico multiplicada por dos.

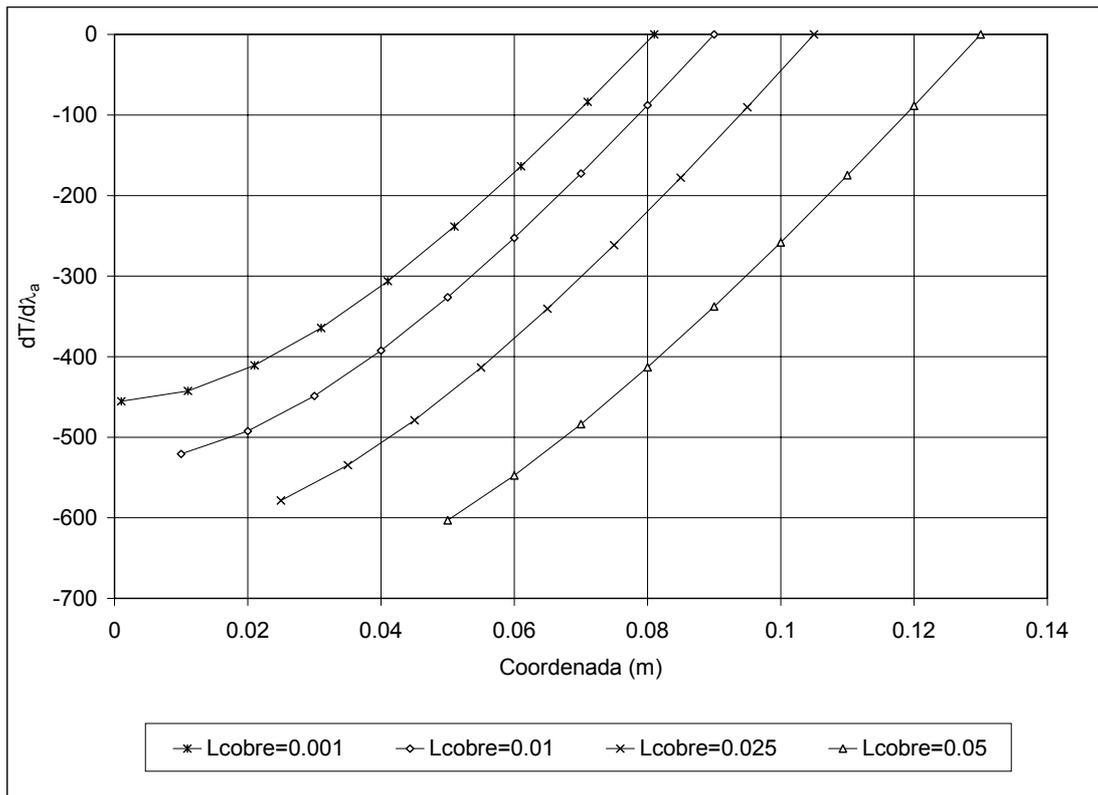


Figura 6.4.1.7. Derivada de la temperatura respecto de la conductividad térmica del aislante para varias dimensiones del calentador. Por simetría, en el ensayo de laboratorio, la longitud del calentador de cobre (en metros) indicada en el gráfico multiplicada por dos.

De lo mostrado anteriormente, se deduce que las dimensiones del calentador son adecuadas para el ensayo, aunque éste puede mejorarse ligeramente reduciendo su tamaño. El grosor de la capa de aislante mejora el ensayo reduciendo las pérdidas. Sin embargo, para dimensiones importantes de este grosor, la aproximación 1-D deja de ser válida.

6.4.2 ESTUDIO DE LA SOLUCIÓN NUMÉRICA

Con el fin de estudiar los diversos fenómenos que se producen en el interior de una muestra durante un ensayo de conductividad térmica sin confinamiento manteniendo la humedad global constante, se ha simulado un ensayo de laboratorio con el programa CODE_BRIGHT. El análisis realizado es termo-hidro-mecánico, de este modo, se puede observar la influencia del cambio de temperatura y de succión en los desplazamientos que se producen. También se puede estudiar el grado de acoplamiento existente entre el problema

térmico e hidráulico. Otro aspecto interesante del análisis numérico realizado es que se puede cuantificar la evolución de las variables del problema para intervalos de tiempo muy largos que en el laboratorio son inviables. En la tabla 6.4.2.1 se muestran las leyes constitutivas y los parámetros asociados a éstas.

<i>Curva de retención</i>	$S_e = \frac{S_l - S_{rl}}{S_{ls} - S_{rl}} = \left(1 + \left(\frac{P_g - P_l}{P} \right)^{\frac{1}{1-\beta}} \right)^{-\beta} \left[1 - \frac{s}{P_s} \right]^{\beta_s} ;$ $P = P_o \frac{\sigma(T)}{\sigma_o}$	$\beta = 0.30$ $\beta_s = 1.5$ $P_o = 35 \text{ MPa}$ $P_s = 4000 \text{ MPa}$
<i>Flujo de líquido</i>	$q_l = \frac{\mathbf{k} k_{rl}}{\mu_l} (\nabla P_l - \rho_l \mathbf{g})$ $k = k_o \frac{\phi^3}{(1-\phi)^2} \frac{(1-\phi_o)^2}{\phi_o^3}$ $k_{rl} = (S_e)^n ; S_e = \frac{S_l - S_{rl}}{S_{ls} - S_{rl}}$	$\mathbf{k} = k \mathbf{I} \text{ (m}^2\text{)}$ $k_o = 2.77 \cdot 10^{-21} \text{ m}^2$ $S_{ls} = 1.0$ $S_{rl} = 0.01$ $n = 3.0$
<i>Flujo conductivo de calor</i>	$i_c = -\lambda \nabla T ; \lambda = \lambda_{sat}^{S_l} \lambda_{dry}^{(1-S_l)}$	$\lambda_{sat} = 1.15 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ $\lambda_{dry} = 0.47 \text{ W/m}^\circ\text{C}$
<i>Calor específico de la fase sólida</i>	$c_s = 1.38T + 732.52$	$c_s \text{ (J/kg}^\circ\text{C)}, T \text{ (}^\circ\text{C)}$
<i>Difusión de vapor</i>	$D_m^w = \tau D = \tau \cdot 5.9 \times 10^{-12} \left(\frac{(273.15 + T)^{2.3}}{P_g} \right)$	$\tau = 0.8, D_m^w \text{ (m}^2\text{)}$
<i>Mecánico relacionado con la tensión y la succión</i>	$\varepsilon_v^e = -\frac{k_i}{1+e_o} \ln \frac{p}{p_i} - \frac{k_s}{1+e_o} \ln \left(\frac{s+p_{at}}{s_i+p_{at}} \right)$ $k_i = k_{i0} (1 + \alpha_{is} s)$ $k_s = k_{s0} (1 + \alpha_{sp} \ln(p/p_i)) \exp(\alpha_{ss} s)$	$k_{i0} = 5 \times 10^{-2}$ $k_{s0} = 2.5 \times 10^{-1}$ $\nu = 0.4$ $\alpha_{ss} = -0.03 \text{ MPa}^{-1}$ $\alpha_{is} = -0.003 \text{ MPa}^{-1}$ $\alpha_{sp} = -0.161$
<i>Mecánico relacionado con la temperatura</i>	$\varepsilon_v^e = \alpha(\Delta T, p) \Delta T$ $\alpha(\Delta T, p) = \alpha_o^* + \alpha_2 \Delta T + (\alpha_1 + \alpha_3 \Delta T) \ln \frac{p}{p_i}$	$T_{ref} = 20^\circ\text{C}$ $\alpha_o = 1.5 \times 10^{-4}$ $\alpha_2 = 0$
<i>General</i>		$\phi = 0.402$ $P_g = 0.1 \text{ MPa}$

Tabla 6.4.2.1. Leyes constitutivas y parámetros utilizados en el análisis numérico

6.4.2.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL

La malla de elementos finitos utilizada puede verse en la figura 6.4.2.1.1. Las dimensiones de la muestra son 38 mm de diámetro y 77.7 mm de altura. El radio exterior del aislante es de 75 mm y la altura del cobre de 25 mm. El número de nodos es de 260 y el de elementos de 225, repartidos entre 20 de cobre, 125 de aislante y 180 de suelo. El problema es tridimensional con simetría cilíndrica. Puesto que se trabaja con dos muestras separadas por una pieza de cobre colocadas en sentido vertical y dada la baja influencia de la gravedad en el problema, se considera que el plano medio de la pieza de cobre de 50 mm de altura es un plano de simetría.

Condiciones de contorno mecánicas (cotas en mm):

- $x=0, y=0$: Punto fijo.
- $0 < x < 75, y=0$. Movimiento vertical impedido.
- $x=75, y=0$. Movimiento vertical impedido y tensión radial de 0.101 MPa a compresión (tensión neta de 0.001 MPa).
- $x=0, y < 103$. Movimiento horizontal impedido.
- $x=0, y=103$. Movimiento horizontal impedido y tensión vertical de 0.135 MPa de compresión (tensión neta de 0.035 MPa).
- $0 < x < 75, y=103$. Tensión vertical de compresión de 0.135 MPa.
- $x=75, y=103$. Tensión vertical de 0.135 MPa y radial de 0.101 MPa, ambas de compresión.
- $x=75, 0 < y < 103$. Tensión radial de 0.101 MPa de compresión.

La tensión radial se debe a la presión atmosférica (0.1 MPa) y al casi nulo efecto del confinamiento de la membrana. La tensión vertical se debe también a la presión atmosférica y al peso colocado encima de las muestras para asegurar un buen contacto entre éstas y el calentador.

Condiciones de contorno hidráulicas: Se impone una presión de agua en los nodos situados en el interior del cobre y del aislante constante e igual a -83 MPa, que es la presión de agua inicial del suelo. De este modo, no hay problemas numéricos derivados de imponer una permeabilidad casi nula ($k_{\theta}=3.5 \times 10^{-36} \text{ m}^2$ en ambos) y el flujo a través de éstos sigue

siendo nulo. En la base del suelo se impone flujo nulo. Para asegurar que no hay flujo de vapor no advectivo por el aislante y el cobre del calentador, se impone un valor de la tortuosidad de 1×10^{-10} en ambos materiales.

Condiciones de contorno térmicas: Se impone un flujo de calor en nodos del cobre que cumplen $x=0$, $y > 77.7$ mm de 92.9 kW/m^3 y en $x=14.25$ mm, $y > 77.7$ mm de 228 kW/m^3 . En el plano de simetría horizontal, se impone flujo nulo, en $x=75$ se aumenta la temperatura de 22° a 25° C y en la base de la muestra se aumenta hasta 30° C. En los nodos cuyas coordenadas son $19 < x < 75$ e $y=0$, la temperatura varía linealmente entre la del contorno exterior y la de la base de la muestra.

Un aspecto importante del problema mecánico es conseguir que el cobre y el aislante no influyan en el movimiento de la muestra, para ello, se les asigna una rigidez lo más baja posible. La bondad de esta rigidez ($E=0.0015$ MPa y $\nu=0.3$), se aprecia en los movimientos horizontales del nodo que une el cobre con el suelo en el perímetro de la muestra, cuyo movimiento hacia el eje de la misma debe ser mayor que el resto de nodos. Hay que tener en cuenta que el comportamiento del contacto cobre - muestra no se conoce bien: la fuerza de rozamiento debida peso que se coloca encima del conjunto para asegurar el contacto entre ambos materiales es desconocida, aunque puede suponerse que será lo suficientemente baja como para no influir en los movimientos horizontales del suelo.

Condiciones iniciales: El cobre y el aislante tienen una porosidad de 0.0001. El suelo tiene una porosidad variable impuesta a partir de las medidas de los cambios de diámetro debidos a la retracción - hinchamiento provocados por el movimiento del agua. El estado tensional inicial tiene una tensión radial de 0.101 MPa y una tensión vertical total de 0.135 MPa (neta de 0.035 MPa). La temperatura inicial es de 22° C y la presión de agua inicial es de -83 MPa.

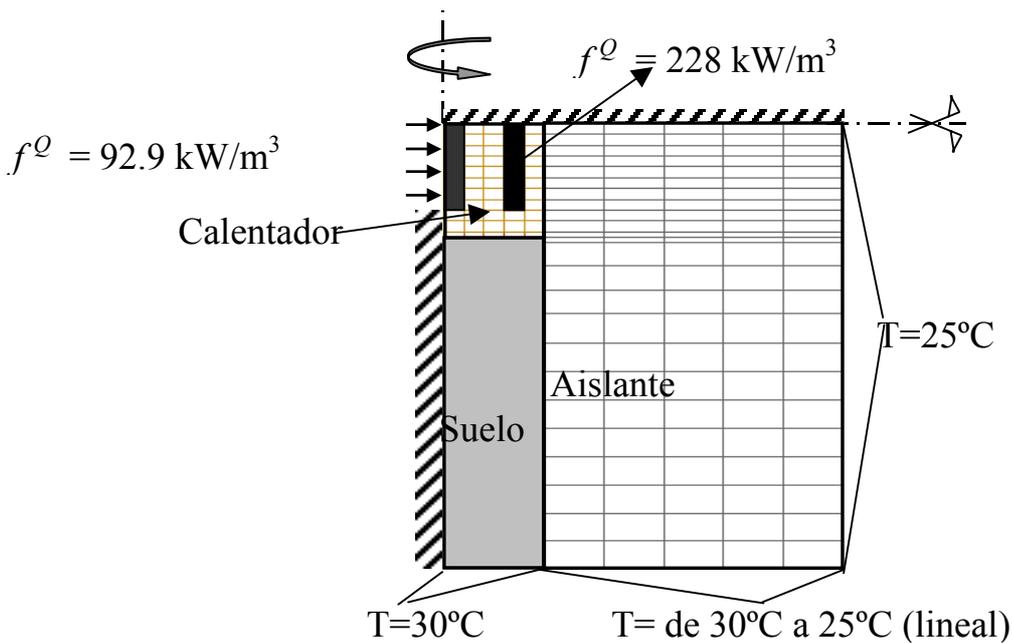


Figura 6.4.2.1.1. Malla de elementos finitos utilizada y condiciones de contorno térmicas

6.4.2.2 DESCRIPCIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN: PARTE TÉRMICA

En este apartado se recogen los resultados de la simulación numérica asociados a la parte exclusivamente térmica del ensayo.

El aspecto más interesante es que una vez se ha llegado al estado estacionario del flujo de calor conductivo, se puede observar un aumento de la temperatura en las proximidades del cobre y una disminución de la misma en los nodos próximos al borde frío. Esto se debe a que la disminución del contenido de agua disminuye la conductividad térmica y viceversa (figura 6.4.2.2.1).

El sistema alcanza una situación cuasiestacionaria de temperaturas al cabo de unas 28 horas que se ve afectada posteriormente por la evolución dinámica inducida por el transporte de agua líquida, con un transitorio hidráulico que tiene una escala de tiempo muy superior al transitorio térmico (semanas para el hidráulico y horas para el térmico).

En la figura 6.4.2.2.2, se presenta la distribución de temperaturas del estado estacionario en el conjunto cobre-suelo-aislante. En línea continua están las temperaturas de la modelación numérica y en línea discontinua la solución analítica, exclusivamente térmicas. La conductividad térmica media del suelo estimada es algo diferente (0.879 W/mK para la solución numérica 3-D con axisimetría medida por retroanálisis y 0.972 W/mK para la solución analítica, medida por el método de prueba y error). Sin embargo, la distribución de temperaturas es muy parecida, pudiéndose concluir que el flujo de calor en la muestra es principalmente unidimensional.

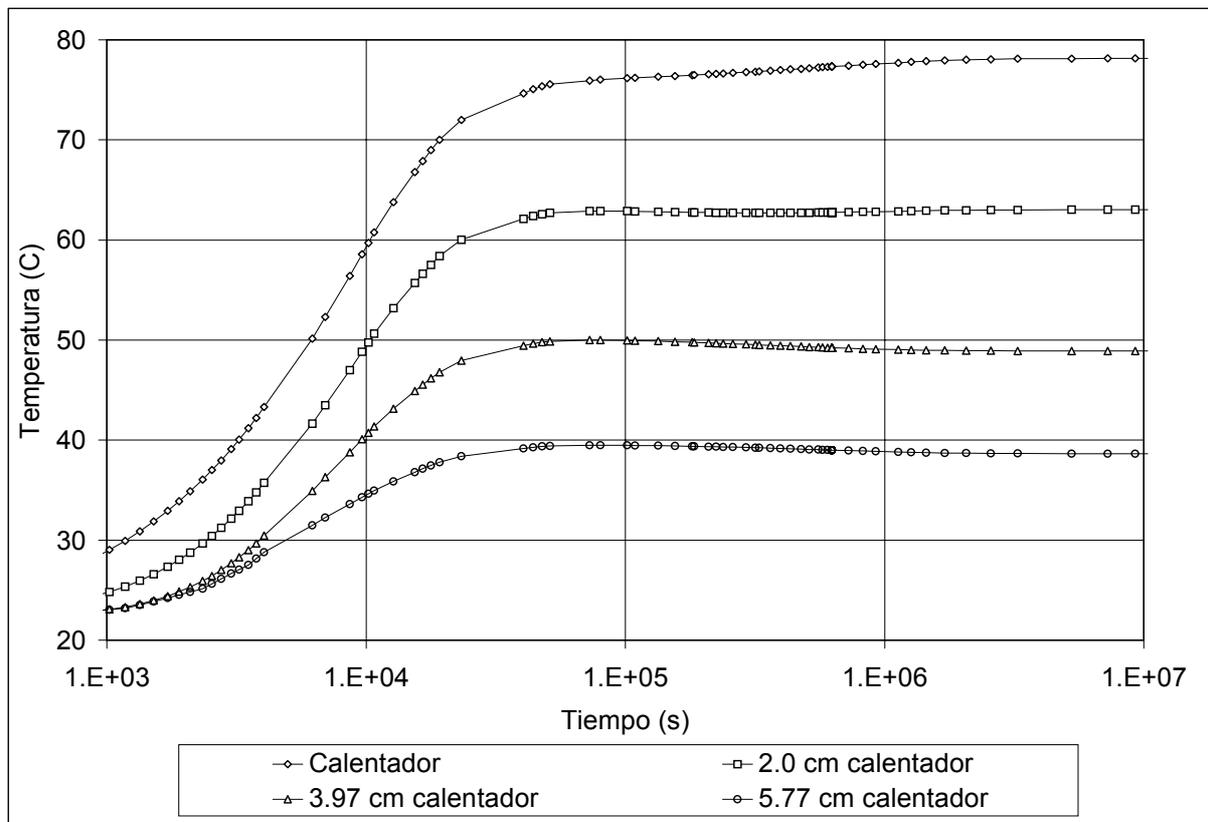


Figura 6.4.2.2.1. Evolución temporal de las temperaturas calculadas con los parámetros indicados en la tabla 6.4.2.1.

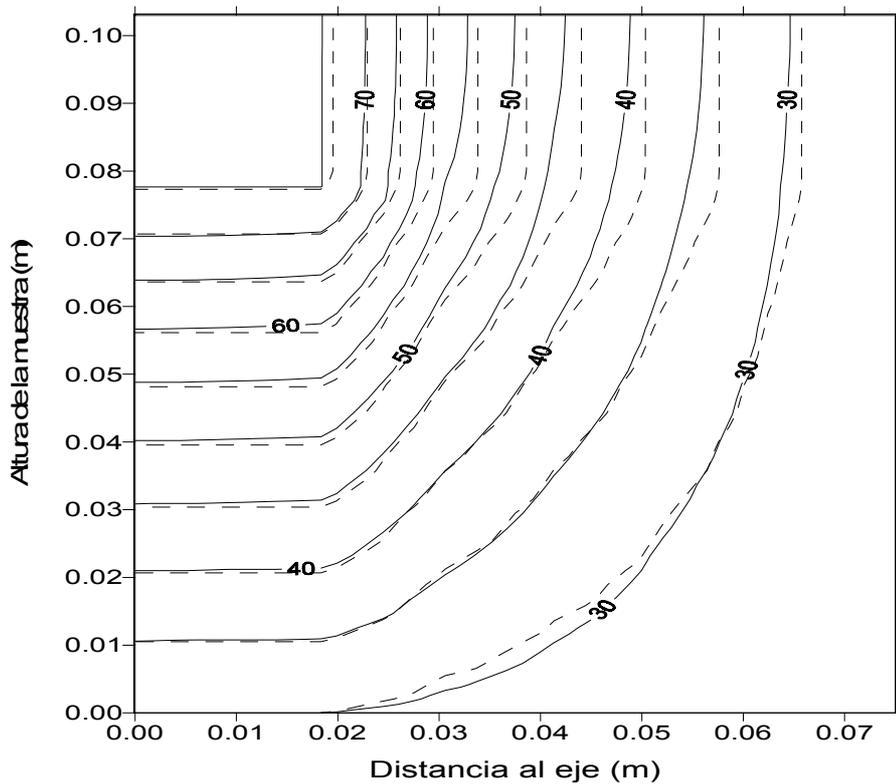


Figura 6.4.2.2.2. Distribución de temperaturas en la célula de ensayo en estado estacionario. Las líneas continuas representan la solución analítica y las discontinuas la solución numérica.

El flujo de calor en la muestra es prácticamente vertical. En el aislante, si bien el flujo es casi radial en la zona cercana al calentador, va adquiriendo componente vertical a medida que se está más cerca del contorno frío.

6.4.2.3 DESCRIPCIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN: PARTE HIDRÁULICA

Es la parte más interesante del ensayo por las repercusiones que tiene a la hora de hacer la estimación de parámetros. El movimiento del agua está originado por cambios de temperatura, por lo que es de esperar que el movimiento del agua va a ser básicamente en forma de vapor. En la figura 6.4.2.3.1 se puede ver la magnitud del flujo de agua líquida y vapor en varios puntos y en varios instantes.

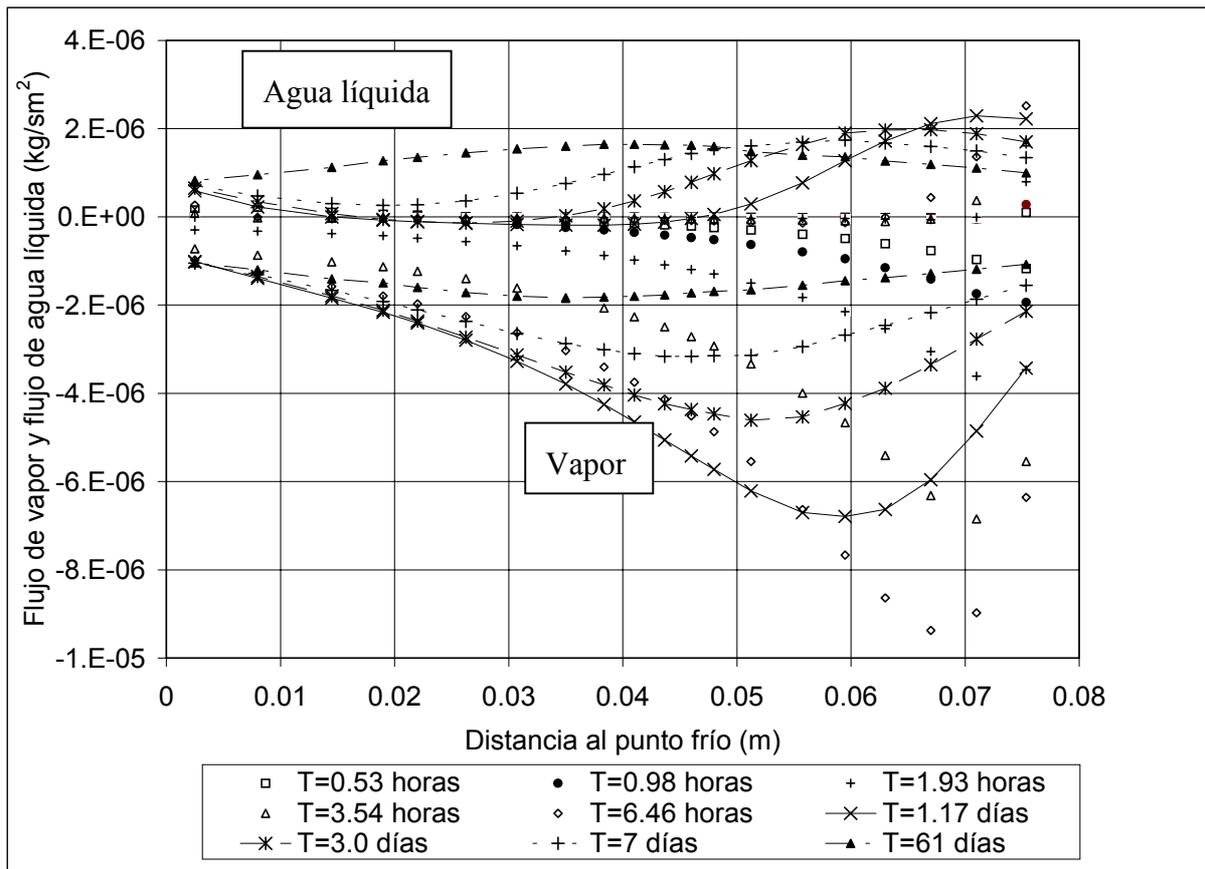


Figura 6.4.2.3.1. Flujos de vapor y agua líquida durante el ensayo. El sentido negativo indica que el flujo va de la zona caliente a la fría.

El gráfico anterior confirma que durante la fase transitoria hidráulica, la distribución de humedades está fuertemente condicionada al movimiento de agua en forma de vapor y menos al movimiento en forma líquida. Este aspecto es fundamental a la hora de utilizar el ensayo para calibrar modelos. A priori, parece claro que los parámetros que rigen el movimiento de vapor serán estimados con mayor exactitud que los que rigen el movimiento de agua líquida. Puede observarse como en condiciones estacionarias, los flujos de agua líquida y de vapor se equilibran ya que la muestra está aislada bajo el punto de vista hidráulico. La variación de la humedad con el tiempo puede verse en la figura 6.4.2.3.2.

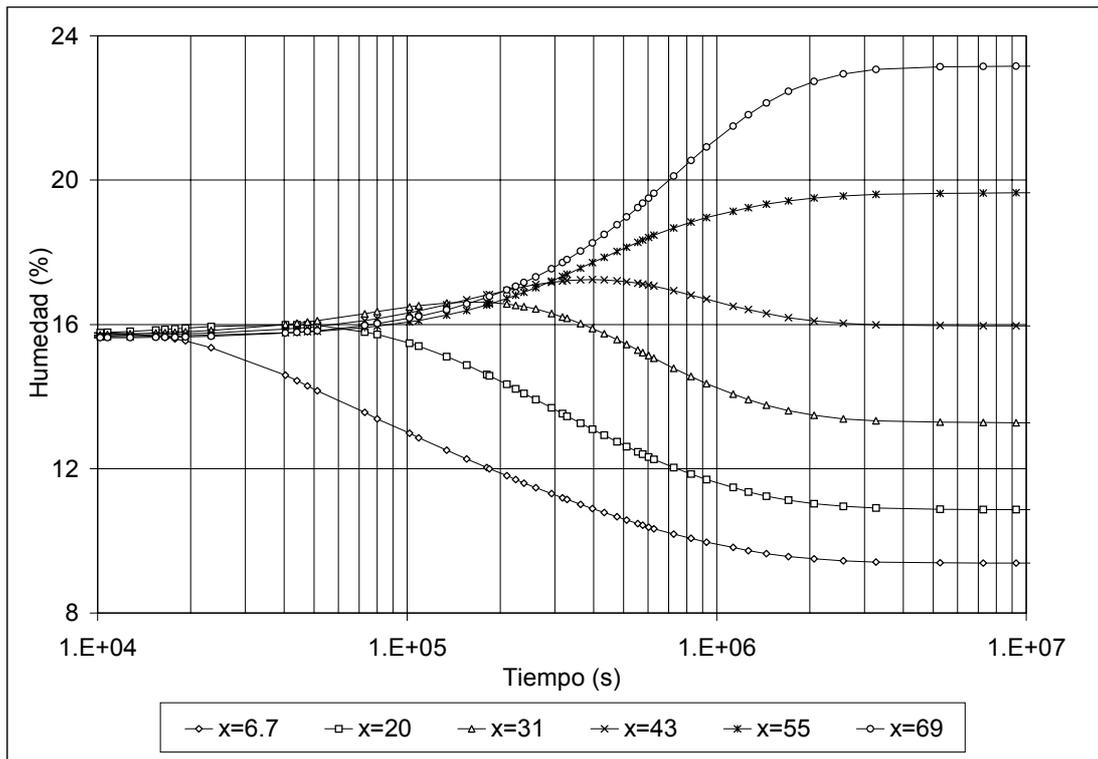


Figura 6.4.2.3.2. Variación de la humedad con el tiempo en función de la distancia al calentador. Las distancias están expresadas en mm.

La distribución de la presión del líquido y de la humedad en función de la altura de la muestra para varios tiempos puede verse en las figuras 6.4.2.3.3 y 6.4.2.3.4. En la figura 6.4.2.3.5a, puede verse la distribución de la fracción másica de vapor de agua en el gas y en la figura 6.4.2.3.5b, la distribución de presión de agua. Ambos gráficos sugieren que tanto el flujo de agua líquida como de vapor, son unidimensionales al ser las curvas de nivel casi perpendiculares a la generatriz de la muestra. Las distribuciones indicadas corresponden al cuarto día de ensayo.

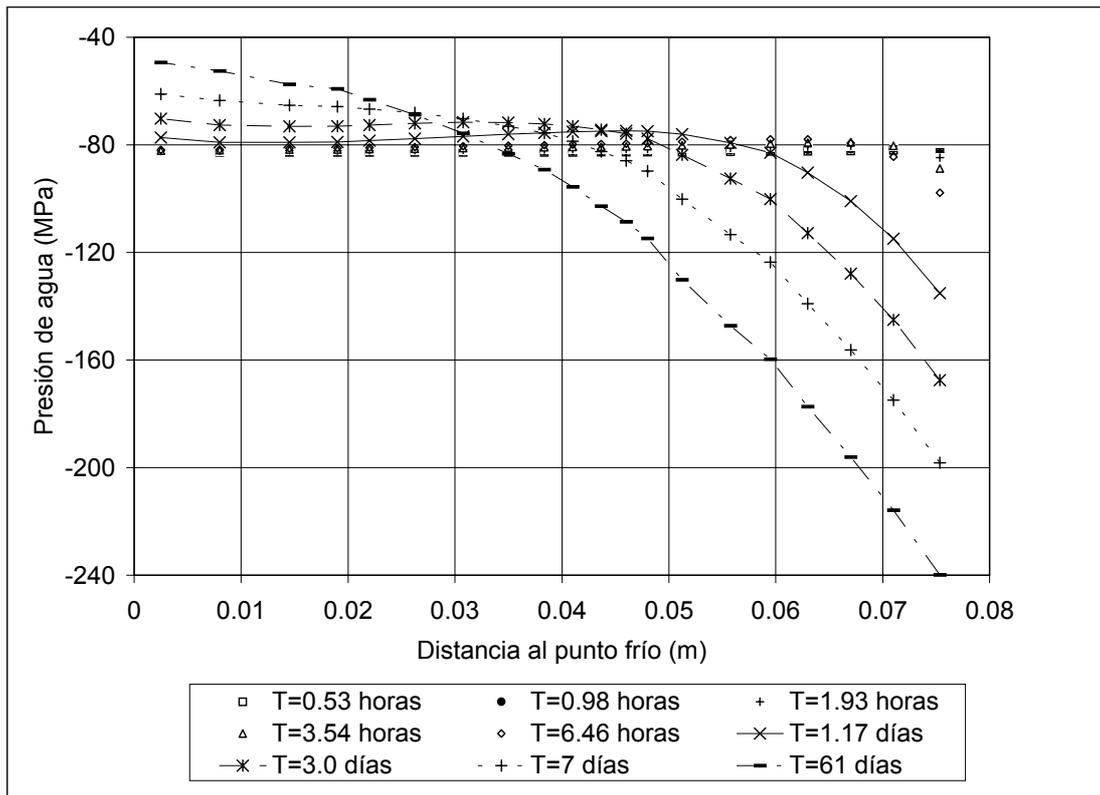


Figura 6.4.2.3.3. Distribución de las presiones de agua con la altura de la muestra para varios tiempos.

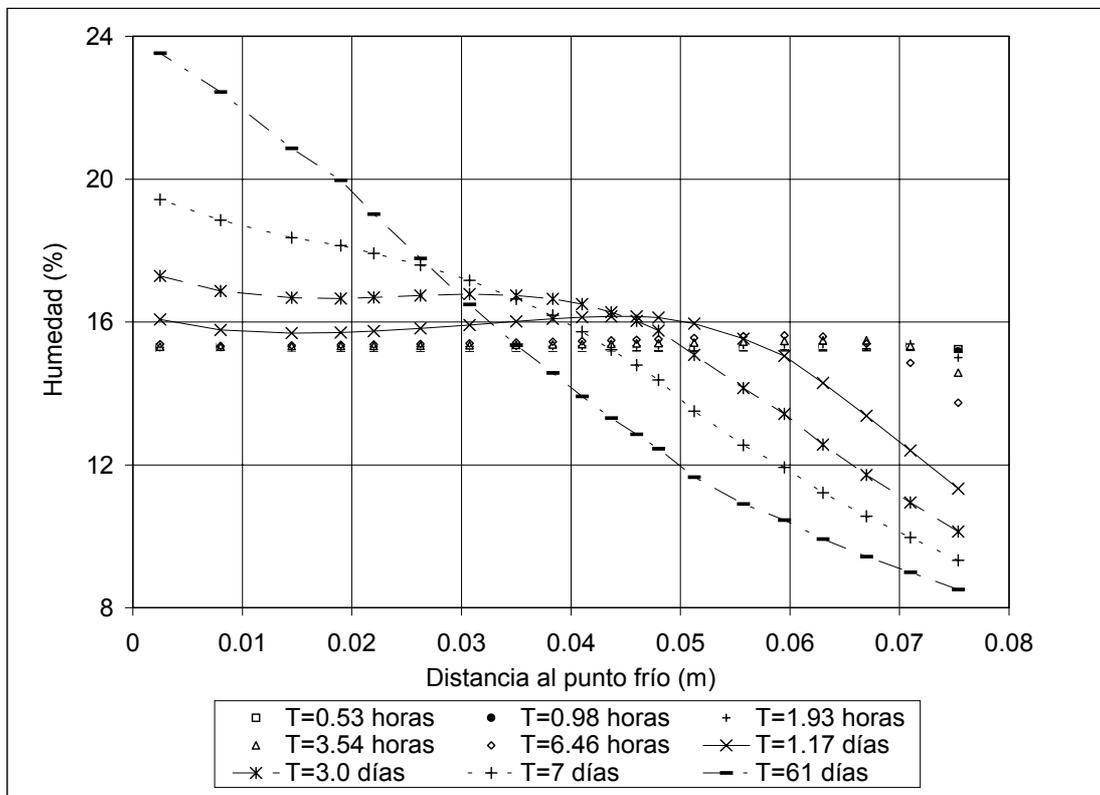
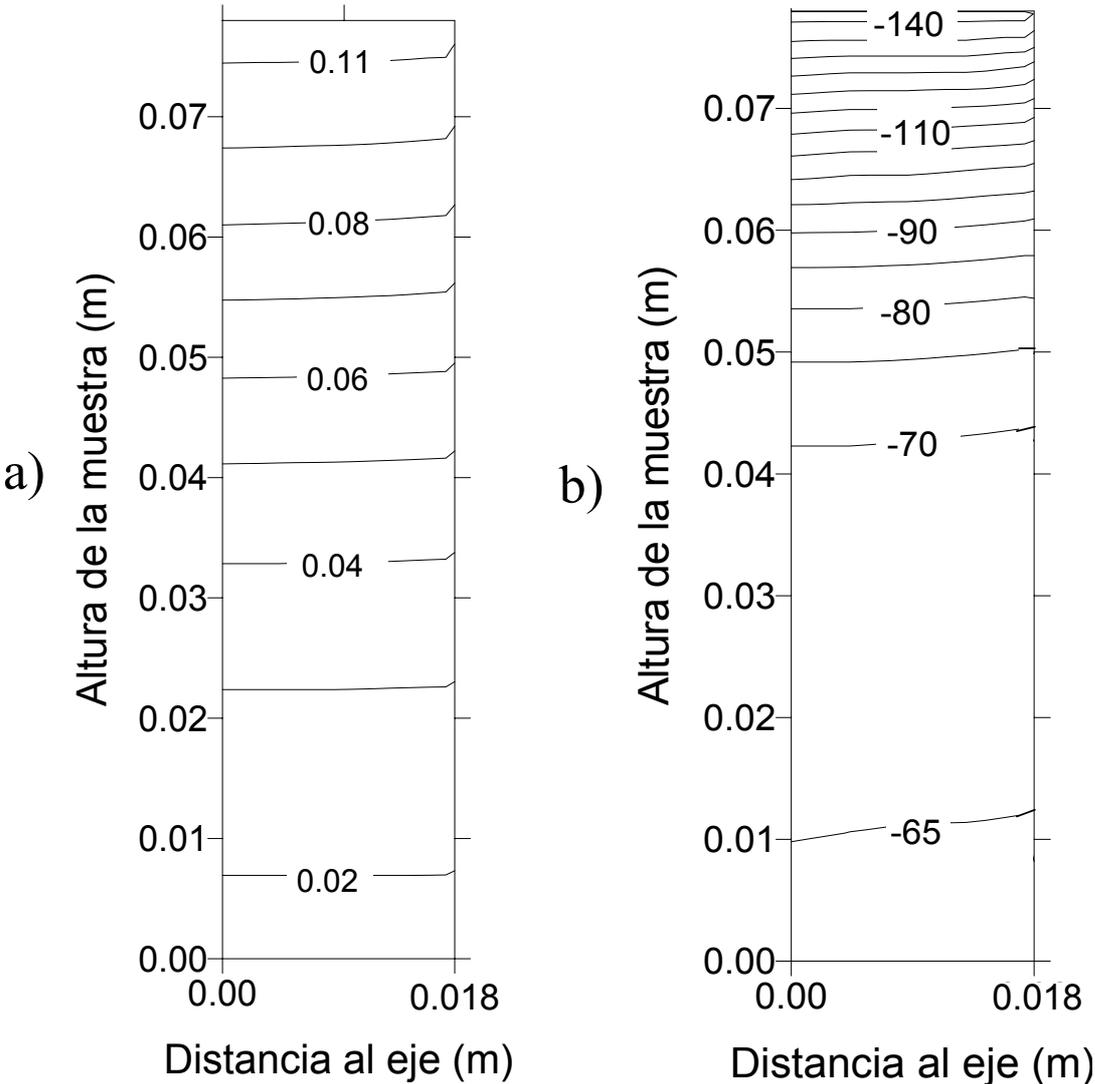


Figura 6.4.2.3.4. Distribución de las humedades con la altura de la muestra para varios tiempos.

De los gráficos anteriores, se deduce que las condiciones estacionarias se alcanzan en algo más de dos meses y que el flujo de calor es básicamente conductivo a pesar de la gran capacidad de transporte de calor que tiene el agua. A partir de los resultados de la simulación, en la sección situada a 66 mm de la base fría y en el instante de tiempo $t=6.46$ horas es cuando se tiene mayor caudal de vapor. En ese instante, el transporte de calor por conducción es 20 veces mayor que el transporte por movimiento de vapor y 1000 veces mayor que el transporte por movimiento de agua líquida.



Figuras 6.4.2.3.5: a) Fracción másica de vapor en el gas y b) presiones de agua a lo largo de la muestra en el cuarto día de inyección de calor.

6.4.2.4 DESCRIPCIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN: PARTE MECÁNICA

El modelo mecánico utilizado es el termo-elasto-plástico (Gens, 1995). La succión, la temperatura y las tensiones permanecen en la zona elástica del modelo, por lo que no hay cambios en la superficie de fluencia. Esto hace imposible calibrar el modelo para la parte plástica. Tampoco hay cambio en el estado tensional y, por tanto, tampoco van a intervenir los parámetros del modelo involucrados estrictamente en cambios de tensión. Sin embargo, como se ha visto anteriormente, hay cambios importantes de succión que provocan las deformaciones en la muestra. En las figuras 6.4.2.4.1 y 6.4.2.4.2 se pueden ver las deformaciones radiales y verticales calculadas. Como puede apreciarse, las deformaciones debidas a los cambios de temperatura (se considera que a partir de las 10 horas la temperatura apenas varía, por lo que ya no hay más deformaciones de origen térmico) son inferiores a las debidas a cambios de humedad, ya que hasta pasados unos 60 días, la humedad no alcanza las condiciones estacionarias (figura 6.4.2.3.2). Esta diferencia es otro indicio sobre el desacoplamiento existente entre la parte transitoria del problema térmico y la del problema hidráulico.

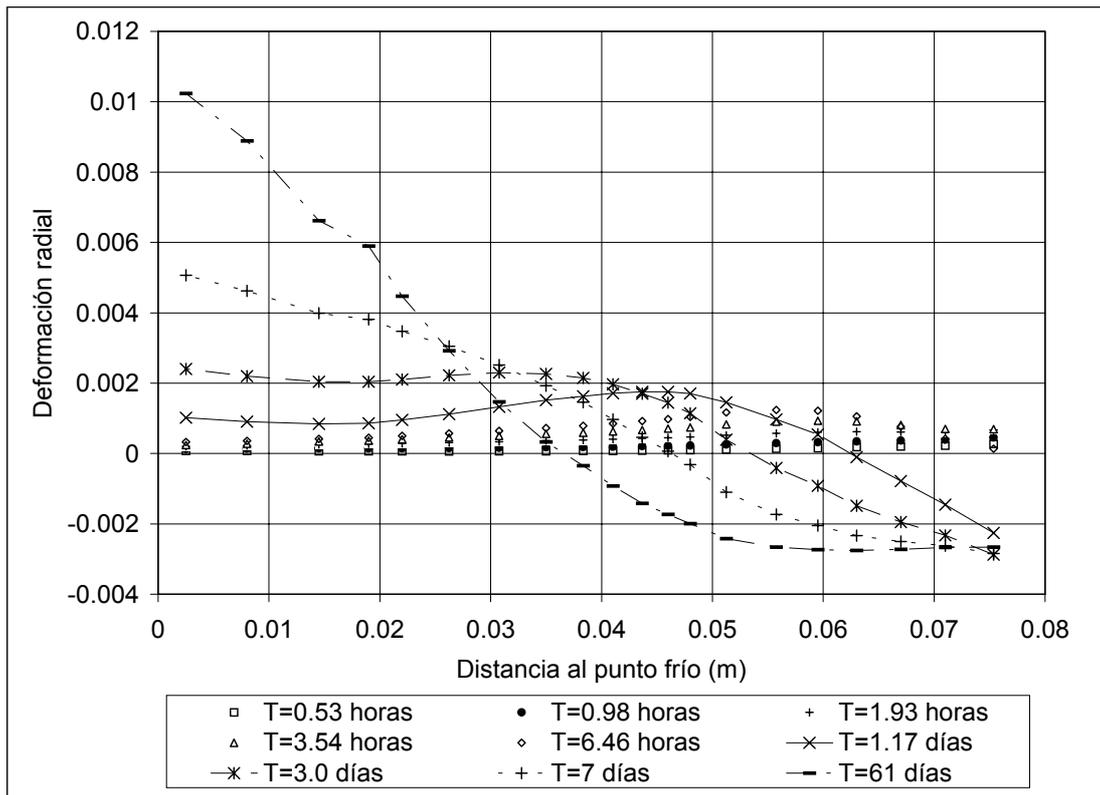


Figura 6.4.2.4.1. Deformaciones radiales a lo largo de la muestra para varios tiempos.

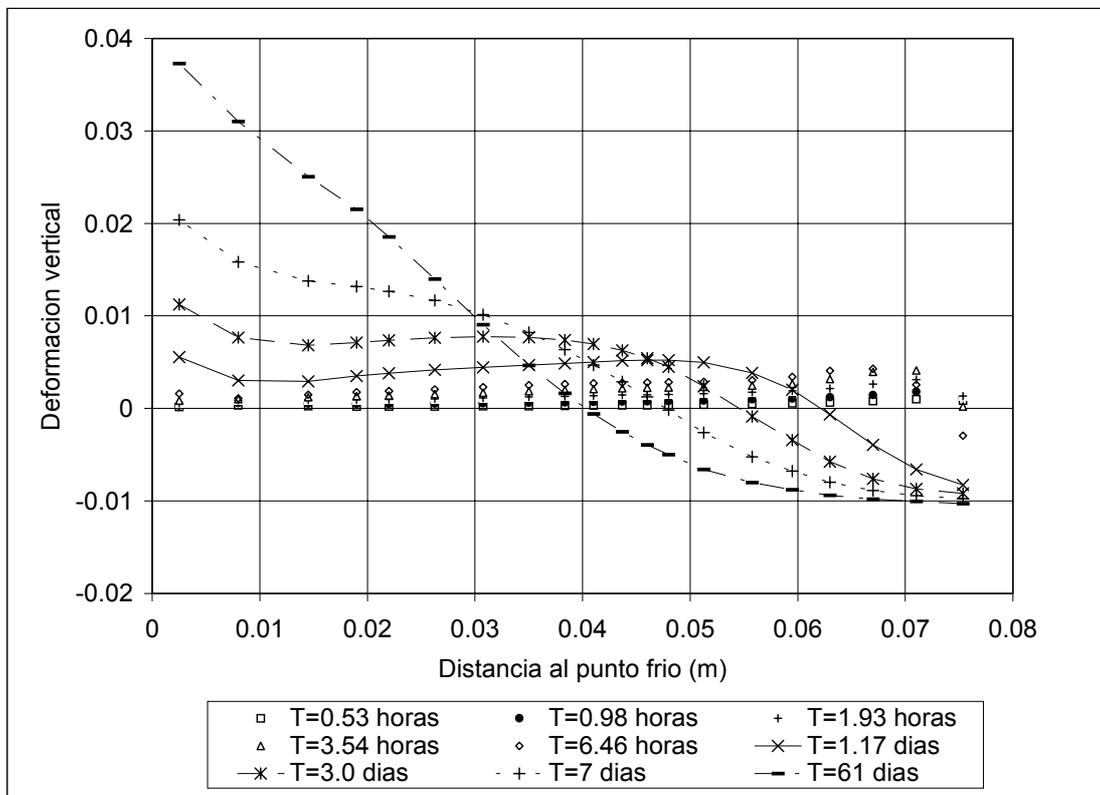


Figura 6.4.2.4.2. Deformaciones verticales a lo largo de la muestra para varios tiempos.

6.4.3 RETROANÁLISIS DEL ENSAYO

En el capítulo 3 se ha descrito la técnica utilizada en esta tesis para realizar la identificación de los parámetros del modelo. En estos apartados se utiliza esa técnica para obtener parámetros a partir del ensayo de flujo de calor con humedad global constante descrito en el apartado 3.4 utilizando como modelos los disponibles en el programa CODE_BRIGTH (descritos en el apartado 3.2.3).

En este apartado, se consideraran varios ejemplos donde sólo se identifican dos o tres parámetros. La identificación simultanea de más de tres parámetros es compleja y muchas veces poco realista. Cuando se procede a la identificación de parámetros, es frecuente realizar previamente análisis más simples y asumir que varios de los parámetros involucrados son conocidos. Por ejemplo, si sólo hay dos parámetros a identificar, es posible dibujar la función objetivo y seguir el camino del algoritmo iterativo hacia el mínimo. Es conveniente realizar esto para comprender el acoplamiento entre los dos parámetros. Se han considerado tres casos:

a) *Caso térmico*: Utilizando la temperatura medida en la muestra en varios tiempos, las propiedades térmicas de la arcilla (conductividad térmica global, λ_c y el calor específico global C_e) se identifican. Sólo se resuelve el problema térmico.

b) *Caso hidráulico*: A partir de la humedad medida al final del ensayo en diferentes puntos de la muestra, se identifican dos parámetros hidráulicos de la arcilla (la tortuosidad, τ , y el exponente de la ley de permeabilidad no saturada, n). El problema resuelto es termo-hidráulico, aunque los parámetros térmicos se suponen conocidos.

c) *Caso termo-hidráulico*: Se utilizan las medidas de humedad tomadas al final del ensayo y las medidas de temperatura tomadas durante el desarrollo del mismo para identificar dos parámetros hidráulicos (la tortuosidad, τ , y el exponente de la permeabilidad no saturada, n) y un parámetro térmico (la conductividad térmica saturada, λ_{sat}). Se resuelve el problema termo-hidráulico.

En todos los casos, los parámetros que no se identifican o no se mencionan explícitamente son los indicados en la tabla 6.4.2.1. La geometría y las condiciones de contorno son las indicadas en la figura 6.4.2.1.1.

6.4.3.1 CASO TÉRMICO

Puesto que CODE_BRIGHT está pensado para trabajar con medios porosos, para considerar un material homogéneo (calentador, aislante y en este caso, el propio suelo), se considera una porosidad prácticamente nula ($\phi=0.0001$). Si se resuelve sólo el caso térmico, las únicas propiedades relevantes de los materiales serán su calor específico y su conductividad térmica.

En todos los casos, primero debe obtenerse la conductividad térmica del aislante. Para ello, debe resolverse el problema de inyección de calor en tres medios homogéneos en estado estacionario identificando los valores de la conductividad térmica del aislante y del suelo considerado como un medio homogéneo. El número de puntos de medida de temperaturas a utilizar es de como mínimo dos, ya que si sólo se dan como datos la inyección de calor y la temperatura en el calentador para no tener que perforar la membrana que rodea la muestra, se pueden tener infinitas soluciones, tal como muestra la figura 6.4.2.1.1 construida a partir de la solución analítica.

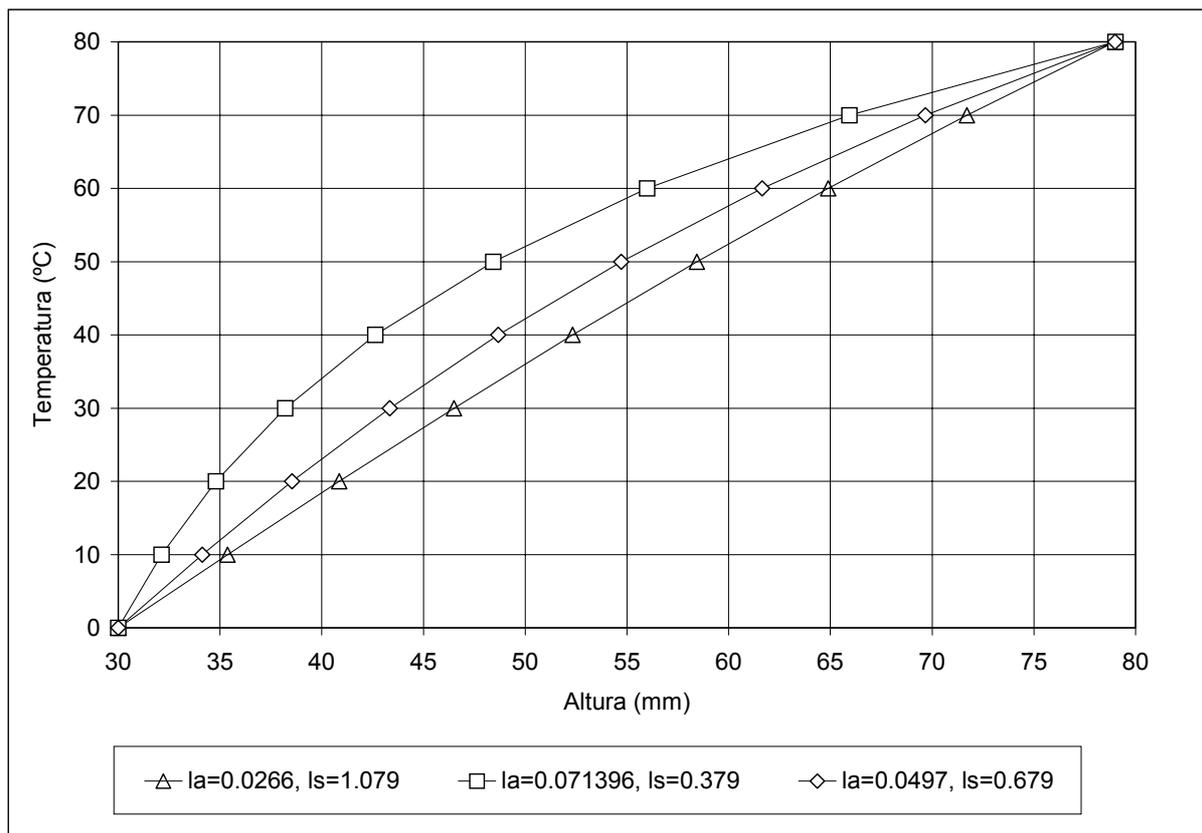


Figura 6.4.3.1.1. Distribuciones de temperaturas obtenidas con diversas parejas de parámetros (la es la conductividad térmica del aislante y ls la del suelo, ambas en W/mK) que proporcionan la misma solución si sólo se considera la temperatura en el calentador para la calibración.

Esta calibración previa se realiza con seis medidas de temperatura tomadas en estado estacionario en los cuatro puntos de medida, con lo que se tiene un total de 24 medidas. El tiempo en el que se puede decir que empieza el estado estacionario está suficientemente claro en un gráfico tiempo - temperatura; se puede hacer siguiendo un criterio de imponer que el cambio de temperatura entre dos instantes de tiempo en un determinado punto de medida sea uno dado, aunque un análisis visual del gráfico es suficiente. El problema estriba en que a medio plazo pueden existir cambios importantes de la conductividad térmica de la muestra motivados por el cambio de humedad en la misma. Por tanto, se deben tomar como datos los primeros tiempos del estado estacionario, donde la muestra aún conserva la homogeneidad de humedad al haber transcurrido poco tiempo desde que empezó la inyección de calor.

Los resultados obtenidos de este análisis son muy importantes a la hora de conocer los parámetros de la muestra. Una mala estimación de la conductividad térmica del aislante va a influir de manera directa en la estimación de la conductividad global y saturada, y de manera indirecta, en la estimación de los parámetros hidráulicos y mecánicos.

Después de estimar la conductividad térmica del aislante y considerar ya fijo y conocido su valor, se pasa a estimar el calor específico y, de nuevo, la conductividad térmica del suelo con la hipótesis de que el suelo es un material homogéneo. Para ello se usan varias medidas tanto de la fase transitoria como de la fase estacionaria (figura 6.4.4.1.4).

Las medidas de temperatura se consideran estadísticamente independientes, por lo que la matriz de covarianzas C_x es diagonal. Si se considera al modelo correcto (geometría, leyes constitutivas, etc.), el error se debe al proceso de medida. A partir de la calibración de los termopares, se deduce que la desviación típica (σ_{term}) es aproximadamente igual a 0.4 °C. Hay otras fuentes de error, como son el error de posición de los termopares, el error de medida del tiempo, etc. Se considera que el error de posición es el más importante y su desviación típica (σ_{xT}) se estima en 0.5 mm.

La varianza de la medida de temperatura se calcula a partir de la expresión $\sigma_T^2 = \sigma_{term}^2 + (\delta T / \delta x)^2 \sigma_{xT}^2$, que depende del tiempo y de la posición del termopar. En la figura 6.4.3.1.2 pueden verse los valores de la varianza utilizados en el retroanálisis. En cada punto de medida, los valores de $\delta T / \delta x$ se han calculado a partir de las medidas de temperatura en el punto de medida donde se valora dicha derivada y en los dos puntos más cercanos.

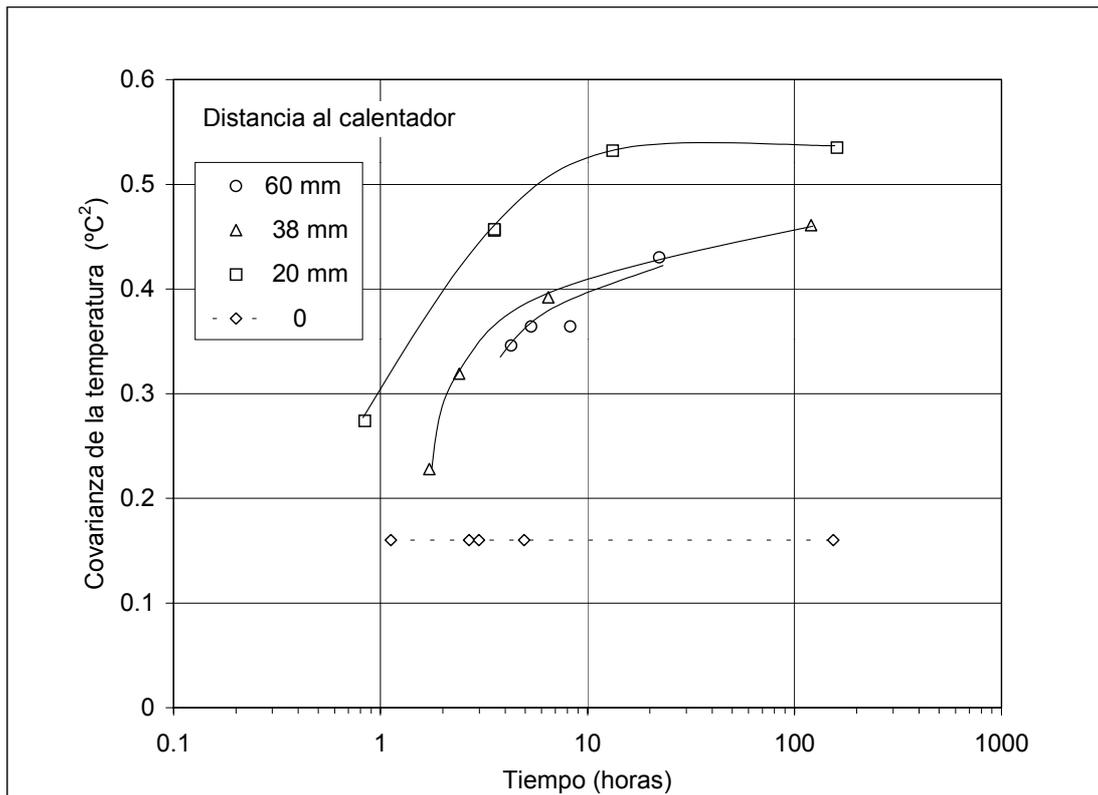


Figura 6.4.3.1.2 Medidas de la varianza de la temperatura usadas en el retroanálisis.

Se ha procedido a realizar el retroanálisis de tres ensayos con diversas humedades iniciales y flujos de calor impuestos. En la tabla 6.4.3.1.1, se muestran los resultados obtenidos de calibrar el modelo resolviendo numéricamente la ecuación del calor para un medio homogéneo. El tiempo de computación ha sido bajo (del orden de minutos con una máquina VAX Alpha 7650A) y el proceso de calibración muy robusto (figura 6.4.4.1.3). Esto es debido a que el proceso se puede linealizar bien en torno al mínimo. La forma de la función objetivo para uno de los ensayos (figura 6.4.4.1.4), muestra que incluso en posiciones alejadas del mínimo, ésta se puede aproximar por un paraboloides. Con ello, se tiene una buena estimación y una información “a posteriori” sobre la bondad de la calibración y unas relaciones entre parámetros fiable.

Ref ensayo	λ aislante W/mk	Ce J/kg	λ suelo W/mK	Inyección W	Sr_{inicial} %
010699a	0.048	1.48E+03	0.790	3.18	58.4
130799a	0.053	1.58E+03	0.640	2.27	60.2
170399a	0.038	1.46E+03	0.879	2.17	62.4

Tabla 6.4.3.1.1. Datos de las muestras y resultados de las calibraciones.

En la figura 6.4.3.1.5 se muestra la comparación entre las medidas realizadas y la simulación del modelo para el ensayo. En la misma figura se indican las medidas utilizadas en el ajuste. Como puede observarse, las medidas de temperatura se ajustan con buena aproximación. El valor medio del valor absoluto de las diferencias entre valores medidos de la temperatura y los estimados es de 0.67 °C, valor que es del mismo orden de los posibles errores cometidos en la medida de las temperaturas.

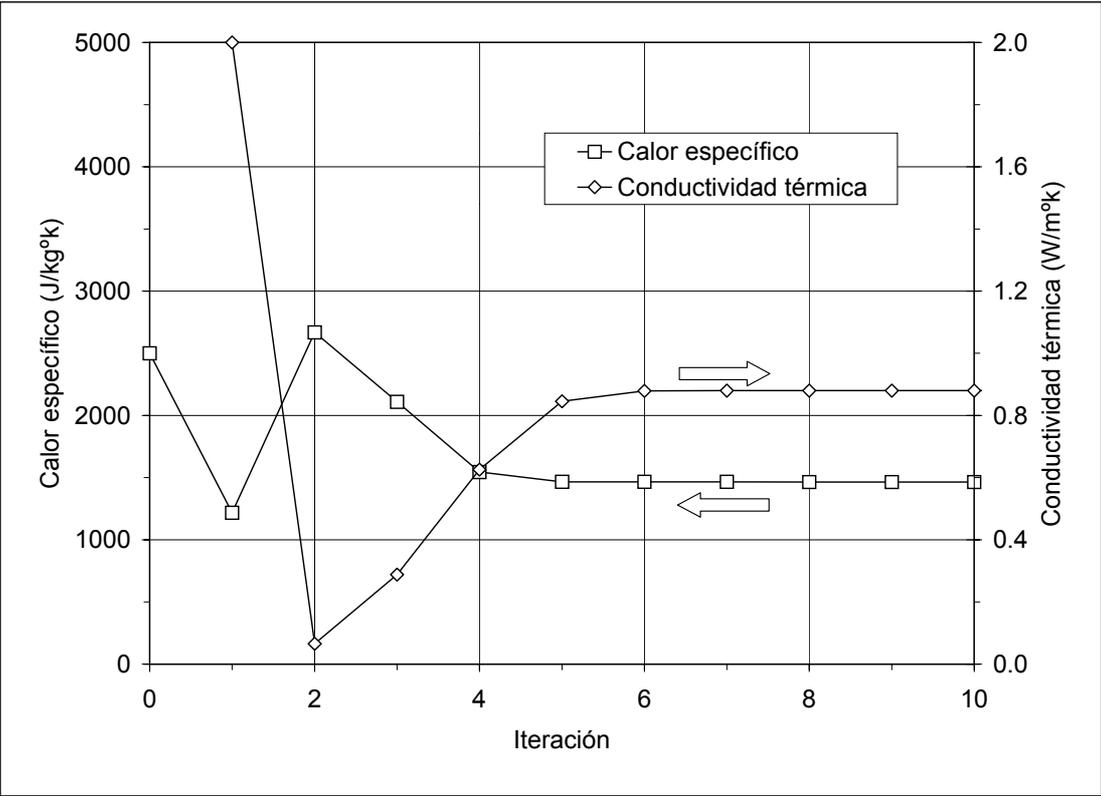


Figura 6.4.3.1.3. Estimación de parámetros a partir del ensayo 170399a.

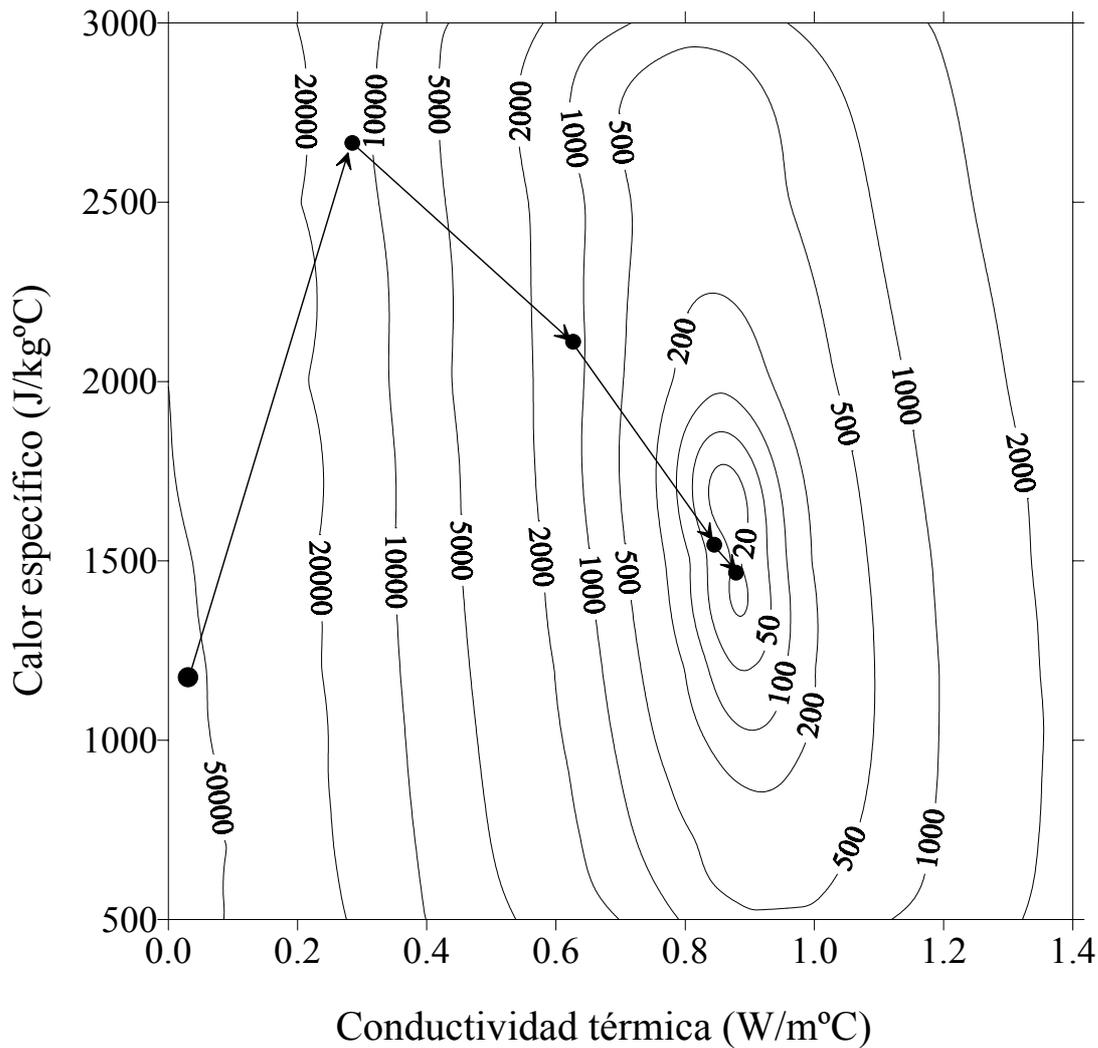


Figura 6.4.3.1.4 Función objetivo para el caso térmico estacionario. Ensayo 170399a.

Un aspecto interesante que se revela a la luz de las pruebas realizadas, es la necesidad de utilizar datos del transitorio para la estimación del calor específico. En este caso es lógico que el parámetro que da la acumulación de calor en el tiempo sólo se pueda medir en la fase transitoria, ya que en la estacionaria no se acumula más. No siempre está claro si un ensayo va a proporcionar datos sobre un determinado parámetro, de ahí la necesidad de estudiar la función objetivo, que dará la relación que hay entre parámetros (ejes de la elipse en el mínimo con direcciones distintas a los ejes de coordenadas), y la posibilidad o no de identificar uno de ellos (valle marcado con eje del mismo sobre el mínimo del único parámetro identificable) o como se verá después, parejas de parámetros que minimizan la misma función objetivo.

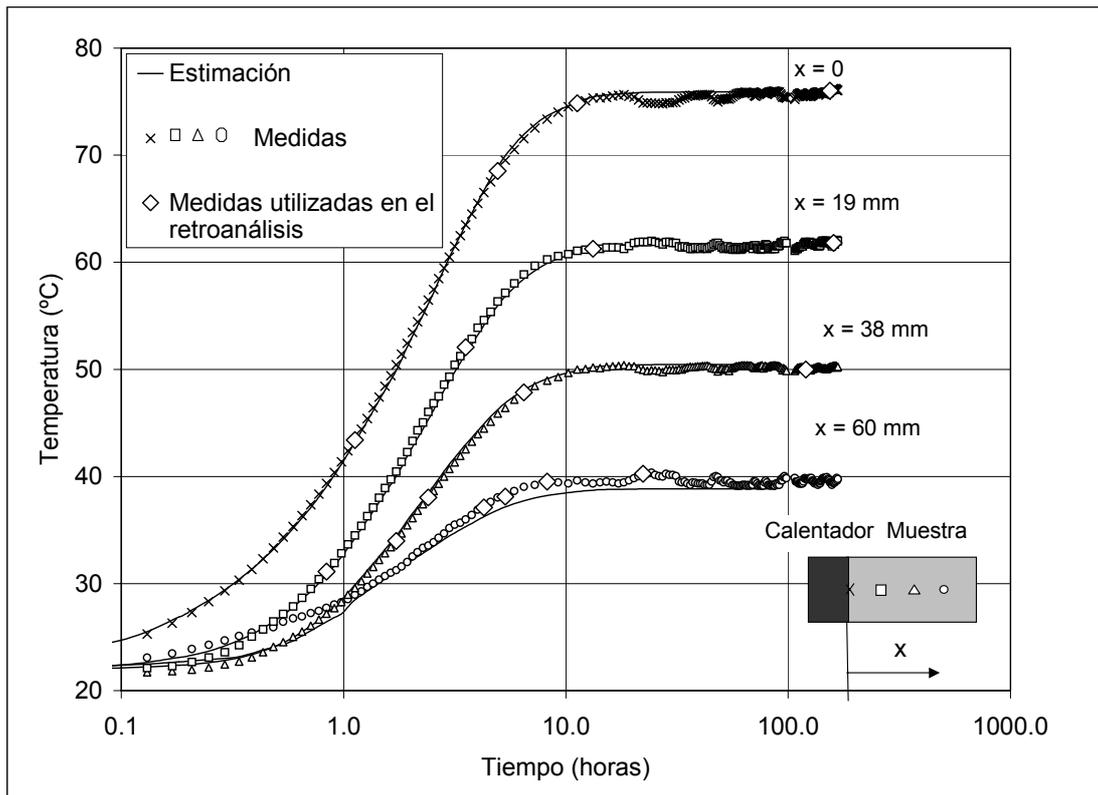


Figura 6.4.3.1.5 Resultados experimentales y estimados por la calibración. Ensayo 170399a.

Como se ha comentado en el capítulo 3, el estudio estadístico del problema proporciona información sobre la identificabilidad y las relaciones entre parámetros. En la tabla 6.4.3.1.2 se muestran los distintos resultados obtenidos.

Ref ensayo	σ_{Ce}^2	σ_{λ}^2	$\rho_{\lambda Ce}$	σ_{Ce}/Ce	σ_{λ}/λ	J
130799a	1.8E+03	9.2E-05	-0.28	0.027	0.015	10.0
010699a	1.8E+03	6.4E-05	-0.53	0.029	0.010	17.1
170399a	2.4E+03	7.4E-05	-0.29	0.034	0.010	18.5

Tabla 6.4.3.1.2. Información a posteriori.

El primer dato interesante es el coeficiente de correlación $\rho_{\lambda Ce}$, que se acerca a -0.3 excepto en el ensayo 010699a que sobrepasa -0.5 . El signo significa que a medida que aumenta la conductividad térmica, disminuye el calor específico. No está clara a priori la relación entre ambos parámetros, por lo que la información del resultado dado por la modelación puede ayudar a interpretar el ensayo. Sucede que durante el transitorio, para obtener una determinada temperatura en un instante dado en un punto de la muestra para un

flujo calorífico dado, si la conductividad térmica baja (el calor pasa con más dificultad, por lo que los gradientes térmicos y con ellos, la temperatura, deben subir), entonces se deberá aumentar el calor específico para retrasar el paso de calor, ya que éste deberá de almacenarse en la misma muestra manteniendo fríos los puntos alejados del punto de inyección de calor.

La varianza del calor específico y de la conductividad térmica no son comparables, ya que el orden de magnitud del primero supera en tres veces al de la segunda. Para ello, ésta debe adimensionalizarse. El método utilizado es dividir la desviación típica por el valor del parámetro obtenido. De este modo, se aprecia que la conductividad térmica es dos veces más fiable que el calor específico si se miden ambos con este tipo de ensayo con los datos utilizados. En cualquier caso, lo reducido de los valores de la varianza indican que la fiabilidad de los parámetros encontrados es muy alta.

En el capítulo 3 se comenta que la función objetivo debía ser del orden de N-P, donde N es el número de medidas y P el de parámetros, aquí este valor es 14. Los valores de J obtenidos varían entre 10 y 18. Puesto que el modelo matemático utilizado es el mismo en todos los casos y la distribución de los errores de medida de los aparatos se puede suponer gaussiano, es lógico concluir que la causa sea que en algunos casos, el error de medida puede ser superior al estimado y en otros puntos, menor.

En la figura 6.4.3.1.6 se muestran términos de la matriz de sensibilidad en diferentes tiempos. Estos elementos son las derivadas de las temperaturas con respecto a la conductividad térmica y respecto al calor específico en dos puntos determinados. Como puede apreciarse, la sensibilidad a la conductividad térmica es mayor al final del ensayo, es decir, en condiciones estacionarias, y es mayor en los puntos cercanos al calentador; por el contrario, la sensibilidad al calor específico es máxima a pocas horas de iniciar el ensayo y también es mayor en el punto más cercano al calentador, como es de esperar, en condiciones estacionarias la sensibilidad a este parámetro es nula.

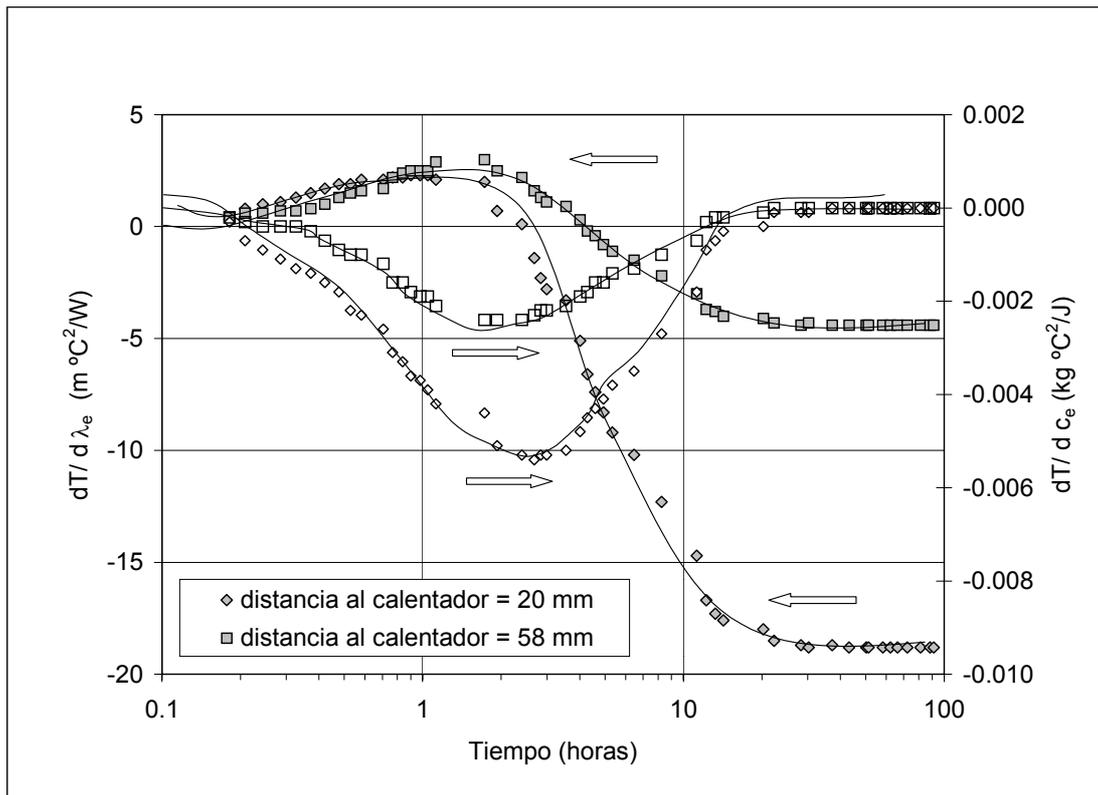


Figura 6.4.4.1.6 Valores de coeficientes de la matriz de sensibilidad asociados a dos medidas de temperatura.

6.4.3.2 CASO HIDRÁULICO

Se ha realizado la calibración del modelo termo-hidráulico teniendo en cuenta sólo los valores de la humedad medidos al final del ensayo a lo largo de las muestras. Se ha estimado la tortuosidad (τ), que es el parámetro asociado al movimiento difusivo de vapor, y el exponente n de la ley de permeabilidad no saturada ($k_r = S_r^n$). El resto de parámetros se ha supuesto conocido y sus valores son los indicados en la tabla 6.4.2.1.

Un tema importante en la calibración es la porosidad que se impone a la muestra, que permanecerá constante en todo el cálculo. Sólo se calculan cambios de presión de agua y temperatura (problema T-H). En un principio se creyó que los cambios de porosidad no serían importantes, sin embargo, al final de los ensayos se midieron cambios de diámetro importantes a lo largo de la muestra (el borde frío tendía a aumentar de volumen y en el borde caliente el volumen disminuía apreciablemente). Estos cambios de volumen de poros alteran notablemente el valor de la permeabilidad intrínseca (ver tabla 6.4.2.1), por tanto, para que

obtener unos resultados realistas se consideró para cada punto del suelo la porosidad correspondiente al diámetro final medido tras el ensayo. De este modo, la calibración mejoró sensiblemente tanto cuantitativamente al tener unos valores menores de la función objetivo en el mínimo, como cualitativamente al reproducir mejor la tendencia de los resultados. En la tabla 6.4.3.2.1 se resumen los valores de los parámetros obtenidos y sus posibles variaciones.

Del mismo modo que en las medidas de temperatura, las medidas de humedad se suponen estadísticamente independientes y que los errores cometidos se deben exclusivamente al proceso de medida. La desviación típica calculada para la medida de la humedad (σ_{peso}) es de 0.1 %. Como en el caso de la medida de la temperatura, también se produce un error debido a la incertidumbre sobre la posición del punto de medida ($\sigma_{x\omega}$), que se estima en 1 mm. La varianza se calcula a partir de la expresión $\sigma_{\omega}^2 = \sigma_{\text{peso}}^2 + (\delta\omega / \delta x)^2 \sigma_{x\omega}^2$, que depende del tiempo y de la posición del corte de muestra con el que se mide la humedad. Se utilizan seis medidas de humedad tomadas al final del ensayo.

La correlación entre ambos parámetros se acerca a -0.9 . Esto significa una fuerte correlación negativa que implica que un parámetro aumente cuando el otro disminuye. Un aumento de n significa una reducción del flujo de agua líquida, una disminución de τ implica una disminución del flujo de vapor. Si se estudia el problema en condiciones estacionarias, fácilmente se encuentra la razón del valor de este coeficiente de correlación. En efecto, en condiciones estacionarias, ambos flujos deben ser iguales y de sentido contrario. La muestra se encuentra en un estado de equilibrio dinámico donde el gradiente de temperaturas provoca una migración de vapor desde la zona caliente a la fría y un movimiento de agua líquida en sentido inverso.

La función objetivo está dibujada en la figura 6.4.3.2.1. En ésta, puede verse como en un entorno del mínimo, la función se aproxima bien por un paraboloides. Otro detalle interesante es que las elipses que se forman al cortar dicho paraboloides por planos perpendiculares a su eje (líneas de nivel), tienen sus ejes girados 45 grados respecto de los ejes de coordenadas, mostrando la correlación entre ambos parámetros.

Ref ensayo	n	τ	σ_n^2	σ_τ^2	$\rho_{\tau n}$	σ_τ/τ	σ_n/n	J	N
130799a	3.1	0.82	1.2E+00	2.4E-02	-0.86	0.35	0.19	1.6	5
010699a	6.4	0.49	2.0E+02	6.4E-03	-0.93	2.22	0.16	4.8	6
170399a	2.8	0.59	2.8E-01	8.9E-03	-0.85	0.16	0.19	4.4	6

Tabla 6.4.3.2.1. Resultados de la calibración teniendo sólo en cuenta los datos de las humedades.

En un principio, se esperaba que siendo un ensayo de inyección de calor, se determinaría mejor la tortuosidad que la permeabilidad no saturada. Los resultados obtenidos después de adimensionalizar el error de los parámetros no conducen a resultados concluyentes excepto en el ensayo 010699a, donde el valor de la tortuosidad no se determina bien. En los tres ensayos, los valores del coeficiente de variación han sido altos, en especial si se comparan con los obtenidos en el análisis térmico. Esto indica que estos parámetros son mucho más difíciles de obtener que los térmicos a partir de los datos de este tipo de ensayos.

El valor de la función objetivo es sistemáticamente menor que N-P. Esto puede ser debido a que el error de medida supuesto de las humedades finales es más bajo que el real. En las figuras 6.4.3.1.3 y 6.4.3.3.4 pueden verse los resultados de la calibración del modelo a partir de los resultados del ensayo 170399a.

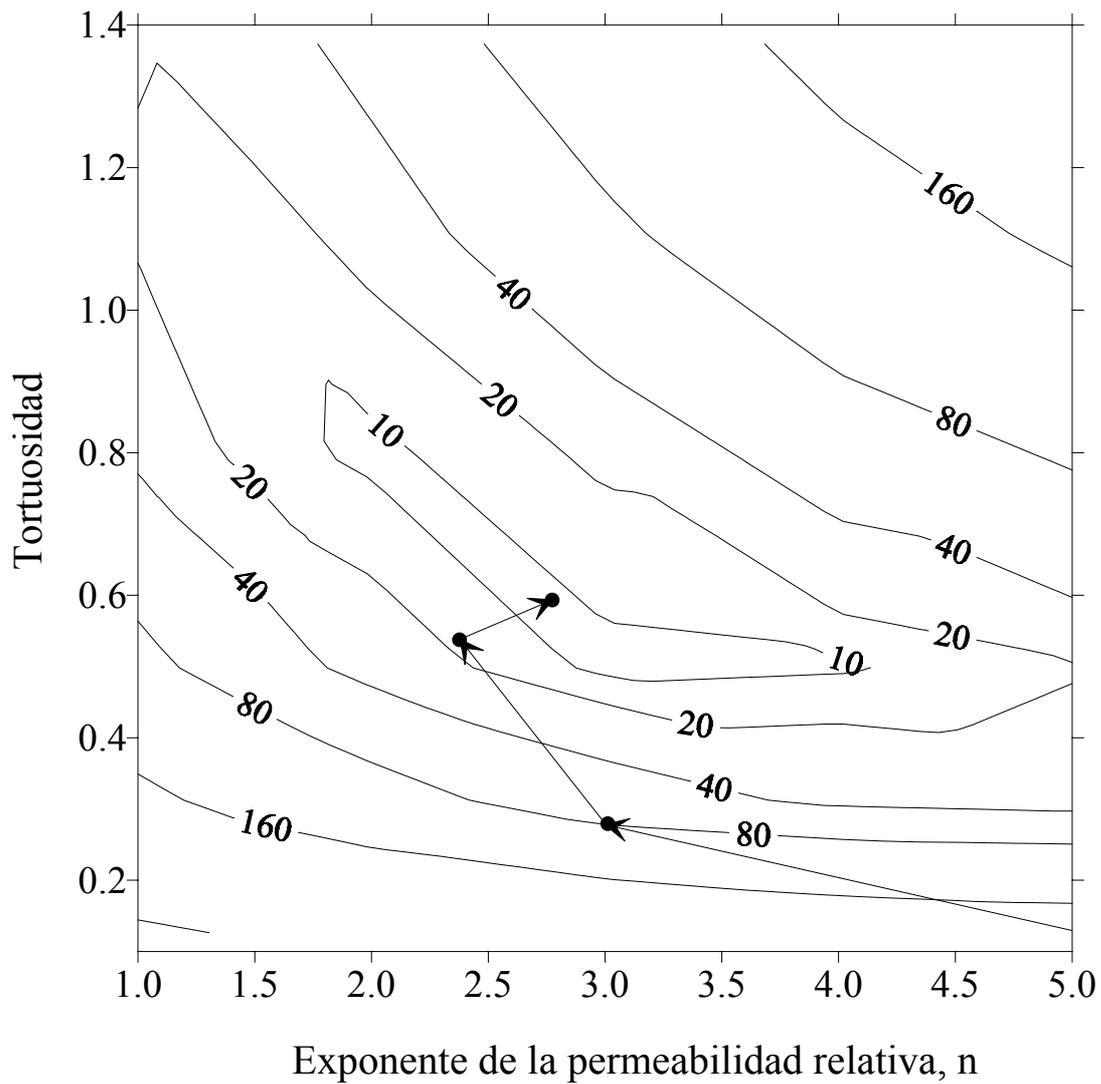


Figura 6.4.3.1.2. Función objetivo del ensayo 170399a.

Dada la elevada varianza de los parámetros, su alta correlación y la forma de la función objetivo, pueden encontrarse parejas de valores (τ, n) relativamente diferentes que conduzcan a valores de la función objetivo parecidos sin que sea posible establecer cual de ellos es el mejor salvo que se utilice información procedente de otros ensayos.

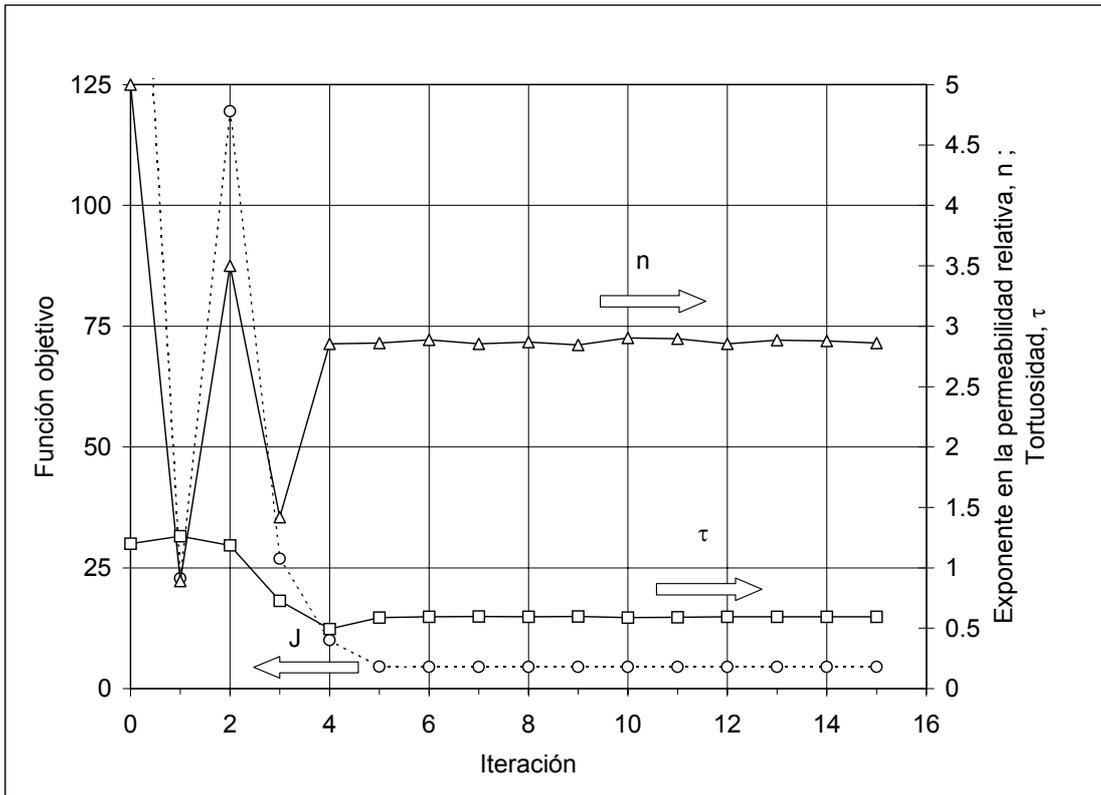


Figura 6.4.3.1.3. Calibración del modelo con los datos de humedades. Ensayo 170399a

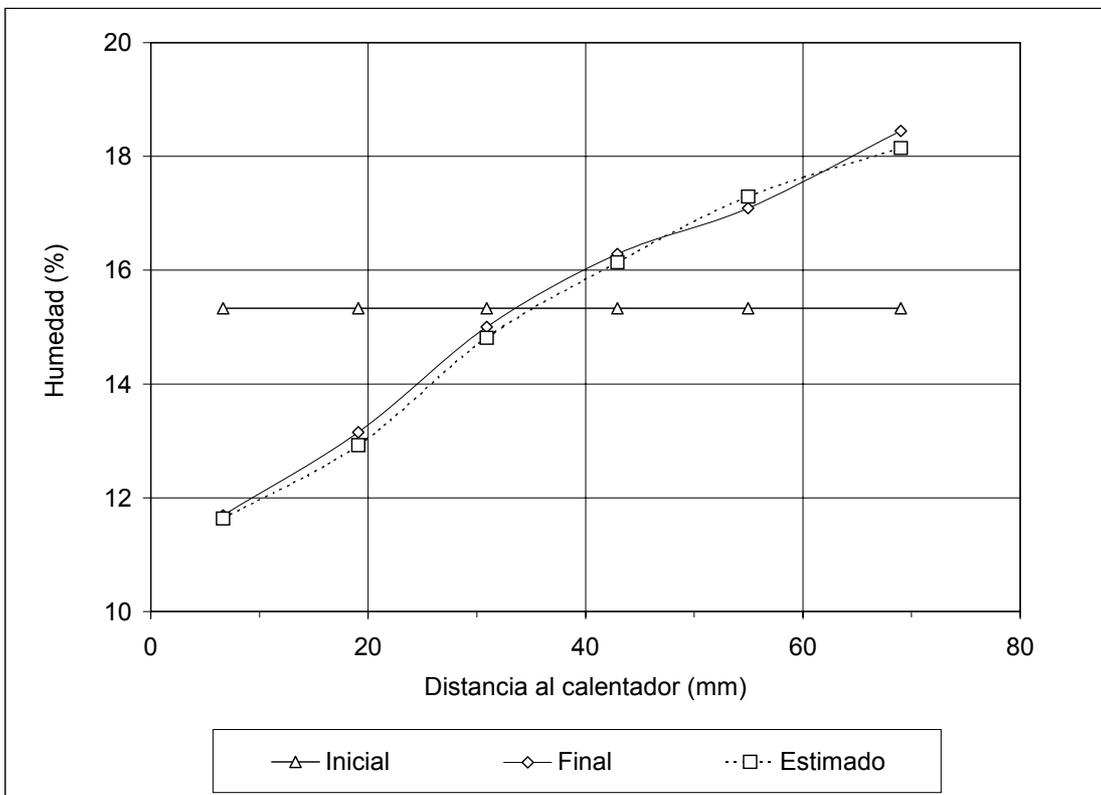


Figura 6.4.3.1.4. Calibración del modelo con datos de humedad. Humedad en función de la posición. Ensayo 170399a.

6.4.3.3 CASO TERMOHIDRÁULICO

Se ha calibrado el modelo termo-hidráulico teniendo en cuenta datos de temperaturas y de humedades. Los parámetros a identificar en este caso son la conductividad saturada de la arcilla, la tortuosidad y el exponente de la ley de permeabilidad no saturada. En las tablas 6.4.3.3.1 y 6.4.3.3.2 se resumen los resultados obtenidos.

Ref ensayo	λ_{sat}	n	τ	J_T	J_ω	J	N
130799a	0.80	2.5	0.70	11.1	2.1	13.2	21
010699a	1.17	6.4	0.41	73.3	18.4	91.8	22
170399a	1.29	2.9	0.61	48.9	4.6	53.5	22

Tabla 6.4.3.3.1. Parámetros identificados y valor de la función objetivo.

Donde J_T , J_ω y J son las funciones objetivo de la temperatura, humedad y global respectivamente. Se cuantifican siguiendo las siguientes expresiones:

$$J_T = \sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_{T_i}^2} \times \left(T_i - \bar{T}_i \right)^2, \text{ donde } \sigma_{T_i}^2 \text{ es la varianza de la temperatura en la medida}$$

i , T_i es la temperatura calculada por el modelo, \bar{T}_i la temperatura medida y N el número de medidas.

$$J_\omega = \sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_{\omega_i}^2} \times \left(\omega_i - \bar{\omega}_i \right)^2, \text{ donde } \sigma_{\omega_i}^2 \text{ es la varianza de la humedad en la medida } i,$$

ω_i es la humedad calculada por el modelo, $\bar{\omega}_i$ la humedad medida y N el número de medidas. J es la suma de J_T y J_ω .

Ref ensayo	$\sigma_{\lambda_{sat}}^2$	σ_n^2	σ_τ^2	$\rho_{\lambda_{sat}n}$	$\rho_{\lambda_{sat}\tau}$	$\rho_{n\tau}$	$\sigma_{\lambda_{sat}}/\lambda_{sat}$	σ_n/n	σ_τ/τ
130799a	3.0E-04	5.3E-01	1.3E-02	0.26	-0.06	-0.81	0.022	0.30	0.16
010699a	2.1E-04	2.9E+00	2.0E-03	0.54	-0.27	-0.76	0.012	0.26	0.11
170399a	4.3E-04	1.2E-01	1.1E-03	0.43	-0.51	-0.54	0.016	0.12	0.05

Tabla 6.4.3.3.2. Datos estadísticos a posteriori.

Para identificar los parámetros, se ha resuelto el problema termo-hidráulico acoplado. Se han utilizado temperaturas medidas durante la fase transitoria y estacionaria y

las medidas de humedad realizadas al finalizar el ensayo (las mismas que las utilizadas al resolver el problema inverso hidráulico). Se han identificado tres parámetros: uno correspondiente al problema térmico (la conductividad térmica saturada, λ_{sat}) y dos parámetros correspondientes al problema hidráulico (la tortuosidad, τ , y el exponente de la ley de permeabilidad no saturada, n). La conductividad térmica del suelo varía con el grado de saturación según lo indicado en la tabla 6.4.2.1.

En la figura 6.4.3.3.1 se muestra la evolución de los parámetros obtenidos en el proceso iterativo y la función objetivo. Como se puede apreciar, a las tres iteraciones se obtienen los valores que resuelven el problema inverso. Se ha resuelto el problema directo para comparar los valores de temperatura y humedad calculados con las medidas utilizadas en el proceso de identificación.

Las figuras 6.4.3.3.2 y 6.4.3.3.3 presentan la evolución de la temperatura y del grado de saturación en función de los parámetros estimados. La evolución temporal de la temperatura calculada se compara con la temperatura medida. Esta comparación no es posible con el grado de saturación puesto que no se medía durante el ensayo. Se puede observar que las temperaturas alcanzan el estado estacionario en unas 10 horas mientras que se necesitan alrededor de 60 días para alcanzar condiciones estacionarias en el grado de saturación, por lo que se puede afirmar que el transitorio del problema térmico y el transitorio del problema hidráulico están desacoplados. Sin embargo, se pueden apreciar interdependencias entre el problema hidráulico y el térmico: para periodos de tiempo largos, el contenido de agua es mayor cerca de la parte fría que de la cercana al calentador. Un mayor contenido de agua (o grado de saturación), significa una mayor conductividad térmica, por tanto, la conductividad térmica global de la muestra no es constante y la distribución de temperatura a lo largo de la muestra no es lineal. La temperatura cerca del calentador se incrementa mientras que en la parte fría desciende. Este efecto se puede detectar en los valores calculados de la temperatura de la figura 6.4.3.3.2 para tiempos mayores de 100 horas. Sin embargo, es difícil detectar este efecto en los valores de la temperatura medidos debido a las oscilaciones de temperatura del laboratorio y a los errores de medida.

En la figura 6.4.3.3.3 se puede analizar la evolución del grado de saturación en la muestra. El grado de saturación inicial es aproximadamente del 63% y se produce un cambio

de $\pm 20\%$ entre el bordes de la muestra. Se puede detectar un comportamiento particular cuando $t=20$ horas, cuando el grado de saturación aumenta y luego disminuye en la parte central de la muestra. Esto es debido a que el flujo de vapor procedente de la parte de la muestra en contacto con el calentador es muy importante. Sin embargo, este vapor se condensa al alcanzar zonas más frías antes de que el flujo de agua líquida en sentido opuesto sea importante.

En las tablas 6.4.3.3.1 y 6.4.3.3.2 figuran los resultados de las calibraciones realizadas para tres parámetros. Es importante resaltar que las medidas de temperatura proporcionan la mayor contribución a la función objetivo ($J_T \gg J_w$). El error correspondiente a la información de la temperatura, expresado por la función objetivo J_T , es mayor que la función objetivo del análisis térmico (caso a). Esto es debido a la inclusión de los datos de humedad en la identificación de parámetros. Sin embargo, el valor de J_w en el caso c) es similar a la función objetivo del mínimo del caso hidráulico. Los coeficientes de variación son mayores para los parámetros hidráulicos que para el parámetro térmico. Los coeficientes de correlación indican que existe interdependencia entre parámetros. La correlación entre la tortuosidad y n es debida al acoplamiento existente entre el flujo de vapor y el flujo de agua líquida. La correlación negativa entre la tortuosidad y la conductividad térmica indica que un incremento de tortuosidad, que lleva parejo un aumento del flujo de vapor, que incrementa a su vez el flujo advectivo de calor, implica un descenso de la conductividad térmica para transportar la misma cantidad de calor. Por otra parte, λ y n tienen una correlación positiva, ya que un incremento de n reduce el flujo de líquido y entonces, desciende el flujo de calor advectivo debido al movimiento de agua líquida, lo cual implica un aumento de la conductividad térmica para que la cantidad de calor transportado permanezca igual al prescrito.

En la figura 6.4.3.3.4 se comparan los resultados de la distribución de humedad calculada a partir de los parámetros estimados en los casos b) y c) y los resultados experimentales. Se puede observar que los resultados de las simulaciones son muy parecidos ya que la conductividad térmica estimada en el caso c) es muy parecida a la impuesta en el caso b).

Los parámetros obtenidos en el caso c) son consistentes con los obtenidos por otros autores. En la figura 6.4.3.3.5 se comparan los resultados obtenidos de los casos a) y c) con los resultados de laboratorio obtenidos por Villar (1994) y ENRESA (1998), que han sido obtenidos mediante medida directa con el método transitorio del hilo caliente. El caso a) proporciona un valor λ_c independiente del grado de saturación y por tanto, se trata de un valor medio. El caso c) proporciona un valor de λ_{sat} , la conductividad térmica global se calcula a partir de la expresión $\lambda = \lambda_{sat}^{S_i} \times \lambda_{sec}^{(1-S_i)}$. Se puede observar que la conductividad térmica obtenida a partir del retroanálisis muestra una buena aproximación con la obtenida de manera directa en el intervalo de grado de saturación comprendido entre 0.4 y 0.8.

Los parámetros hidráulicos obtenidos en los casos b) y c): $\tau \approx 0.6$ y $n \approx 2.9$ son similares a los que se pueden encontrar en la literatura (CATSIUS CLAY, 1998). Sin embargo, es importante recalcar que existe un gran acoplamiento entre ambos parámetros, lo cual significa que combinaciones de ambos proporcionan resultados similares. Este hecho se debe tener en cuenta en el análisis del comportamiento termo-hidráulico de problemas a escala natural.

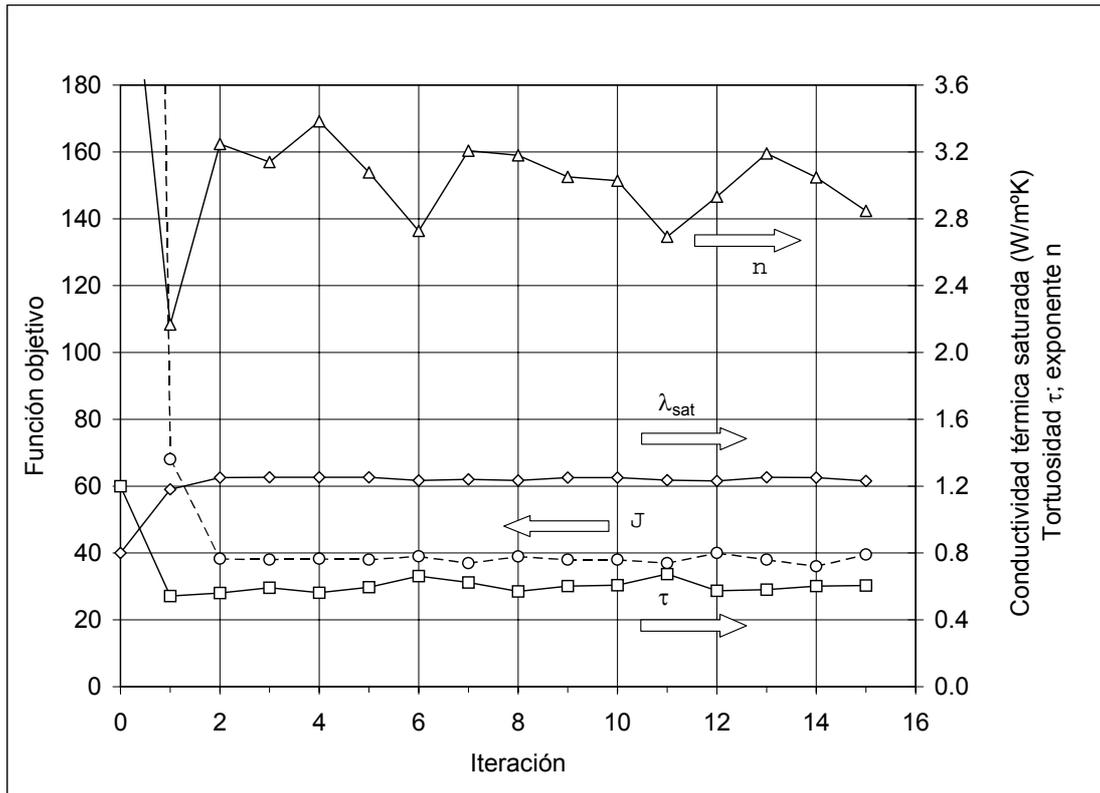


Figura 6.4.3.3.1. Calibración del modelo con datos de humedades y temperaturas. Ensayo 170399a.

La estimación de tres parámetros a la vez no siempre es eficaz, ya que la variación de tres parámetros en la estimación puede hacer que la solución fluctúe en torno a combinaciones de parámetros que optimicen la función objetivo de manera similar. Aunque el mínimo puede ser único, los errores debidos a la aproximación de la derivada pueden ser importantes y provocar estas oscilaciones.

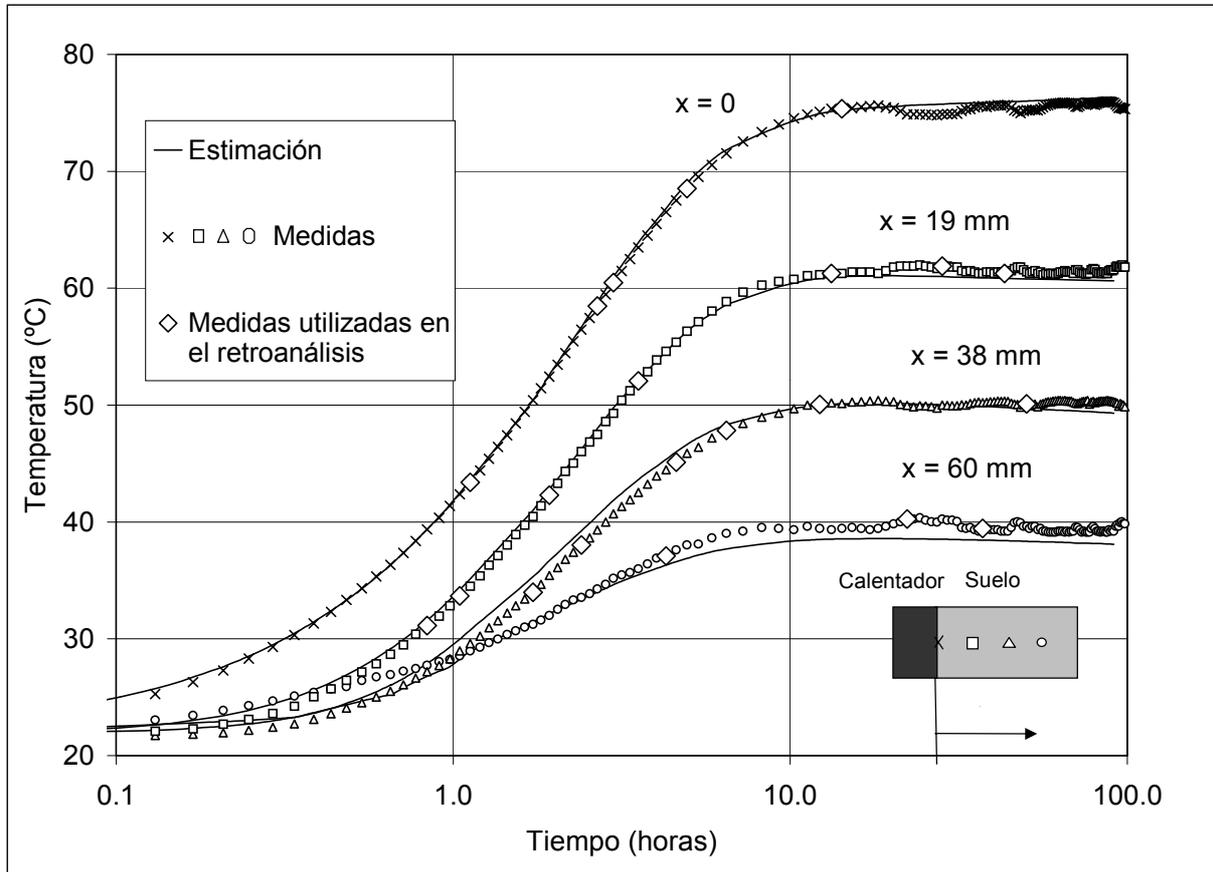


Figura 6.4.3.3.2. Calibración del modelo con datos de humedades y temperaturas. Temperatura en función del tiempo. Ensayo 170399a.

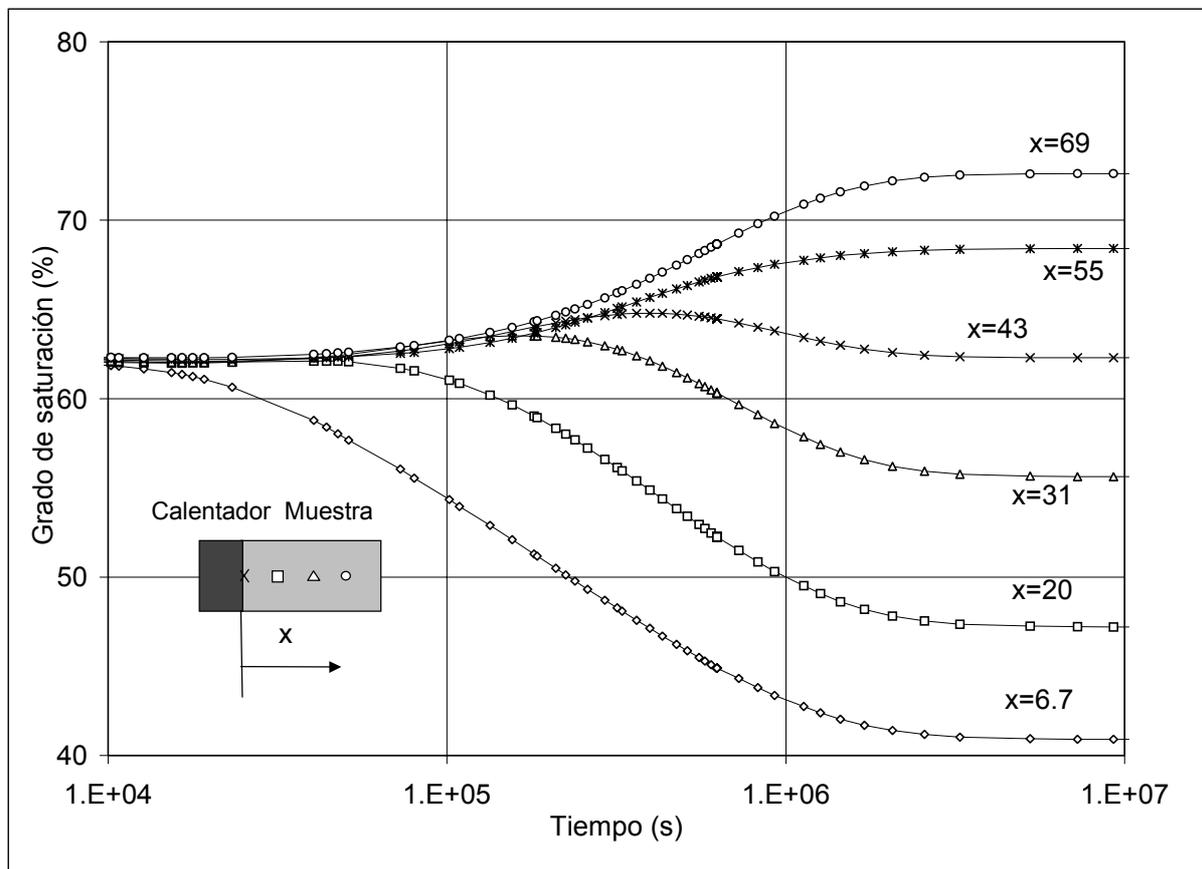


Figura 6.4.3.3.3. Grado de saturación en función de la temperatura con los parámetros estimados. Ensayo 170399a (distancias en mm).

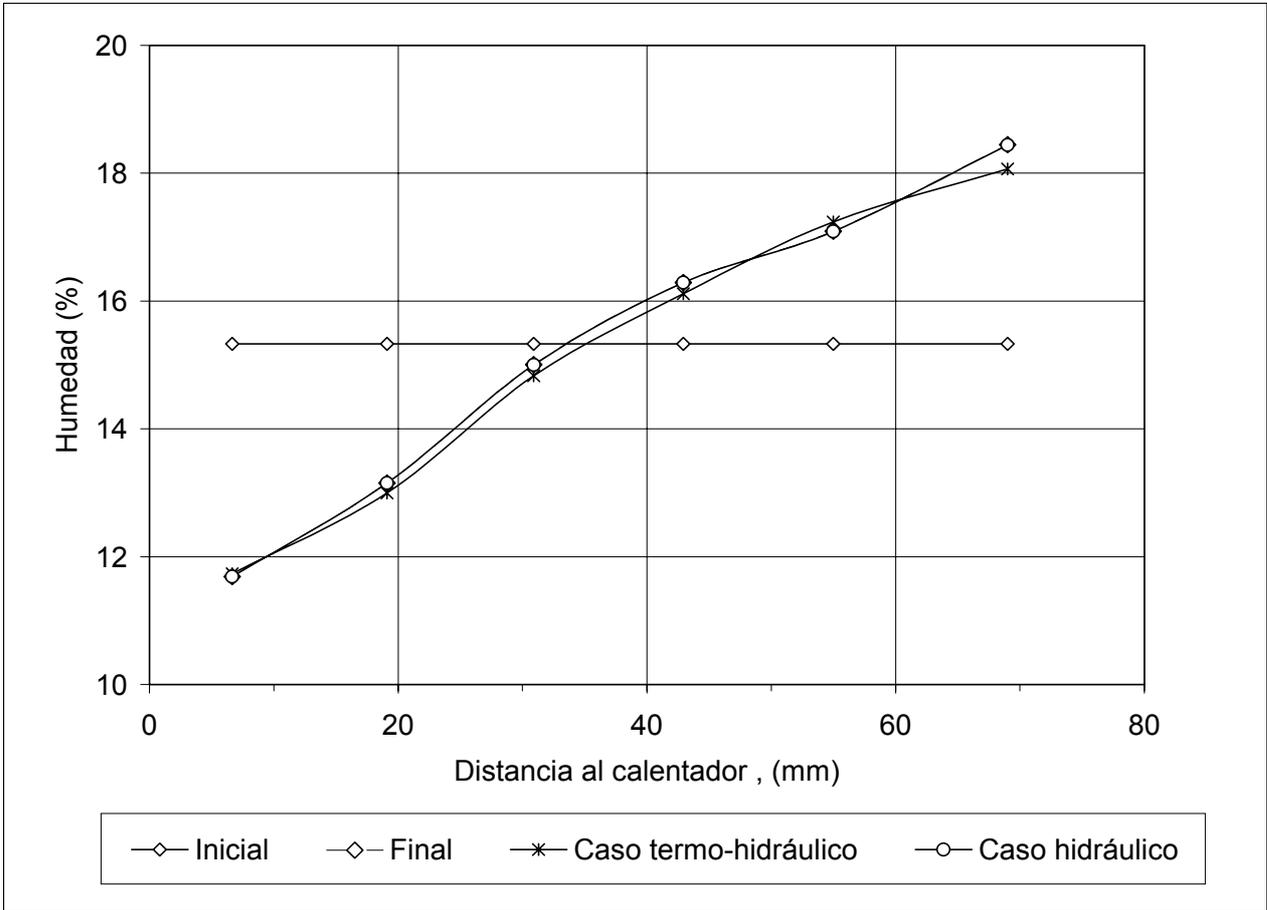


Figura 6.4.3.3.4. Calibración del modelo con datos de humedad y temperatura y sólo de humedad. Humedad en función de la posición. Ensayo 170399a.

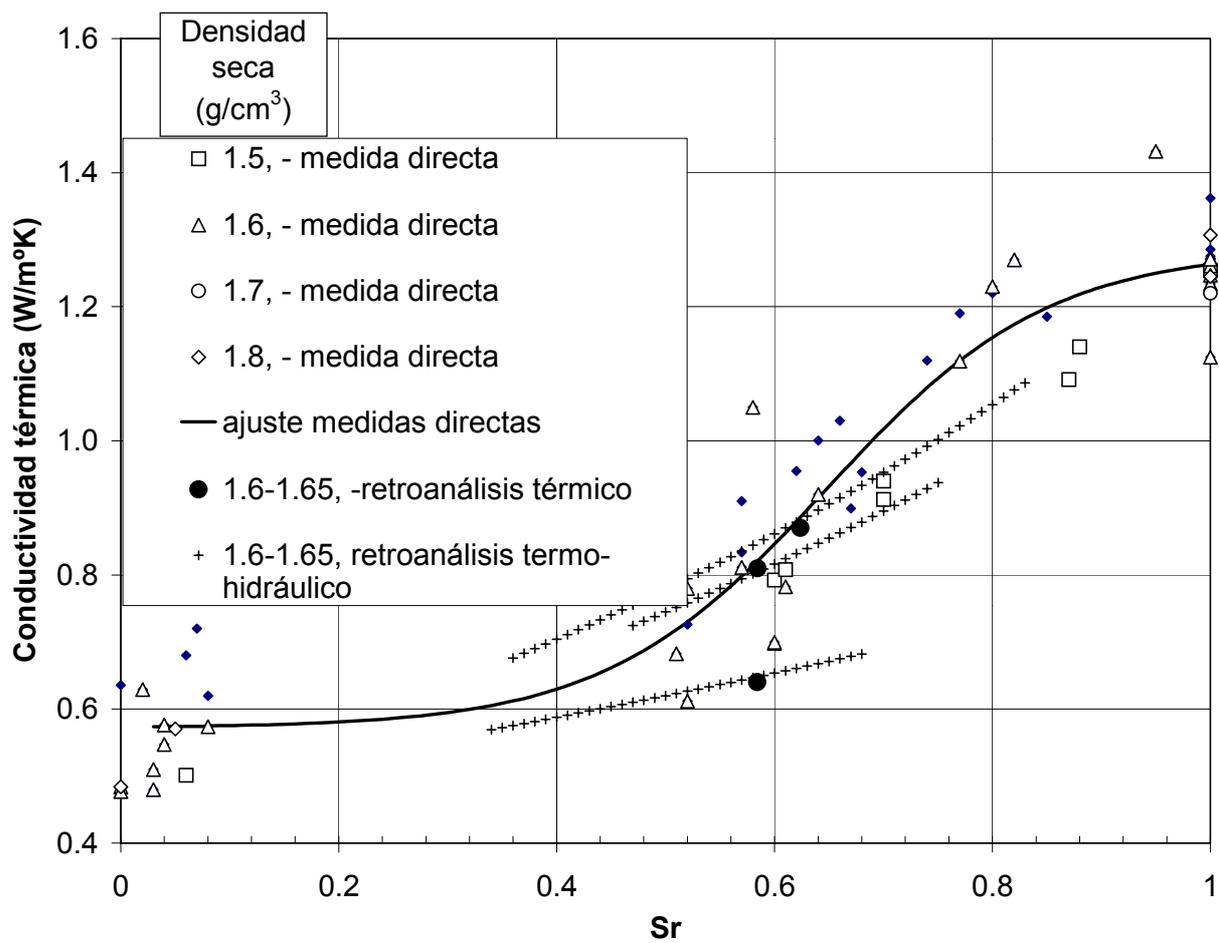


Figura 6.4.3.3.5. Comparación de las medidas de conductividad térmica obtenidas por retroanálisis con las obtenidas por medida directa (Villar, 2000).

7 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

7.1 RESUMEN Y CONCLUSIONES

A continuación se resume el trabajo realizado y las principales conclusiones que se derivan del mismo. Estas conclusiones se han dividido en los siguientes grupos:

- a) Características del material ensayado y resultados de los ensayos convencionales de caracterización.
- b) Nuevos equipos y procedimientos de ensayo puestos a punto.
- c) Análisis de los resultados de los ensayos realizados en los nuevos equipos.
- d) Modelación de ensayos.
- e) Uso de las técnicas de identificación de parámetros.

7.1.1 CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL ENSAYADO

El material ensayado es una bentonita procedente del yacimiento del Cortijo de Archidiona en la región volcánica del Cabo de Gata, en el SE de España y está constituida por más del 90% de smectita. Según la clasificación del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, es una arcilla de alto límite líquido ($\omega_L=92.9$, $\omega_p=46.6$, $IP=46.3$). El porcentaje de partículas inferior a $2\mu\text{m}$ que se ha medido siguiendo la norma UNE es del 45%, sin embargo, este porcentaje es seguramente mayor si se emplea el sistema de dispersión de las partículas arcillosas más energético. La humedad higroscópica correspondiente a la atmósfera del laboratorio (HR aproximadamente del 50%), es del $13 \pm 0.3\%$.

Se ha determinado la curva de retención de la arcilla permitiendo su deformación a diferentes temperaturas. Esta determinación se ha realizado empleando ácido sulfúrico, sales saturadas y PEG para fijar la humedad relativa del ambiente que rodea el laboratorio. A temperatura ambiente, se ha observado deformaciones volumétricas que llegan a más del 30% cuando se reduce la succión de las muestras hasta succiones del orden de 4 MPa introduciendo cambios estructurales importantes en la arcilla durante la determinación de la curva de retención. Se ha determinado la curva de retención con una densidad inicial de 1.64 g/cm^3 . A temperatura ambiente, se han seguido trayectorias de humedecimiento, secado tras humedecimiento y de humedecimiento tras secado para estudiar el efecto de la histéresis,

observando que es relativamente pequeño en el intervalo de succiones estudiado. En succiones por encima de 100 MPa se ha observado que al cambiar la succión, los cambios de volumen son inferiores a los cambios de volumen de agua. Sin embargo, para succiones entre 100 y 10 MPa se han medido cambios de volumen que pueden ser mayores que el volumen de agua que entra en el suelo al reducirse la succión.

El efecto de la temperatura en las curvas de retención es pequeño. Los efectos de la temperatura en el volumen del material oscurecen la interpretación de los resultados. Se ha observado un ligero aumento de la humedad al calentar el material, pero posteriormente al enfriar otra vez las muestras, la humedad sigue aumentando.

Se ha desarrollado una nueva técnica de ensayo para obtener la curva de retención a volumen constante. Se han determinado las curvas de retención para diversas densidades secas para las que se ha ajustado una expresión análoga de Van Genuchten. En estos ensayos se ha constatado que la masa de agua que entra en el suelo al reducir la succión a cero posee un volumen superior al volumen de poros de la bentonita, lo que indica que la densidad del agua en el interior de la bentonita hidratada a volumen constante puede ser superior a 1 g/cm^3 .

Se ha podido constatar que las curvas de retención medidas con deformación libre o controlada a diversas densidades secas coinciden para succiones superiores a 100 MPa, lo que indica que para este intervalo de succiones, el agua está fundamentalmente retenida en la microestructura de la arcilla.

Los ensayos de hinchamiento bajo carga han permitido constatar que los cambios de volumen alcanzados por el material al saturarse dependen de la carga aplicada pero también de forma importante de la densidad seca inicial del suelo. La carga a aplicar para conseguir estos cambios de volumen varía entre algo menos de 3 MPa para densidades secas de 1.5 g/cm^3 a más de 10 MPa para una densidad seca de 1.9 g/cm^3 .

La permeabilidad saturada al agua también varía mucho en función de la densidad seca. Esta permeabilidad se ha obtenido por medida directa y por retroanálisis de ensayos edométricos convencionales. En ambos casos, los valores obtenidos están de acuerdo con las tendencias presentadas por Villar (2000). La permeabilidad varía tres órdenes de magnitud

(desde 10^{-9} m/s a 10^{-12} m/s) al pasar de una densidad seca de 1.1 g/cm^3 a 1.35 g/cm^3 y dos órdenes de magnitud al pasar de una densidad de 1.35 a 1.85 g/cm^3 .

Las medidas del modelo de rigidez a pequeñas deformaciones han permitido establecer que el efecto de la densidad seca en el intervalo estudiado (entre 1.55 y 1.7 g/cm^3) influye poco en el valor de la rigidez. Al aumentar el grado de saturación se observa un incremento de la rigidez hasta alcanzar un máximo para valores del grado de saturación del orden de 0.9 . Por encima de ese grado de saturación, la rigidez disminuye al aumentar la saturación.

7.1.2 NUEVAS TÉCNICAS EXPERIMENTALES DESARROLLADAS

7.1.2.1 EDÓMETROS CON SUCCIÓN CONTROLADA

Se ha puesto a punto un equipo edométrico para la realización de ensayos edométricos con succión controlada mediante aire con humedad relativa impuesta.

A fin de reducir el tiempo necesario para alcanzar el equilibrio tras un cambio de succión, se ha forzado el movimiento de este aire húmedo mediante una bomba. Si la saturación y la densidad seca son suficientemente bajas como para que a través de la muestra, existan canales abiertos al paso de aire de forma continua, entonces el aire húmedo se obliga a circular a través de la muestra, en caso contrario, si la saturación es alta y la permeabilidad al gas pequeña, la circulación del aire húmedo se establece a través de las placas porosas que se colocan encima y debajo de la muestra.

Para poder medir la presión de hinchamiento desarrollada al cambiar la succión, se han utilizado palancas de gran longitud (relación de palanca $1:20$), que se fijan a través de una célula de carga en un punto muy alejado de la muestra. Con este procedimiento se han podido medir presiones de hinchamiento cercanas a los 10 MPa .

Una limitación a tener en cuenta en el procedimiento de ensayo desarrollado es del control de la densidad seca de las muestras. Las células edométricas utilizadas permiten la compactación de la muestra en la propia célula y la altura de la muestra sólo se puede conocer a través de medidas de longitud indirectas. Si el espesor de la muestra es pequeño, el error

cometido en la medida de esas longitudes se produce en incertidumbres en el valor de la densidad seca del material que pueden tener efectos mecánicos importantes.

Si esta técnica de ensayo se utiliza a temperaturas altas, hay que tener la precaución de utilizar solutos no volátiles a fin de evitar que estos solutos entren en contacto con el suelo.

7.1.2.2 EQUIPO DE MEDIDA DE LA DILATACIÓN POR CAMBIO DE TEMPERATURA

Se ha desarrollado un equipo para la medida de la dilatación por aumento de la temperatura de muestras de arcilla compactada.

Las deformaciones a medir son muy pequeñas, por lo que se ha procurado que las deformaciones propias del equipo sean pequeñas y se han calibrado cuidadosamente. La humedad de las muestras debe permanecer constante durante el ensayo para evitar deformaciones por hidratación de la arcilla. El sistema de aislamiento hidráulico utilizado ha permitido mantener constante la humedad en periodos de tiempo cortos. A largo plazo (a partir de unos cuatro días), se observa una ligera entrada de agua en la probeta que puede ser debida a la difusión a través de la membrana o al paso de agua a través del sistema de sellado de los extremos de la muestra. La medida continua de los desplazamientos mediante un LVDT permite detectar movimientos por causas externas al equipo de ensayo.

7.1.2.3 EQUIPO DE APLICACIÓN DE FLUJO DE CALOR

Se ha puesto a punto un equipo para aplicar flujo de calor en muestras de arcilla compactada, en las que se mantiene su humedad global constante. En el ensayo se fija el flujo de calor en un extremo de la muestra y la temperatura del extremo opuesto. Durante el ensayo se mide la evolución de la temperatura en varios puntos de la muestra y la distribución de humedad y cambio de diámetro al finalizar el ensayo. Estos ensayos permiten estudiar de forma muy directa las propiedades térmicas del material, pero además, permiten evaluar los movimientos del agua en diferentes fases y las deformaciones que se producen de forma acoplada con el flujo térmico.

Al igual que en el ensayo de medida de la dilatación, hay que cuidar especialmente el sellado de la muestra para poder mantener constante la humedad global. Por otra parte, hay que señalar la importancia que tiene el aislamiento térmico lateral en el análisis de resultados. Con la configuración utilizada en la tesis, el 60% del calor generado en los calentadores pasa al ambiente a través de la superficie lateral del aislante.

7.1.3 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

7.1.3.1 ENSAYOS EDOMÉTRICOS

Se han realizado dos tipos de ensayos edométricos con succión controlada. En el primer tipo se han ejecutado trayectorias de cambios de carga manteniendo la succión constante o cambios de succión manteniendo la carga constante. En el segundo se ha impuesto el valor de la deformación vertical máxima experimentada por la bentonita.

En las trayectorias de aumento de carga tras una reducción de la succión, se ha observado una fuerte reducción de la presión aparente de preconsolidación, que está asociado al aumento de volumen experimentado pero el suelo durante la fase de hinchamiento bajo carga constante. Un ciclo inicial de aumento y disminución de la succión (aumento de la succión hasta más de 400 MPa y posterior reducción hasta el valor inicial), no parece tener efecto en el comportamiento mecánico posterior del material. Las deformaciones durante ese ciclo inicial son muy pequeñas y casi reversibles.

En las trayectorias de reducción de succión se han medido importantes aumentos de volumen cuando la carga aplicada ha sido baja. La relación entre la deformación y el logaritmo de la succión ha sido casi lineal en estos ensayos. Cuando la carga es alta (superior a 8 MPa), al reducirse la succión se han podido observar pequeñas reducciones de volumen asociadas al colapso de la macroestructura.

En los ensayos de deformación impuesta, se ha podido determinar la evolución de la carga a medida que se reducía el valor de la succión. Se han detectado tres zonas:

- La primera zona corresponde a succiones altas y cargas bajas. En esta región, la carga vertical está por debajo de la presión aparente de preconsolidación, el suelo es muy rígido y el aumento de carga para compensar los valores del hinchamiento es muy alto.
- Se entra en la segunda zona cuando se alcanza la presión de preconsolidación aparente. Entonces la rigidez del suelo frente a cargas es baja y por otra parte, la disminución de la succión se traduce en deformaciones de colapso que deben ser compensadas con una descarga. En esa zona, la tensión vertical tiende a disminuir. La presión de hinchamiento máxima corresponde al punto en que se alcanza la presión de preconsolidación aparente.
- La tercera zona corresponde a la región con succiones muy bajas donde el hinchamiento de la microestructura (agregados de arcilla), es muy importante y puede impedir que la macroestructura formada por agregados continúe colapsando. Por tanto, para impedir el aumento de volumen, la tensión debe aumentar cuando disminuye la succión.

Las presiones de hinchamiento alcanzadas finalmente dependen del valor de la deformación máxima permitida a la muestra. Un secado previo de la muestra aumenta ligeramente el valor de la presión de hinchamiento.

7.1.3.2 ENSAYOS DE DILATACIÓN TÉRMICA

En general, se ha obtenido bastante dispersión de la medida del coeficiente de dilatación térmica. En el primer aumento de temperatura se producen aumentos de volumen irrecuperables en siguientes ciclos de enfriamiento y calentamiento. Esta deformación irreversible es importante y puede ser del orden de la deformación total sufrida durante ese primer aumento de temperatura.

En los ensayos se ha podido medir un aumento del coeficiente de dilatación con la temperatura. Si se consideran las deformaciones elásticas tras varios ciclos de calentamiento, el coeficiente de dilatación volumétrica a 25 °C es del orden de 4.5×10^{-4} (1/K).

7.1.3.3 ENSAYOS DE FLUJO DE CALOR

En los ensayos se ha observado un desacoplamiento temporal entre los cambios de temperatura y los cambios de humedad. Los primeros se estabilizan rápidamente, mientras que para que la distribución de humedad sea la estacionaria, deben transcurrir varios días.

Se ha comprobado que los cambios de volumen debidos a la redistribución interna de humedad son mucho mayores que los cambios de volumen debidos a los cambios de temperatura.

7.1.4 MODELACIÓN DE LOS ENSAYOS

La modelación de los ensayos, pese a las limitaciones que pueden tener los modelos numéricos, ha resultado ser una herramienta de gran valor para el estudio del comportamiento del suelo durante los ensayos.

7.1.4.1 ENSAYOS EDMÉTRICOS

La modelación de los ensayos edométricos permite reproducir correctamente las medidas de la evolución de la deformación registrada en los ensayos.

En los ensayos con flujo a través de la muestra, se ha podido comprobar que si las diferencias de presión de gas impuestas por el flujo forzado son importantes, la succión de equilibrio en el centro de la muestra puede ser diferente de la succión que debería imponer la humedad relativa del aire controlada por la disolución en condiciones estáticas. Sin embargo, si las diferencias de presión de gas son pequeñas (diferencias de presión menores de 4 kPa entre los extremos de la muestra), la succión de la muestra es prácticamente igual a la que se quiere imponer.

En los ensayos donde se hace circular el aire a través de las piedras porosas, se ha comprobado que la velocidad del proceso de equilibrado de la succión depende de la velocidad de transferencia de agua en el contorno del suelo al aire circundante por las piedras. Esta velocidad de transferencia depende de las condiciones de movimiento del aire.

Siguiendo cualquiera de los dos procedimientos (en especial el primero), se puede reducir de forma importante el tiempo necesario para alcanzar condiciones estacionarias en los ensayos edométricos donde la succión se controla a través de la humedad relativa del aire cuando está en reposo.

7.1.4.2 ENSAYOS DE DILATACIÓN TÉRMICA

La modelación termo-hidro-mecánica de los ensayos de medida de la dilatación por efectos térmicos, proporciona resultados limitados ya que la variación de la curva de retención con la temperatura es poco conocida. Sin embargo, se han obtenido algunos resultados de interés:

- El equilibrio de la temperatura tras un escalón de cambio de temperatura en el contorno se produce en pocos minutos, mientras que el equilibrio de humedad necesita varias horas.
- Los cambios de succión debidos a los cambios de temperatura son pequeños si se supone que son debidos a cambios en el valor de la tensión superficial.
- Al enfriar la periferia de la muestra se produce un flujo de vapor hacia el exterior. El flujo másico de vapor puede llegar a ser dos órdenes de magnitud superior al flujo de agua líquida.

7.1.4.3 ENSAYOS CON FLUJO DE CALOR

La modelación del ensayo ha permitido conocer la evolución de las temperaturas, de la humedad y de la deformación en cada punto del suelo. Se ha podido evaluar la magnitud de los flujos de agua líquida desde la zona fría a la caliente y de vapor de la zona caliente a la fría a lo largo del tiempo. Durante los primeros instantes del ensayo predomina el flujo de vapor mientras que en condiciones estacionarias los dos flujos se compensan.

7.1.5 IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS

Se ha desarrollado una metodología para identificar parámetros del problema termo-hidráulico por el método de la máxima verosimilitud. El hecho de utilizar el método de la máxima verosimilitud permite introducir el error de cada una de las medidas y la información previa disponible, también permite cuantificar el grado de confianza de los valores de los parámetros estimados. El proceso de identificación consiste en minimizar una función objetivo, que depende de la diferencia entre los valores de las variables medidas y calculadas.

El método ha sido aplicado para la identificación de parámetros que controlan el problema termo-hidráulico en los ensayos de flujo de calor. Para resolver el problema directo,

se ha utilizado un código que resuelve las ecuaciones de dicho problema por el método de los elementos finitos (CODE_BRIGTH). Para calcular la matriz de sensibilidad, es preciso valorar las derivadas de las variables respecto los parámetros en cada punto e instante de medida, esta valoración ha sido numérica. Para la minimización, se ha utilizado el algoritmo de Gauss-Newton.

Para simular el ensayo, ha sido preciso resolver el problema termo-hidráulico en una geometría tridimensional con axisimetría.

La fase de calibración reveló que un 60% del calor inyectado se perdía por el aislante lateral. Las propiedades térmicas de dicho aislante se evaluaban antes de realizar la identificación de parámetros de la muestra, esto debía realizarse porque el montaje de la muestra en la célula de ensayo no permitía garantizar una continuidad en las propiedades del sistema de aislante. Las medidas utilizadas para realizar la calibración han sido la temperatura y la humedad en varios puntos de la muestra, la primera se medía de manera continua con termopares y la segunda cortando la muestra en discos al acabar el ensayo y midiendo la humedad de cada uno.

En la identificación, se han considerado tres casos: El primero (a), consistió en resolver la ecuación de balance de energía y la identificación de la conductividad térmica y el calor específico global de la muestra de suelo. Los valores obtenidos son consistentes con los obtenidos por el procedimiento de “prueba y error”.

El caso (b) consistió en resolver las ecuaciones de balance de agua y energía acopladas y en la identificación de la tortuosidad y del exponente n de la ley de permeabilidad relativa utilizada. Los parámetros de las ecuaciones constitutivas térmicas se suponen conocidos. El dato utilizado para realizar la calibración fue la distribución de humedad en las muestras al acabar los ensayos. El proceso de identificación reveló que combinaciones de ambos parámetros daban resultados similares de la función objetivo. Este hecho es razonable puesto que la humedad es una variable global y es difícil distinguir entre el agua transportada por difusión de vapor (controlada por la tortuosidad) y la transportada en forma líquida (controlada por el parámetro n). El acoplamiento entre ambos parámetros puede explicarse también si se tiene en cuenta que al finalizar el ensayo, el flujo de vapor y el flujo de agua

líquida tienen la misma magnitud pero sentidos contrarios, de tal modo que la humedad en cada punto de la muestra se mantiene constante.

Finalmente, el caso (c) implica la identificación de la conductividad térmica saturada, la tortuosidad y el exponente n . Se resuelve el problema termo-hidráulico. En este caso, los datos utilizados eran las temperaturas medidas a lo largo del ensayo y la distribución de humedad a la finalización del mismo.

El análisis indica que la confianza de los parámetros es superior en los parámetros térmicos que en los hidráulicos. También se puede concluir que la calidad del modelo utilizado es satisfactorio puesto que la diferencia entre los valores medidos y calculados son del mismo orden que los errores de medida.

Los valores obtenidos están dentro del intervalo normal de estos parámetros. El método utilizado permite sistematizar el proceso de identificación con el fin de obtener los valores óptimos para reproducir las medidas con los modelos seleccionados. El método permite también determinar el grado de relación entre los diferentes parámetros.

7.2 LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

Las líneas futuras de investigación deberían dirigirse, por una parte, a la ampliación y mejora de los prototipos utilizados en esta tesis, y por otra, a la mejora de la caracterización T-H-M de la bentonita del cabo de Gata. En relación al primer aspecto, cabe señalar las siguientes mejoras:

- Ensayos de obtención de la curva de retención a volumen constante: Asegurar que el molde sea rígido y que impida que la muestra hinche. Se debería tener en cuenta la posibilidad de realizar ensayos a varias temperaturas para conocer el efecto de la temperatura en la curva de retención.
- Ensayos edométricos con succión controlada: Instrumentar el circuito de aire y la muestra para poder proporcionar datos al código de cálculo. Validar el ensayo con distintos tipos de suelo. Diseñar equipos para realizar estos ensayos a varias temperaturas. Sería interesante

realizar un ensayo con una medida independiente de la succión en el centro de la muestra, por ejemplo, utilizando psicrómetros.

- Ensayos de dilatación térmica sin confinamiento: Se debería mejorar el sistema de sellado de la muestra y tratar de reducir la dispersión del ensayo.
- Ensayos de conductividad térmica sin confinamiento: Se debería mejorar la estanqueidad de la muestra. Sería interesante medir deformaciones de manera continua con transductores pegados a la muestra.

En los ensayos edométricos no se conocen las tensiones horizontales y sus resultados son difíciles de interpretar utilizando un modelo constitutivo de tipo general. Sería interesante desarrollar un equipo triaxial con control de succión con el fin de poder realizar trayectorias que ayuden a verificar el modelo que simula el comportamiento de arcillas expansivas, como el BExM, por ejemplo. Este equipo de ensayo se debería diseñar con ayuda de simulaciones numéricas, ya que el proceso de cambio de succión es muy lento y se deberían ensayar diversos métodos de aplicación de succión.

Otro ensayo interesante que enlaza con el ensayo de flujo de calor sin confinamiento es un ensayo en una célula rígida donde se inyecte calor por un extremo y agua por el otro. De este modo, se pueden reproducir en la arcilla unas condiciones de contorno similares a las que tendrá en un repositorio cuando los bloques de arcilla hayan expandido y sellado las juntas. En la célula deberían situarse sensores de temperatura, humedad relativa y células de carga a fin de registrar el máximo número de variables posibles a lo largo del ensayo.

Por último, sería interesante aplicar las técnicas de identificación de parámetros a otros problemas termo-hidro-mecánicos en general y en particular a los experimentos de maqueta y en el ensayo “in situ” del proyecto FEBEX. Para ello se debería implementar como una parte más de CODE_BRIGHT un algoritmo de minimización como el utilizado en esta tesis.

BIBLIOGRAFÍA

- Alonso, E.E., Gens, A., Josa, A. (1990). A constitutive model for partially saturated soils. *Géotechnique*, 40(3): 405-430.
- Alonso E.E., Gens, A. (1992). A framework for the behaviour of unsaturated expansive soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 29: 1013-1032.
- Alonso, E.E., Gens, A., Gehling, W. (1994). Elastoplastic model for unsaturated expansive soils. *Proceedings of the 3rd European conference on numerical methods in geomechanics*. Manchester. I. Smith (ed.), Balkema, 11-18.
- Alonso, E.E., Lloret, A., Gens, A., Delahaye, C.H., Vaunat, J., Volckaert, G. (1998). Coupled analysis of a backfill hydration test. *Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 22(1): 1-27.
- Alonso E.E. (1998). Modeling expansive soil behaviour. *Proceedings of the second international conference on unsaturated soils*, Beijing, International Academic Publishers, 2: 37-70.
- Alonso, E.E., Vaunat, J., Gens, A. (1999). Modelling the mechanical behaviour of expansive clays. *Engineering Geology*, 54: 173-183.
- Alonso, E.E., Gens, A., Lloret, A. (2001). Comportamiento termo-hidro-mecánico de barreras arcillosas de ingeniería: Verificación en laboratorios subterráneos . (Äspö, Grimsel y Mont Terri). IV Jornadas de investigación y desarrollo tecnológico en gestión de residuos radiactivos. *Publicación técnica ENRESA 09/2001*. Vol.II: 33-48
- Albert, Josep F. (1988). El calor de la Terra. Energia geotèrmica a Catalunya, Publicación del Departament d'Industria de la Generalitat de Catalunya.
- Andersland y Anderson (1978). *Geotechnical Engineering for Cold Regions*. Mc Graw-Hill. New York.
- Angulo, R., Gaudet, J-P, Thony, J-L, Vauclin, M. (1993). Détermination expérimentale des caractéristiques hydrodynamiques d'un sol gonflant non saturé pour la modélisation des écoulements. *Revue Française de Géotechnique*, 62: 49-57.
- Armstead, H. Christopher H. (1978). *Geothermal Energy* E.&F.N. SPON Ltd, Londres.
- Arpaci V.S. (1966). *Conduction Heat Transfer*. Addison Wesley Pub. Co.
- Assouline, S., Tessier, D. (1998). A conceptual model of the soil water retention curve. *Water Resources Research*, 34(2): 223-231.

- ASTM D4535-85: Standard Test Methods for Measurement of Thermal Expansion of Rock Using a Dilatometer. *ASTM*.
- Atienza, E. (1999). Efecto de la succión osmótica en el hinchamiento de arcillas expansivas. *Tesina de especialidad*. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Aubertin, M., Ricard, J.F., Chapuis, R.P. (1998). A predictive model for the water retention curve: application to tailings from hard-rock mines. *Canadian Geotechnical Journal*, 35: 55-69.
- Aviles-Ramos, C., Haji-Sheikh, A., Beck, J.V. (1998). Exact Solution of Heat Conduction in Composite Materials and Application to Inverse Problems. *Journal of Heat Transfer*, 120: 592-599.
- Baker, R., Kassiff, G., Levy, A. (1973). Experience with a psychrometric technique. *Proceedings of the 3rd International Conference on Expansive Soils*: 83-95. Haifa.
- Baldi, G., Hueckel, T., Pellegrini, R. (1988). Thermal volume changes of the mineral-water system in low porosity soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 25: 807-825.
- Beck, J.V, Arnold, K.J. (1977). *Parameter Estimation in Engineering and Science*, John Wiley and sons, New York.
- Bertolotti, M., Liakhov, G., Voti, R., Michelotti, F., Sibilia, C. (1993). Method for thermal diffusivity measurements based on photothermal deflection. *Journal of Applied Physics*, 74(12): 7078-7084.
- Bevington, P. (1969). *Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences*. McGraw-Hill, New York.
- Bilskie, J.R., Horton, R., Bristow, K.L. (1998). Test of a dual-probe heat pulse method for determining thermal properties of porous materials. *Soil Science*, 163(5): 346-355.
- Blum, J., Henderson, J.B., Hagemann, L. (1998). Measurement of the thermophysical properties of an aluminium – silicon casting alloy in the solid molten regions. *High Temperature – high pressures*, 30: 153-157.
- Bolzon, G., Schrefler, B.A., Zienkiewicz, O.C. (1996): Elastoplastic soil constitutive laws generalized to partially saturated states. *Géotechnique*, 46(2): 279-289.
- Boutonnet, M., Livet, J., Deschassot, B. (1974). Conductivité thermique apparente des matériaux d'assises traitées. *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 73: 69-86.
- Bronswijk, J.J.B. (1988). Modeling of water balance, cracking and subsidence of clay soils. *Journal of Hydrology*, 97: 199-212.
- Bury, K.V. (1975). *Statistical models in applied science*. John Wiley and sons, New York.

- Carslaw H.S., Jager J.C. (1986). *Conduction of Heat in Solids*. Clarendon Press, 2^a ed. Oxford.
- Carrera, J. (1984). Estimation of aquifer parameters under transient and steady-state conditions. *Tesis Doctoral*. University of Arizona.
- Carrera, J., Neuman, Sh.P. (1985). Maximum-Likelihood Adjoint-State Finite Element Estimation of Groundwater Parameters under Steady and Nonsteady State Conditions. *Applied Mathematics and Computation*, 17: 405-432.
- Carrera, J., Neuman, Sh.P. (1986). Estimation of Aquifer Parameters Under Transient and Steady Conditions: 1. Maximum Likelihood Method Incorporating Prior Information. *Water Resources Research*, 22(2): 199-210.
- Carrera, J. y Galarza, G. (1991). Estudio de la infiltración a través de la cobertura de la F.U.A. *Publicación técnica 02/91 de ENRESA*. Madrid.
- CATSIUS CLAY project. (1998). Calculation and testing of behaviour of unsaturated clay as a barrier in radioactive waste repositories. Compiled by Alonso, E.E. y Alcoberro, J. *CIMNE. European Comission. DOC XII/286/98-EN*. Bruselas.
- Cividini, A., Maier, G., Nappi, A. (1983). Parameter Estimation of a Static Geotechnical Model Using a Bayes' Approach. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 20(5): 215-226.
- Custodio, E., Llamas, M.R. (1983). *Hidrología Subterránea*. Ediciones Omega, 2^a ed. Barcelona.
- Chahal, R.S. (1964). Effect of temperature and trapped air on the energy status of water in porous media. *Soil Science*, 98: 107-112.
- Chaker, A., Menguy, G., Laurent, L. (1998). Thermophysical properties of local building materials in southern Algeria. *High Temperatures-High Pressures*, 30(2): 165-170.
- Chandler, R.J., Gutierrez, C.I. (1986). The paper filter method of suction measurement. *Géotechnique*, 36(2): 265-268.
- Chang, R.K. (1969). Pressure plate apparatus for volumetric measurement of suction, swelling pressure and consolidation in clay soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 6: 209-212.
- Christopher, P., Milly, D. (1982). Moisture and heat transport in hysteretic, inhomogeneous porous media: A matric head-based formulation and numerical model. *Water Resources Research*, 18(3): 489-498.
- De Diny, S., Masrouri, F., Tisot, J.P. (1993). Détermination de la conductivité hydraulique d'un limon non saturé. *Revue Française de Géotechnique*, 62: 67-74.

- Delage, P., Vicol, T., Suraj da Silva, G.P.R. (1992). Suction controlled testing of non saturated soils with an osmotic consolidometer. *Proceedings of 7th International Conference on Expansive Soils*, 1: 206-211, Dallas.
- Delage, P., Howat, M.D. Cui, Y.J. (1998). The relationship between suction and swelling properties in a heavily compacted unsaturated clay. *Engineering Geology*, 50: 31-48.
- Edlefsen, N.E., Anderson, A.B.C. (1943). Thermodynamics of soil moisture. *Hilgardia*, 15(2): 31-298.
- Edwards, A.W.F. (1972). *Likelihood*. Cambridge University Press, Cambridge.
- ENRESA (1994). Almacenamiento geológico profundo de residuos radioactivos de alta actividad (AGP). Conceptos preliminares de referencia. *Publicación Técnica 07/94*. Madrid.
- ENRESA (1995). Almacenamiento geológico profundo de residuos radioactivos de alta actividad (AGP). Diseños conceptuales genéricos. *Publicación Técnica 11/95*. Madrid.
- ENRESA (1997). FEBEX. Etapa preoperacional. Informe de síntesis. *Publicación técnica 9/97*. Madrid.
- ENRESA, (1998). FEBEX. Bentonite: Origin, properties and fabrication of blocks. *Publicación Técnica 05/98*. Madrid.
- ENRESA (2000). Informe Final FEBEX I full-scale engineered barriers for a deep geological repository for high level radioactive waste in crystalline host rock, Final Report, publicación técnica 1/2000.
- Escario, V., Sáez, J. (1973). Measurement of the properties of swelling and collapsing soils under controlled suction. . *Proceedings of the 3rd International Conference on Expansive Soils*: 195-200. Haifa.
- Esteban, F. (1990). Caracterización experimental de la expansividad de una roca evaporítica. Identificación de los mecanismos de hinchamiento. *Tesis Doctoral*. Universidad de Cantabria.
- Evgin, E., Svec, O.J. (1988): Heat and Moisture Transfer Characteristics of Compacted Mackenzie Slit. *Geotechnical Testing Journal*, 11(2): 92-99.
- Feng, Z.G., Michealides, E.E. (1998). Transient Heat Transfer From a Particle With Arbitrary Shape and Motion. *Journal of heat transfer*, 120: 674-681.
- Ferrante, M., Yeh, T.C. (1999). Heat and flux variability in heterogeneous unsaturated soils under transient flow conditions. *Water Resources Research*, 35(5): 1471-1479.
- Finstererle, S., Pruess, K. (1995). Solving the estimation-identification problem in two-phase flow modeling. *Water Resources Research*, 31(4): 913-924.

- Fredlund, D.G., Anqing, X., Shangyan, H. (1994). Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 31: 553-546.
- Gens, A. (1995). Constitutive laws. *Modern issues in non-saturated soils*. A. Gens, P. Jouana, B.A. Schrefler (eds.), Springer Verlag, Wien, 129-158.
- Gens A., García-Molina A.J., Guimaraes, L. do N. (1997). Preoperational thermo-hydro-mechanical (THM) modelling on the “in situ” test. *Informe Técnico UPC. 70-UPC-M-3-001*. Barcelona.
- Gens, A., García-Molina, A.J., Olivella, S., Alonso, E.E., Huertas, F. (1998). Analysis of a full scale in-situ heating test simulating repository conditions. *International Journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, 22: 515-548.
- Gera F., Hueckel T., Peano A. (1996). Critical issues in modelling the long-term hydro-thermo-mechanical performance of natural clay barriers. *Engineering Geology*, 41: 17-33.
- Giek K. (1995). Manual de fórmulas técnicas. *Ed Alfaomega*.
- Gioda, G., Maier, M. (1980). Direct search solution of an inverse problem in elastoplasticity: identification of cohesion, friction angle and in situ stress by pressure tunnel tests. *International journal for numerical methods in engineering*, (15): 1823-1848.
- Gmitro J. I., Vermeulen, T. (1964). Water activities of sulfuric acid solutions. *A.I.Ch.E.J.* 10(5): 740.
- Gómez-Hernández, J.J., Wen, X.H. (1998). To be or not to be in multi-Gaussian? A reflection on stochastic hydrogeology. *Advances in water resources*, 21(1): 47-61.
- Graham J., Gray M., Halayko K.G., Hume H., Kirkham T., Oscarson D. (1998). Gas breakthrough pressures in compacted illite and bentonite. *Proceedings of the 5th International Workshop on Key Issues in Waste Isolation Research*: 1-5. Barcelona.
- Harsh, K. Gupta (1980). *Geothermal resources: an energy alternative*, Amsterdam.
- Harris, J.S. (1995). *Ground Freezing in practice*, Thomas Telford, Londres.
- Hollenbeck, K.J., Jensen, K.H. (1998). Experimental evidence of randomness and nonuniqueness in unsaturated outflow experiments designed for hydraulic parameter estimation. *Water Resources Research*, 34(4): 595-602.
- Hollenbeck, K.J., Jensen, K.H. (1998). Maximum-likelihood estimation of unsaturated hydraulic parameters. *Journal of Hydrology*, 210: 192-205.
- Honjo, Yusuke, Thavaraj, Thuraiamy (1994). On uncertainty evaluation of contaminant migration through clayey barriers. *Canadian Geotechnical Journal*, 31: 637-648.

- Hopmans, J.W., Dane, J.H. (1986). Temperature dependence of soil hydraulic properties. *Soil Science Society American Journal*, 50: 4-9.
- Houston, S.L., Houston, W.N., Wagner, A.M.: (1994). Laboratory filter paper suction measurements. *Geotechnical Testing Journal*, 17(2): 185-194.
- Hueckel, T., Baldi, G. (1990). Thermoplasticity of saturated clays: Experimental Constitutive Study. *Journal of Geotechnical Engineering*, 116(12): 1778-1796.
- Jiri Simunek, Martinus Th. Van Genuchten, Molly M.Grib, Jan W. Hopmans (1998). Parameter estimation of unsaturated properties from transient flow processes. *Soil and Tillage Research*, 47: 27-36.
- Kanno, T., Wakamatsu, H. (1992). Water uptake and swelling properties of unsaturated bentonite buffer materials. *Canadian Geotechnical Journal*, 29: 1102-1107.
- Kanno, T., Kato, K., Yamagata, J. (1996). Moisture movement under a temperature gradient in highly compacted bentonite. *Engineering Geology*, 41: 287-300.
- Kerston, M.S. (1941). Laboratory research for the determination of the thermal properties of soils. Engineering experiment station. University of Minnesota.
- Komine, H., Ogata, N. (1996). Prediction for swelling characteristics of compacted bentonite. *Canadian Geotechnical Journal*, 33: 11-22.
- Komine, H., Ogata, N. (1998). Thermal influence on compacted bentonite for nuclear waste disposal. *Environmental Geotechnics, Sêco e Pinto (ed)*: 39-44, Rotterdam.
- Jones, T.L., Gee, G.W., Heller, P.R. (1990). Psychrometric measurement of soil water potential: Stability of calibration and test of pressure-plate samples. *Soil Science*, 150(2): 535-541.
- Josseume, H., Hieng, I.O., Stempfelet, J.P. (1991). Détermination des paramètres de compressibilité d'une argile raide à partir d'essais oedométriques à haute pression. *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 172: 109-120.
- Ledesma, A. (1987). Identificación de parámetros en geotecnia. Aplicación a la excavación de túneles. *Tesis Doctoral*. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Ledesma, A., Gens, A., Alonso, E.E. (1989). Análisis retrospectivos usando un criterio de máxima verosimilitud. *XII International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Río de Janeiro.
- Leong E.C., Rahardjo, H. (1997). Permeability functions for unsaturated soils. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 123(12): 1118-1126.
- Lide D.R. (1998). CRC Handbook of Chemistry and Physics. *CRC Press*. New York

- Lloret A., (1982). Comportamiento deformacional del suelo no saturado bajo condiciones drenadas y no drenadas. *Tesis Doctoral*. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Lloret A., Alonso E.E., (1985). State surfaces for partially saturated soils. *Proceedings of 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2: 557-562, San Francisco.
- Lloret A., Villar M.V., Pintado X. (1999). Ensayos THM: Informe de síntesis. *Informe técnico UPC*. 70-UPC-M-0-004. Barcelona.
- Ma Ch., Hueckel T. (1992). Stress and pore pressure in a saturated clay subjected to a heat from radioactive waste: a numerical simulation. *Canadian Geotechnical Journal* 29: 1087-1094.
- Marquardt, D.W. (1963). An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters, *Journal Society of Industrial and Applied Mathematics*, 11: 431-441.
- Martin, A.R., Saltiel, C., Shyy, W. (1998). Heat Transfer Enhancement With Porous Inserts in Recirculating Flows. *Journal of Heat Transfer*, 120: 458-467.
- Martin R.T., (1962). Adsorbed water on clay: a review. *Proceedings of the 9th National conference on clays and clay minerals*: 28-70. Pergamon, Oxford.
- Medina, A. (1993). Estimación conjunta de parámetros de las ecuaciones de flujo y transporte. *Tesis Doctoral*. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Mikulich, W.A., Gudehus, G. (1995). Uniaxial tension, biaxial loading and wetting tests on loess. *Proceedings of the Unsaturated soils*: 145-150.
- Mohamed, A.M.O., Yong, R.N., Onofrei, C.I., Kjartanson, B.H. (1996). Coupled Heat and Moisture Flow in Unsaturated Swelling Clay Barriers. *Geotechnical Testing Journal*, 19(2): 155-163.
- Mous, S.L.J. (1993). Identification of the movement of water in unsaturated soils: the problem of identifiability of the model. *Journal of Hydrology*, 143: 153-167.
- Muraleetharan, K.K, Granger, K.K. (1999). The use of miniature pore pressure transducers in measuring matric suction in unsaturated soils. *Geotechnical Testing Journal*, 22(3): 226-234.
- Oldecop, L. (1999) One-dimensional compression tests of rockfill with relative humidity control. *Proceedings of the 13th Young Geotechnical Engineers Conference*, Santorini.
- Olivella S., Carrera J., Gens A., Alonso E.E. (1994). Nonisothermal Multiphase Flow of Brine and Gas Through Saline Media. *Transport in porous media*, 15: 271-293.
- Olivella, S. (1995). Nonisothermal multiphase flow of brine and gas through saline media. *Tesis Doctoral*. Universitat Politècnica de Catalunya.

- Perry R. H. (1993). Manual del ingeniero químico. *Editorial McGraw-Hill, 6ª edición*. México.
- Pintado, X. (1993). Estudi experimental de la relació entre el mòdul de tall i la succió en un sòl compactat. *Tesina de especialidad*. UPC.
- Pollock D. (1986). Simulation of Fluid Flow and Energy Transport Processes Associated With High-Level Radioactive Waste Disposal in Unsaturated Alluvium. *Water Resources Research* 22(5): 765-775.
- Procedimientos del proyecto FEBEX: 70-UPC-G-0-03, 70-UPC-G-0-04, 70-UPC-G-0-05, 70-UPC-G-0-06. ENRESA.
- Qian, X., Gray, D.H., Woods, R. (1991). Resonant column tests on partially saturated sands. *Geotechnical Testing Journal*, 14(3): 266-275.
- Radhakrishna H.S., Crawford A.M., Kjartanson B., Lau K.C. (1992). Numerical modelling of heat and moisture transport through bentonite-sand buffer. *Canadian Geotechnical Journal*, 29: 1044-1059.
- Romero (1999). Characterisation and thermo-hydro-mechanical behaviour of unsaturated Boom Clay. An experimental study. *Tesis Doctoral*. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Rousset, G., Giraud, A. (1996). Stockage de déchets radioactifs dans l'argile. *Revue Française de Géotechnique*, 74: 19-30.
- Saez, J. (1986). Técnicas de determinación de la succión en campo y en laboratorio en curso sobre cimentaciones en terrenos metaestables: colapsables y expansivos. Instituto Agustín de Bethencourt, Madrid.
- Sattler, P., Fredlund, D.G. (1989). Use of thermal conductivity sensors to measure matric suction in the laboratory. *Canadian Geotechnical Journal*, 26: 491-498.
- SCK-CEN (1994). Model development and validation of the thermal-hydraulic-mechanical and geochemical behaviour of clay barrier. Final Report.
- Saix, C. (1987). Contribution a l'étude des sols non saturés en température. *Tesis Doctoral*. Université des sciences et techniques du Languedoc.
- Selvadurai, A.P.S. (1996). Heat-induced moisture movement in a clay barrier I. Experimental modelling of borehole emplacement. *Engineering Geology*, 41: 239-256.
- Serratrice, J.F., Soyeux, B. (1996): Les essais de gonflement. *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées* 204: 65-85.
- She, H.Y., Sleep, B.E. (1998). The effect of temperature on capillary pressure-saturation relationships for air-water and perchloroethylene-water systems. *Water Resources Research*, 34(10): 2587-2597.

- Shuai, F., Fredlund, D. (1998). Model for the simulation of swelling-pressure measurements on expansive soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 35: 96-114.
- Simunek, J., van Genuchten, M. Th., Gribb, M.M., Hopmans, J.W. (1998). Parameter estimation of unsaturated soil hydraulic properties from transient flow processes. *Soil&Tillage Research*, 47: 27-36.
- Suriol, J. (1993). Medida de la deformabilidad de suelos mediante el equipo de columna resonante. *Revista de obras públicas*, 3319: 57-66.
- Richards, L.A. (1941). A pressure membrane extraction apparatus for soil solution. *Soil Science*, 51: 377-386.
- Ribó Rodríguez, R. (2000). Desarrollo de un sistema integrado para tratamiento de geometría, generación de malla y datos para análisis por el método de los elementos finitos. *Tesis Doctoral*. Universitat Politècnica de Catalunya
- Ridley, A.M., Burland, J.B. (1993) A new instrument for measurement of soil moisture suction. *Géotechnique*, 43(2): 321-324.
- Romano, N., Santini, S. (1999). Determining soil hydraulic functions from evaporation experiments by parameter estimation approach: Experimental verifications and numerical studies. *Water Resources Research*, 35(11): 3343-3359.
- Thomas H.R., Sansom M.R., Volckaert G., Jacobs P., Kumnan M. (1994). An experimental and numerical investigation of the hydration of compacted powdered boom clay. *Numerical Methods in Geotechnical Engineering*, Smith (ed.): 135-141.
- Thomas, H.R., Rees S.W., Mc Evoy, J.M. (1994). The thermal conductivity of sea bed soils. Geotechnical Consulting Group.
- Thomas H.R., He Y. (1995). Analysis of coupled heat, moisture and air transfer in a deformable unsaturated soil. *Géotechnique* 45(4): 677-689.
- Timlin, D., Pachepsky, Y. (1998). Measurement of unsaturated soil hydraulic conductivities using a ceramic cup tensiometer. *Soil Science*, 163(8): 625-635.
- UNE 103-101-95: Análisis granulométrico de suelos por tamizado. *AENOR*.
- UNE 103-102-95: Análisis granulométrico de suelos finos por sedimentación. *AENOR*.
- UNE 103-103-94: Determinación del límite líquido de un suelo por el método de Casagrande. *AENOR*.
- UNE 103-104-93: Determinación del límite plástico de un suelo. *AENOR*.
- Vaisala (1996). Descripción del higrómetro HMP 230. Ref A587.
- Van Genuchten, R. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society American Journal*, 44: 892-898.

- Van Impe, W.F., Bouazza, A. (1996). Barrières d'étanchéité dans les sites de décharges: développements récents. *Revue Française de Géotechnique*, 74: 3-18.
- Villar, M.V. (1994). Modelling and validation of the thermal-hydraulic-mechanical and geochemical behaviour of the clay barrier. *Final Report 1991-1994*. CIEMAT, Madrid.
- Villar M.V., Lloret A., Linares J., Pérez A. (1997). Bentonita (origen, propiedades y fabricación de bloques). *Informe técnico CIEMAT*. 70-IMA-M-3-3. Madrid.
- Villar M.V. (1998). Ensayos THM para el proyecto FEBEX. Primer informe. *Informe técnico CIEMAT*. 70-IMA-L-5-51. Madrid.
- Villar, M.V. (2000). Caracterización termo-hidro-mecánica de una bentonita del Cabo de Gata. *Tesis Doctoral*. Universidad Complutense de Madrid.
- Villar, M.V. y Lloret, A. (2001). Variation of the intrinsic permeability of expansive clays upon saturation. *Proceedings of International symposium on Suction, Swelling, Permeability and Structure of Clays*: 259-266, Shizouka, Japón.
- Wheeler, S.J. (1996): Inclusion of specific water volume within an elasto-plastic model for unsaturated soil. *Canadian Geotechnical Journal*, 33: 42-57.
- Wiggins, R.A. (1972). The General Inverse Problem: Implication of Surface Waves and Free Oscillations for Earth Structure. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 10(1):251-285.
- Wilson, G.W., Fredlund, D.G., Barbour, S.L. (1994). Coupled soil-atmosphere modelling for soil evaporation. *Canadian Geotechnical Journal*, 31: 145-155.
- Wu, S., Gray, D.H., Richart, F.E. (1985). Capillary effects on shear modulus at high strains. *XI International Conference of Soil Mechanics and Foundation*, 2: 1091-1094.
- Wu, C.C., Hwang, G.J. (1998). Flow and Heat Transfer Characteristics Inside Packet and Fluidized Beds. *Journal of Heat Transfer*, 120: 667-673.
- Yahia-Aissa, M. (1999). Comportement hydromécanique d'une argile gonflante fortement compactée. *Tesis Doctoral*. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris.
- Yeh, G-W (1986). Review of Parameter Identification Procedures in Groundwater Hydrology: The inverse problem. *Water Resources Research*, 22(2): 95-108.
- Yuk Gehling, W (1994). Suelos expansivos: Estudio experimental y aplicación de un modelo teórico. *Tesis Doctoral*. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Zemansky, M. W. (1973). Calor y Termodinámica. Aguilar ediciones.
- Zimmie T.F., Mahmud M.B., De A. (1994). Accelerated physical modelling of radioactive waste migration in soil. *Canadian Geotechnical Journal*, 31: 683-691.