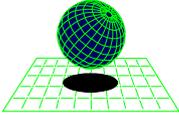




Ciemat



CENTRO
INTERNACIONAL
DE
METODOS NUMERICOS
EN INGENIERIA

CIEMAT/DIAE/54520/1/02

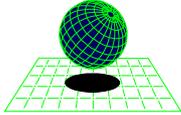
Informe 70-UPC-M-0-04

ENSAYOS THM: INFORME DE SÍNTESIS

AUTORES: A. Lloret
 M.V. Villar
 X. Pintado

Marzo 2002

Ciemat



CENTRO
INTERNACIONAL
DE
METODOS NUMERICOS
EN INGENIERIA

CIEMAT/DIAE/54520/1/02

Informe 70-UPC-M-0-04

ENSAYOS THM: INFORME DE SÍNTESIS

PREPARADO (Prepared)	REVISADO (Revised)	APROBADO (Approved)
FECHA (Date): Febrero 2002	FECHA (Date): Febrero 2002	FECHA (Date): Marzo 2002
FIRMA (Signature): A. Lloret, M. V. Villar, X. Pintado	FIRMA (Signature): M.V. Villar, A.Lloret	FIRMA (Signature): E. Alonso, P. Rivas
		

ENSAYOS THM: INFORME DE SÍNTESIS

Índice

1.	INTRODUCCIÓN	5
2.	DETERMINACIÓN DIRECTA DE PARÁMETROS	8
2.1.	CARACTERIZACIÓN BÁSICA	8
2.1.1.	Peso específico	8
2.1.2.	Límites de Atterberg, superficie específica y granulometría	8
2.1.3.	Distribución de tamaño de poros	10
2.2.	DENSIDAD DEL AGUA	12
2.3.	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA	14
2.4.	CALOR ESPECÍFICO	16
2.5.	RELACIÓN SUCCIÓN/HUMEDAD	16
2.5.1.	Relación succión/humedad sin confinamiento	16
2.5.2.	Relación succión/grado de saturación con confinamiento	22
2.5.3.	Efecto de la histéresis	26
2.5.4.	Efecto de la temperatura	29
2.6.	PERMEABILIDAD SATURADA AL AGUA	31
2.7.	PERMEABILIDAD AL GAS	34
2.8.	MÓDULO ELÁSTICO	36
3.	CALIBRACIÓN DE MODELOS MEDIANTE RETROANÁLISIS	39
3.1.	ENSAYOS DE INFILTRACIÓN	39
3.2.	ENSAYOS DE FLUJO DE CALOR	44
3.3.	ENSAYOS DE CALENTAMIENTO A HUMEDAD CONSTANTE: DEFORMACIONES POR EFECTOS TÉRMICOS	53
3.4.	DEFORMACIONES POR SATURACIÓN BAJO CARGA	59
3.5.	PRESIÓN DE HINCHAMIENTO	61
4.	AVANCE EN EL CONOCIMIENTO DEL COMPORTAMIENTO THM	65
4.1.	ENSAYOS EDOMÉTRICOS A TEMPERATURA AMBIENTE	65
4.1.1.	Ensayos sin control de la deformación máxima	65
4.1.2.	Ensayos con control de la deformación máxima	77
4.2.	ENSAYOS EDOMÉTRICOS A ALTAS TEMPERATURAS	84
4.3.	ENSAYOS EN JUNTAS	89
4.3.1.	Ensayos de hidratación	89
4.3.2.	Ensayos de compresión	91
5.	RESUMEN Y CONCLUSIONES	92
6.	BIBLIOGRAFÍA	98

Índice de figuras

Figura 1: Curva granulométrica media, con indicación de las desviaciones estándar, para las muestras analizadas	9
Figura 2: Curva porosimétrica incremental de muestras procedentes de diferentes secciones (superior, media e inferior) de bloques de bentonita FEBEX, con indicación de la densidad seca en g/cm^3	12
Figura 3: Valores de densidad del agua adsorbida calculados para muestras de arcilla de diferente densidad seca saturadas a volumen constante con agua destilada (la densidad seca y la humedad de cada punto están expresadas en g/cm^3 y %, repectivamente)	14
Figura 4: Relación entre la conductividad térmica de la bentonita compactada y el contenido volumétrico de aire	15
Figura 5: Relación entre la conductividad térmica de la bentonita compactada con distintas densidades secas y el grado de saturación	16
Figura 6: Relación succión/humedad en ensayos sin confinamiento.....	17
Figura 7: Relación entre la densidad seca y la succión en ensayos de disminución de succión sin confinamiento	18
Figura 8: Cambio de índice de poros en los ensayos de disminución de succión sin confinamiento	19
Figura 9: Relación entre los incrementos de volumen total y de agua en suelo en función de la succión en los ensayos de disminución de succión sin confinamiento	20
Figura 10: Relación succión/grado de saturación en ensayos sin confinamiento	21
Figura 11: Relaciones ajustadas entre el grado de saturación y la succión considerando el volumen del suelo variable (trazo continuo) o constante (trazo discontinuo)	21
Figura 12: Relación entre succión y humedad en trayectorias de humectación con confinamiento	23
Figura 13: Relación entre succión y humedad en trayectorias de humectación/secado con confinamiento (las densidades secas correspondientes a los extremos de cada trayectoria se indican en g/cm^3)	24
Figura 14: Curvas de retención en trayectorias de humectación con confinamiento (entre paréntesis se indica la densidad seca medida en la muestra ensayada).....	25
Figura 15: Curvas de retención medidas y ajustadas en trayectorias de humectación con confinamiento. Entre paréntesis se indica el número de ecuación utilizado en la Tabla V	26
Figura 16: Relaciones succión humedad y grado de saturación en trayectorias de secado/humectación y humectación/secado. Deformación libre	28
Figura 17: Efecto de la histéresis en trayectorias de humectación/secado en condiciones confinadas. Los números entre paréntesis corresponden a las curvas cuyos parámetros se indican en la Tabla VI.....	29
Figura 18: Relación entre succión y humedad para diferentes temperaturas y densidades	30
Figura 19: Relación entre la permeabilidad saturada al agua y la densidad seca de la bentonita, a partir de diversos tipos de muestras de bentonita y composición del agua	32
Figura 20: Variación de la permeabilidad saturada de la bentonita compactada con diferentes índices de poros.	33
Figura 21: Variación de la permeabilidad intrínseca de la bentonita con diferentes porosidades	34
Figura 22: Relación entre la permeabilidad al gas y el volumen de poros accesible al gas.....	35
Figura 23: Permeabilidad intrínseca de la bentonita calculada a través de flujo de agua en condiciones saturadas y de flujo de gas con grados de saturación bajos	36
Figura 24: Módulo elástico de corte (expresado en MPa) a pequeñas deformaciones, medido en muestras con diversa densidad seca y grado de saturación.....	37
Figura 25: Evolución del módulo de corte con el grado de saturación para distintas presiones de confinamiento	38
Figura 26: Evolución de la medida de la entrada de agua en los ensayos de infiltración en células de acero (las líneas horizontales indican la cantidad de agua estimada para saturar las muestras cuando se considera que la densidad del agua adsorbida es $1,00 \text{ g/cm}^3$).....	40
Figura 27: Evolución de la entrada de agua en tres ensayos en celda de teflón para diversas temperaturas y densidades secas iniciales de la bentonita	41
Figura 28: Evolución del agua tomada para tiempos superiores a 30 minutos con relación al agua necesaria para saturar el suelo considerando el efecto de la viscosidad del agua y la porosidad del suelo. ($f(\rho_d)=1$ para $\rho_d = 1.605$ (densidad seca inicial $1,75 \text{ g/cm}^3$) y $f(\rho_d)= 2,27$ para $\rho_d = 1,485$ (densidad seca inicial $1,60 \text{ g/cm}^3$)	42
Figura 29: Comparación entre valores medidos y estimados en ensayos de infiltración en célula de teflón. Densidad inicial $1,75 \text{ g/cm}^3$, humedad inicial 14 %, ($k_r=S_r^3$)	43
Figura 30: Comparación entre valores medidos y estimados de la humedad en ensayos de infiltración de bentonita en contacto con granito, en célula triaxial ($k_r=S_r^3$).....	44
Figura 31: Valores de la conductividad térmica de la bentonita en función del grado de saturación según diversos métodos de medida	47
Figura 32: Evolución de la temperatura medida y calculada (análisis térmico) en diversos puntos de una muestra compactada con una densidad seca de $1,63 \text{ g/cm}^3$ y una humedad del 19,5 % (ensayo 4 en la Tabla VII). En	

un extremo de la muestra se inyecta calor ($314 \text{ cal/s}\cdot\text{m}^2$) mientras que la otra base se mantiene a una temperatura de $30 \text{ }^\circ\text{C}$	48
Figura 33: Comparación entre valores medidos y estimados de la humedad al finalizar un ensayo de flujo de calor. Retroanálisis termohidráulico del ensayo 4 de la Tabla VII	48
Figura 34: Relaciones entre la permeabilidad relativa y el grado de saturación. Los valores del parámetro “a” en los ensayos de flujo de calor corresponden a los indicados en la Tabla VII	49
Figura 35: Valores del factor de tortuosidad y del exponente en la ley de permeabilidad relativa obtenidos en los diversos retroanálisis termohidráulicos.....	49
Figura 36: Valores de la conductividad térmica en condiciones de saturación que se han obtenido en los retroanálisis termohidráulicos de los diversos ensayos de flujo de calor. Se ha impuesto un exponente de 3 para la ley de la permeabilidad relativa.....	50
Figura 37: Curvas de nivel de la función objetivo en el caso del ensayo 2 de la Tabla VII. Se indica asimismo, la situación de los puntos representativos de los valores de los parámetros obtenidos en otros ensayos.....	51
Figura 38: Comparación entre valores de la humedad final medida en los ensayos de flujo de calor y las predicciones numéricas utilizando un mismo conjunto de parámetros	52
Figura 39: Comparación entre valores de la temperatura final medida en los ensayos de flujo de calor y las predicciones numéricas utilizando un mismo conjunto de parámetros	52
Figura 40: Resultados típicos de la medida de la deformación vertical en ciclos de calentamiento/enfriamiento sobre muestras de bentonita compactada	53
Figura 41: 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.....	54
Figura 42: Valores del cociente entre aumento de deformación lineal y temperatura medidos en ensayos con diversos valores de densidad seca y grados de saturación	55
Figura 43: Deformación radial medida tras tres ensayos típicos de flujo de calor (ensayos 1, 4 y 6 de la Tabla VII)	57
Figura 44: Cambios de humedad medidos tras tres ensayos típicos de flujo de calor (ensayos 1, 4 y 6 de la Tabla VII)	58
Figura 45: Deformaciones medidas y calculadas en un ensayo de flujo de calor (ensayo 2 de la Tabla VII)	58
Figura 46: Deformación medida y correlaciones obtenidas en los ensayos de hinchamiento bajo carga realizados en UPC y CIEMAT.....	60
Figura 47: Deformaciones de hinchamiento bajo carga en muestras saturadas con diversos tipos de agua.....	60
Figura 48: Evolución del volumen de poros en los ensayos de hinchamiento bajo carga	61
Figura 49: Valores de la presión de hinchamiento obtenidos en muestras compactadas con diversas densidades secas y saturadas con agua destilada.....	62
Figura 50: Comparación de las presiones de hinchamiento obtenidas en muestras saturadas con agua destilada (línea continua) y las obtenidas en muestras saturadas con agua granítica y en muestras saturadas con agua destilada pero talladas a partir de bloques en la dirección paralela y perpendicular a la de compactación..	63
Figura 51: Comparación de los estados finales de tensión y volumen en los ensayos de hinchamiento bajo carga constante y de presión de hinchamiento.....	64
Figura 52: Comparación entre el valor de la presión de hinchamiento y la carga necesaria para que no se produzca ningún cambio de volumen al saturar el suelo.....	64
Figura 53: Trayectorias seguidas en los ensayos edométricos con control de succión: a) ensayos realizados en CIEMAT, b) ensayos realizados en UPC.....	69
Figura 54: Cambios de volumen medidos en los ensayos edométricos con control de succión: a) ensayos realizados en CIEMAT, b) ensayos realizados en UPC.....	70
Figura 55: Cambio de volumen al aumentar la carga (a) y reducir la succión (b) en los ensayos realizados en CIEMAT	71
Figura 56: Cambio de volumen al aumentar la carga (a) y reducir la succión (b) en los ensayos realizados en UPC.....	72
Figura 57: Cambios de volumen durante las descargas al finalizar los ensayos edométricos	73
Figura 58: Cambios de volumen experimentados por una muestra con densidad inicial de $1,70 \text{ g/cm}^3$, sometida a una trayectoria de saturación bajo una carga de $0,1 \text{ MPa}$ y a un posterior ciclo de carga y descarga bajo succión nula	73
Figura 59: Cambios de volumen en trayectorias de secado / humedecimiento por encima de la succión inicial de las muestras: a) detalle en el rango alto de succión, b) cambio de tendencia al reducir la succión a un valor por debajo del inicial.....	74
Figura 60: Comparación entre el volumen de poros tras la saturación, en ensayos de inundación bajo carga y en ensayos con trayectorias de succión controlada.....	75
Figura 61: Valor de la presión de preconsolidación obtenida en trayectorias de carga tras humedecimiento a diferentes succiones	75

Figura 62: Valores de la compresibilidad de la bentonita cargada o descargada a diferentes valores de la succión	76
Figura 63: Valores de la variación de volumen frente a cambios de succión para diversos valores de la carga vertical aplicada	76
Figura 64: Trayectorias seguidas en ensayos edométricos con deformación vertical limitada: a) ensayos realizados en CIEMAT, b) ensayos realizados en UPC. Las líneas gruesas indican las zonas donde el volumen de la muestra se mantiene constante	79
Figura 65: Trayectorias seguidas en los ensayos con control de los cambios de volumen: a) ensayos realizados en CIEMAT, b) ensayos realizados en UPC.....	80
Figura 66: Comparación entre las trayectorias medidas y las calculadas en base a los cambios de volumen al aumentar la carga y reducir la succión.....	81
Figura 67: Comparación entre puntos de las superficies de fluencia obtenidos a partir de los ensayos con control de deformación vertical y de carga a succión constante	81
Figura 68: Trayectorias seguidas en los ensayos de presión de hinchamiento en las cercanías de la zona de succión nula	82
Figura 69: Presiones de hinchamiento obtenidas en ensayos con y sin control de succión.....	82
Figura 70: Cambios de volumen medidos en la fase de descarga bajo succión nula en los ensayos con control de la deformación realizados en CIEMAT (a) y en UPC (b).....	83
Figura 71: Valores de la deformabilidad en descarga para diferentes ensayos bajo condiciones de saturación....	84
Figura 72: Trayectorias de carga y de succión seguidas en los ensayos edométricos con control de temperatura y de succión: a) succión controlada con presión de gas, b) succión controlada con ácido sulfúrico	86
Figura 73: Cambios de volumen en ensayos edométricos con control de succión mediante presión de gas realizados a diversas temperaturas	87
Figura 74: Deformaciones por cambios de succión y de carga a diversas temperaturas en ensayos edométricos con control de succión por presión de gas	88
Figura 75: Cambios de volumen por reducción de succión mediante disoluciones de ácido sulfúrico	88
Figura 76: Distribución final de humedad en la arcilla después de dos ensayos de sellado (cuatro pastillas apiladas) realizados bajo una presión de inyección de 0,5 MPa y de duración a) 1 día, b) 7 días (sólo se representa media sección).....	90
Figura 77: Relación entre la carga y el desplazamiento entre los labios de una junta entre bloques, para diversos grados de saturación.....	91

Índice de tablas

Tabla I: Composición química del agua utilizada en los ensayos	7
Tabla II: Distribución granulométrica media de las 11 muestras analizadas.....	9
Tabla III: Datos de la porosimetría por intrusión de mercurio en la parte superior, media e inferior de los bloques muestreados	11
Tabla IV: Distribución orientativa de la porosidad total para la bentonita FEBEX con su humedad higroscópica	11
Tabla V: Parámetros de ajuste a las curvas de retención en trayectorias de humectación.....	25
Tabla VI: Parámetros de ajuste a las curvas de retención en trayectorias de humectación y secado tras saturación	27
Tabla VII : Parámetros obtenidos por retroanálisis en diversos ensayos de flujo de calor.....	45

Índice de Anexos

ANEXO I: TABLAS DE RESULTADOS CIEMAT

ANEXO I: TABLAS DE RESULTADOS UPC

1. INTRODUCCIÓN

En el concepto de referencia español para almacenamiento de residuos radiactivos de alta actividad (RAA) en roca cristalina, las cápsulas de residuo se emplazan en galerías horizontales rodeadas por una barrera de arcilla formada por bloques fabricados con bentonita densamente compactada (ENRESA 1994).

Las barreras de ingeniería (residuo, cápsula y relleno de arcilla) son elementos clave en el concepto de almacenamiento final para los RAA. La cápsula aísla el residuo durante un cierto periodo de tiempo. La barrera de arcilla tiene el propósito múltiple de proporcionar estabilidad mecánica a la cápsula, absorbiendo tensiones y deformaciones generadas por la roca alojante; retardar la llegada del agua a la cápsula; y retener/retardar la migración de radionucleidos, liberados por el deterioro de la cápsula.

En planes de I&D de años anteriores, ENRESA ha estudiado fuentes de aprovisionamiento y el comportamiento térmico, hidráulico, mecánico y geoquímico de los materiales a utilizar en la barrera arcillosa. Ha estudiado también el comportamiento hidro-geoquímico de macizos graníticos. Teniendo en cuenta los resultados de estos estudios, y el hecho de que se había realizado ningún experimento a gran escala para el emplazamiento del residuo en galería horizontal en granito, ENRESA llegó a la conclusión de que el siguiente paso, para progresar en la comprensión y evaluación del comportamiento del campo próximo (especialmente de la barrera arcillosa), era la ejecución de un experimento a gran escala como el FEBEX. Esto requería la ejecución de un experimento con el múltiple objetivo de demostrar la factibilidad de fabricar y construir las barreras de ingeniería y de buscar metodologías y modelos para evaluar el comportamiento termo-hidro-mecánico (THM) y termo-hidro-geoquímico (THG) del campo próximo. Para conseguir estos objetivos, ENRESA decidió realizar un ensayo *in situ*, en un laboratorio subterráneo en condiciones (escala, profundidad, y tipo de roca) similares a las del concepto de referencia; pero también consideró necesario realizar un ensayo en maqueta, a escala casi real, y un conjunto de ensayos experimentales de laboratorio, por las razones que se describen a continuación.

El objetivo de demostración se ha realizado principalmente en el ensayo *in situ*, con una contribución parcial del ensayo en maqueta. Para el objetivo de comprobación de la capacidad predictiva de los modelos numéricos THM y THG, sin embargo, el ensayo *in situ* tiene varias limitaciones: la roca alojante es heterogénea; las condiciones iniciales y de contorno pueden no ser determinadas con precisión suficiente; y no se conseguirá, probablemente, la saturación completa, debido a la baja permeabilidad del macizo rocoso. Por estas razones, el ensayo *in situ* es complementado por el ensayo en maqueta, en que tanto la geometría como las condiciones iniciales y de contorno están bien definidas y controladas; y se estima, además, que se conseguirá la saturación completa. Se consideró, no obstante, que además de los dos ensayos a gran escala era necesario ejecutar un programa específico de ensayos experimentales de laboratorio –para desarrollar (o mejorar) las ecuaciones constitutivas THM, estudiar los procesos físico-químicos y geoquímicos, y mejorar los modelos THG disponibles– puesto que en el laboratorio los materiales pueden ser ensayados en muchas condiciones (simples, definidas y controladas) para análisis más específicos de variables y procesos.

En este informe se resumen los principales resultados obtenidos por CIEMAT y UPC en ensayos de laboratorio de los denominados THM durante la fase preoperacional y

operacional del Proyecto FEBEX. En concreto, los objetivos perseguidos con la realización de estos ensayos han sido los siguientes:

- Determinar experimentalmente los parámetros básicos que utilizan los modelos numéricos. Esta determinación se realiza a partir de ensayos directamente diseñados para ello.
- Medir los cambios experimentados por el material frente a acciones de tipo termo-hidro-mecánico análogas a las que se desarrollan en los experimentos *in situ* y en maqueta. Estas acciones se imponen sobre el material en condiciones muy controladas y permiten calibrar la idoneidad de los modelos teóricos a emplear. Adicionalmente, estos ensayos permiten obtener por ajuste entre las medidas y las predicciones de los modelos existentes, conjuntos de parámetros del modelo teórico que pueden reproducir el comportamiento del material observado en los ensayos.
- Realizar ensayos encaminados a avanzar en el conocimiento del comportamiento termo-hidro-mecánico de las arcillas expansivas. Se trata de ensayos dirigidos a profundizar en las bases teóricas del comportamiento de la bentonita y que permiten completar y, en su caso, mejorar los modelos teóricos que se utilizan actualmente.

En conclusión, puede establecerse que el objeto primordial de los ensayos THM ha sido proporcionar los parámetros y las pautas de comportamiento necesarias para el empleo de los modelos numéricos, pero no puede desdeñarse una cierta componente de investigación básica encaminada a avanzar en el conocimiento del comportamiento de la bentonita.

El material utilizado ha sido una de las arcillas españolas de referencia, una bentonita de la región de Cabo de Gata (Almería), constituida mayoritariamente por montmorillonita y utilizada tanto en el ensayo *in situ* como en el de maqueta del Proyecto FEBEX. Sus características básicas pueden encontrarse en ENRESA (1998 y 2000). En ocasiones, en este informe se hace distinción entre muestra “no mezclada” y “muestra homogénea” o mezclada. Esto se refiere a que tras el procesado en fábrica de la bentonita, se tomaron muestras de cada una de las sacas en las que se envasó el producto. Estas muestras son las que se denominan “no mezcladas”. Posteriormente, en los laboratorios de CIEMAT, se mezcló la mitad de todas estas muestras, obteniéndose una única muestra de referencia 70-IMA-3-4-0, que es la “homogénea” o “mezclada”, con la que se han realizado la mayor parte de los ensayos, y que es la única de la que han dispuesto el resto de laboratorios implicados en FEBEX. A la vista de los resultados obtenidos, unas u otras muestras se consideran igualmente representativas de las características de la bentonita FEBEX, por lo que en algunos casos, se han considerado todas las determinaciones realizadas en ambos tipos de muestras para obtener valores medios (ENRESA 1998).

En las determinaciones que requieren utilización de agua (permeabilidad, hinchamiento, edómetros) se han utilizado tres tipos diferentes: destilada, granítica y salina. El agua destilada se ha utilizado por convención y como patrón. El agua granítica representa el agua que satura la barrera de bentonita en un almacenamiento tipo, y se ha empleado un agua granítica comercial. El agua salina tiene una composición representativa del agua intersticial de la bentonita saturada, es decir, de la que “circula” en el interior de la barrera. La composición química de las aguas granítica y salina empleadas en los ensayos se muestra en la Tabla I:

Tabla I: Composición química del agua utilizada en los ensayos

Elemento (mmol/L)	Granítica	Salina
Cl ⁻	0,37	100
SO ₄ ²⁻	0,15	15
HCO ₃ ⁻	2,36	
Mg ²⁺	0,39	15
Ca ²⁺	1,12	10
Na ⁺	0,48	80
K ⁺	0,026	
pH	8,3	7

Como se ha dicho, este informe es un resumen de los principales resultados obtenidos en los ensayos y de los aspectos del comportamiento THM de la arcilla FEBEX deducidos a partir de ellos. La descripción detallada de los ensayos y sus resultados se encuentra en los siguientes documentos:

- VILLAR, M.V.(1999): Ensayos THM para el Proyecto FEBEX. Informe CIEMAT/DIAE/54111/9/99. 70-IMA-L-0-66. 115 pp.
- LLORET, A. & PINTADO, X.(1999): Ensayos THM para el Proyecto FEBEX. Informe 70-IMA-M-0-03.
- VILLAR, M.V.(2000): Caracterización termo-hidro-mecánica de una bentonita de Cabo de Gata. *Tesis Doctoral*. Universidad Complutense de Madrid. 396 pp.

Los ensayos realizados se han agrupado bajo los epígrafes establecidos en la especificación sobre programación de ensayos THM (Lloret *et al.* 1997). Los procedimientos empleados para los distintos ensayos son, bien las Normas UNE, cuando existen para el ensayo en cuestión, o los Procedimientos CIEMAT o UPC recogidos en el Manual de Procedimientos del Proyecto FEBEX.

2. DETERMINACIÓN DIRECTA DE PARÁMETROS

2.1. CARACTERIZACIÓN BÁSICA

La caracterización básica de un material incluye la determinación de propiedades que, siendo de obtención sencilla, delimitan su clasificación y condicionan su comportamiento. Incluye también la adquisición de parámetros básicos necesarios para el cálculo de otras magnitudes. Los aspectos considerados en esta sección, que se refieren a determinaciones realizadas en CIEMAT, se tratan con más detalle en Villar (2000).

2.1.1. Peso específico

El peso específico relativo de las partículas sólidas se ha determinado mediante picnómetros, utilizando agua destilada como medio de suspensión. Se determinó sobre 13 alícuotas de la muestra FEBEX durante la etapa de caracterización básica y, en una investigación posterior, sobre otras 7 alícuotas. El valor medio de la densidad obtenida es de $2,70 \pm 0,04 \text{ g/cm}^3$.

2.1.2. Límites de Atterberg, superficie específica y granulometría

Se ha determinado el límite líquido y el límite plástico sobre 19 alícuotas diferentes de la arcilla FEBEX, siguiendo las Normas UNE correspondientes, con la particularidad de que el tiempo de macerado de la muestra se ha aumentado a 48 horas. Los valores promedio y las desviaciones estándar encontrados son:

Límite líquido: $102 \pm 4 \%$

Límite plástico: $53 \pm 3 \%$

Índice de plasticidad: 49 ± 4

Para la superficie específica externa, determinada sobre 20 alícuotas mediante el método BET del punto único, se ha obtenido un valor medio de $32 \pm 3 \text{ m}^2/\text{g}$. Ha de tenerse en cuenta que el valor de superficie específica no es único, y que depende de factores como las condiciones de desgasificación, la temperatura de la medida y el método empleado para el cálculo (BET del punto único o isoterma completa) (Sing *et al.* 1985). De hecho, en la determinación de la superficie específica de la arcilla FEBEX en otros laboratorios, mediante adsorción de nitrógeno a $77 \text{ }^\circ\text{K}$ y aplicando el método BET según la Norma ASTM D 3663-84, se han obtenido valores de entre 56 y $59 \text{ m}^2/\text{g}$ (J. Cuevas, com. pers.).

La distribución granulométrica se ha obtenido por combinación de las técnicas de sedimentación y tamizado, realizando una dispersión muy intensa de la suspensión (con tiempos largos de humectación y el uso de ultrasonidos) y tamizando la muestra dispersada utilizada para la sedimentación. Los resultados de la granulometría, realizada sobre 11 alícuotas diferentes, se muestran en la Tabla II y se representan gráficamente en la Figura 1.

Tabla II: Distribución granulométrica media de las 11 muestras analizadas

Tamaño (mm)	Pasante (media, %)	Pasante (desviación estándar, %)
2,000	100	0
1,190	99	0
0,590	98	1
0,297	96	1
0,148	94	1
0,074	93	1
0,057	89	2
0,040	88	2
0,026	87	3
0,015	84	2
0,010	81	2
0,009	80	2
0,005	77	2
0,004	74	2
0,002	67	3

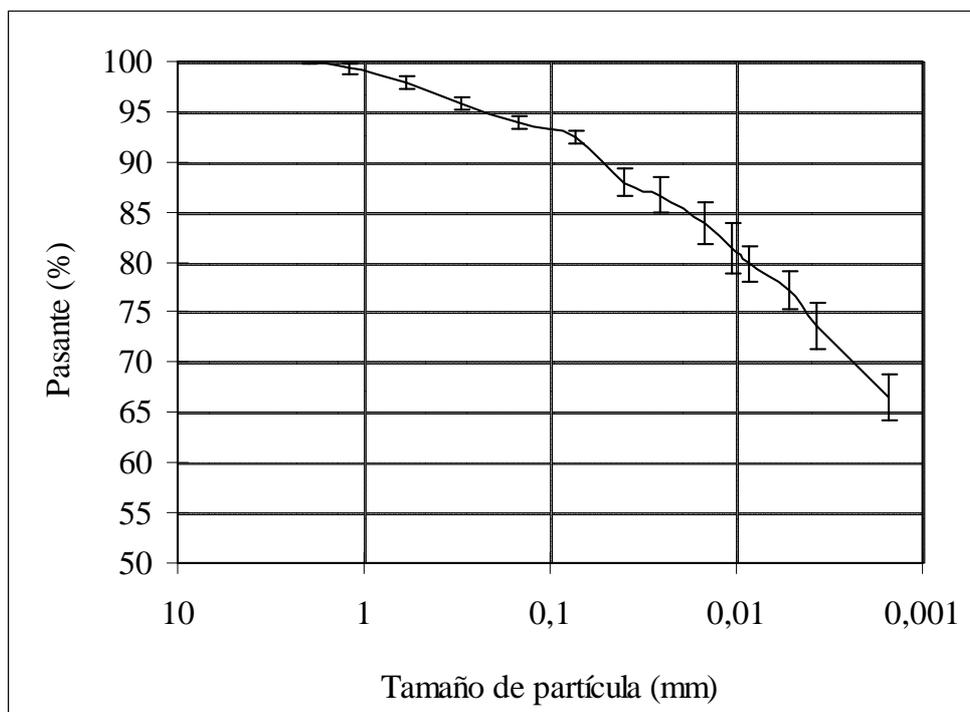


Figura 1: Curva granulométrica media, con indicación de las desviaciones estándar, para las muestras analizadas

2.1.3. Distribución de tamaño de poros

El estudio de la microestructura de muestras de bentonita compactada en un intervalo de densidades secas de entre 1,67 y 1,78 g/cm³ se ha realizado mediante porosimetría de intrusión de mercurio. El método empleado permite medir diámetros de poro de entre 200 y 0,006 μm aproximadamente. Por lo tanto, el mercurio no llega a intruir la microporosidad (poros de tamaño inferior a 0,002 μm, según la clasificación de Sing *et al.* 1985). Antes de introducir las muestras en el porosímetro se ha eliminado el agua de los poros mediante liofilización.

El estudio porosimétrico se ha realizado sobre bloques de los compactados para el ensayo en maqueta del Proyecto FEBEX, obtenidos por compactación uniaxial del granulado de arcilla a presiones de entre 40 y 50 MPa. La determinación de porosimetría se ha realizado en tres muestras de cada bloque, situadas en la parte superior central, media central e inferior central del bloque. Estos tres niveles presentan ciertas diferencias en la densidad seca, que es mayor en la parte superior del bloque, debido al rozamiento que se produce con las paredes del molde durante la compactación. Los datos obtenidos, recogidos en la Tabla III, se dan de acuerdo con la siguiente clave (Tuncer 1988):

- e₁: índice de poros calculado a partir del peso específico determinado mediante picnómetros y la densidad seca medida experimentalmente por inmersión en mercurio (Norma UNE 7045).
- e₂: índice de poros calculado de acuerdo a la intrusión de mercurio en el porosímetro (o índice de poros aparente, e*).
- % total: porcentaje total de poros intruido por mercurio.
- φ medio (μm): diámetro de poros medio.
- % grandes, medianos o pequeños: porcentaje de poros grandes (diámetro mayor de 6 μm), medianos (diámetro de entre 6 y 0,2 μm) o pequeños (diámetro de entre 0,2 y 0,006 μm) respecto al volumen total de poros intruidos. Esta clasificación de tamaños se ha establecido atendiendo a los resultados porosimétricos obtenidos en un gran número de muestras de arcilla FEBEX analizadas, y abarca sólo la macro y la mesoporosidad. Los límites entre familias pueden variar ligeramente entre diferentes muestras.
- moda de poros grandes, medios o pequeños (μm).
- coef. unif.: coeficiente de uniformidad de poros, φ₄₀/φ₈₀.

Tabla III: Datos de la porosimetría por intrusión de mercurio en la parte superior, media e inferior de los bloques muestreados

	SUPERIOR	MEDIA	INFERIOR	TOTAL
N° muestras	15	15	15	45
ρ_d (g/cm³)	1,73±0,01	1,72±0,03	1,68±0,19	1,71±0,11
e₁	0,593±0,110	0,570±0,033	0,640±0,281	0,599±0,168
e₂	0,201±0,058	0,183±0,045	0,193±0,088	0,192±0,065
% total	35±11	32±7	34±17	33±12
Diám. medio (µm)	0,06±0,06	0,04±0,04	0,04±0,04	0,04±0,04
% grandes	24±7	23±7	23±5	23±6
Moda grandes (µm)	17±5	18±8	20±12	18±4
% medios	23±7	22±7	22±5	26±6
Moda medios (µm)	0,76±0,58	0,90±0,78	0,60±0,06	0,76±0,56
% pequeños	53±12	55±12	55±6	54±10
Moda pequeños (µm)	0,018±0,010	0,019±0,040	0,014±0,004	0,016±0,006
Coef. unif.	36±26	42±34	44±33	41±31

El estudio porosimétrico no muestra variaciones significativas entre las distintas posiciones dentro de un mismo bloque. Se observa cómo el porcentaje de porosidad intruido por el mercurio es bastante bajo (33 % en promedio), lo que significa que existe un importante volumen de poros (67 %) cuyo tamaño es inferior a 0,006 µm (límite de acceso del equipo) o bien, que no están intercomunicados. Teniendo esto en cuenta, se puede recalcular el porcentaje de poros de cada intervalo de tamaño, obteniéndose los valores medios, sólo orientativos, que se muestran en la Tabla IV. Esta distribución corresponde a la muestra con su humedad higroscópica, y puede no coincidir con la de la muestra saturada, puesto que al ser un material reactivo el diámetro de los poros varía con la humedad. En la Tabla III se aprecia también que es bajo el coeficiente de uniformidad, puesto que existe un claro predominio de los poros pequeños.

Tabla IV: Distribución orientativa de la porosidad total para la bentonita FEBEX con su humedad higroscópica

Intervalo de tamaño (µm)	Volumen (porcentaje)
> 6	7
6 - 0,2	8
0,2 - 0,006	18
< 0,006	67

La Figura 2 muestra una curva porosimétrica típica de tres muestras compactadas de bentonita FEBEX pertenecientes a cada una de las tres secciones (superior, media e inferior), en la que se aprecian las tres familias principales de poros (grandes, medianos y pequeños), y cómo el método de intrusión de mercurio sólo permite acceder a la macroporosidad y a parte de los mesoporos. Al tratarse de una curva de porcentaje de incrementos de volumen de poro entre dos escalones de presión de inyección consecutivos, los diámetros a que está referida se calculan como el promedio entre los diámetros correspondientes a los dos escalones.

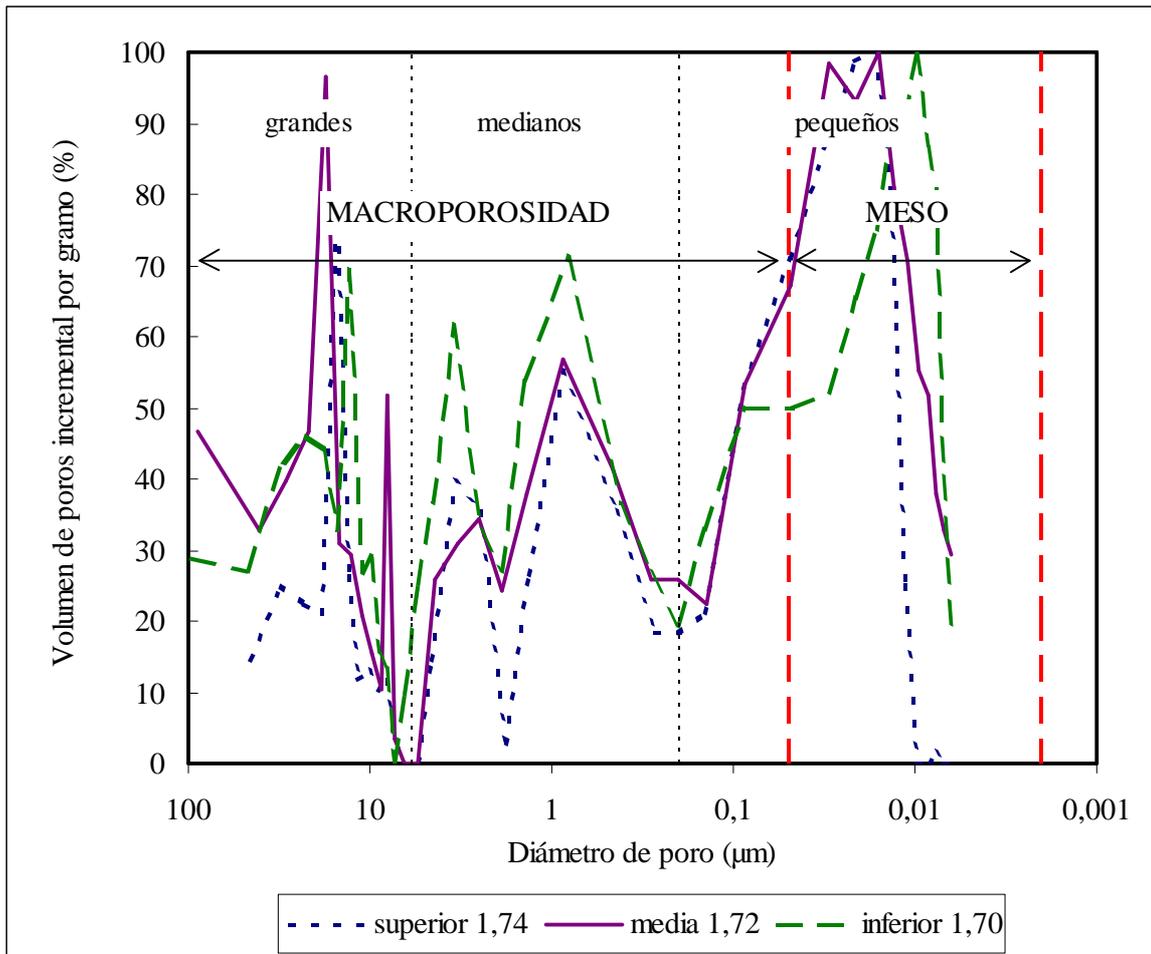


Figura 2: Curva porosimétrica incremental de muestras procedentes de diferentes secciones (superior, media e inferior) de bloques de bentonita FEBEX, con indicación de la densidad seca en g/cm^3

2.2. DENSIDAD DEL AGUA

En las secciones que siguen a continuación y en los anexos se constatará que, con frecuencia, el grado de saturación de la arcilla al final de ensayos en los que la muestra se satura a volumen constante –calculado a partir de su densidad, humedad y peso específico de las partículas sólidas–, resulta mayor del 100 %. Se trata concretamente de los ensayos de permeabilidad, infiltración, presión de hinchamiento, saturación bajo carga y curvas de retención a volumen constante. En general, la diferencia con el valor de 100 % aumenta con la densidad seca, haciéndose particularmente notable para densidades secas superiores a $1,60 \text{ g/cm}^3$. Se han analizado diversas causas que pudieran explicar esta anomalía (deficiente determinación del peso específico, error en

la determinación de la humedad final, inexactitud en la determinación de la densidad de la muestra), sin que ninguna de ellas por separado ni en conjunto puedan justificar los elevados valores calculados (Villar 2000).

Por otra parte, el cálculo de los grados de saturación se realiza sistemáticamente atribuyendo un valor de $1,00 \text{ g/cm}^3$ a la densidad del agua, lo que según manifiestan diversos autores, podría no ser cierto para el agua adsorbida en arcillas.

Teniendo esto presente, se ha calculado la densidad que debería tener el agua para que el grado de saturación se ajustase a 100 % en cada uno de los ensayos realizados. Se han agrupado todos los datos de muestras saturadas a volumen constante en función de su densidad seca, por intervalos de $0,05 \text{ g/cm}^3$, hallando los valores medios de humedad y de densidad del agua adsorbida correspondientes a cada intervalo de densidad. Se han utilizado los datos de 150 ensayos de permeabilidad, presión de hinchamiento, saturación bajo carga y curva de retención a volumen constante, en todos los cuales se ha saturado la muestra a volumen constante con agua destilada. Los valores medios obtenidos se representan en la Figura 3. Se observa cómo a medida que la humedad de la arcilla disminuye, la densidad del agua aumenta. Sin embargo, la mayor repercusión sobre la densidad del agua la tiene, en realidad, la densidad seca de la muestra (aunque lógicamente cuánto mayor es la densidad seca menor es la humedad de saturación), estando ambas directamente relacionadas. Por tanto, la modificación de la densidad del agua podría estar determinada no sólo por la humedad de la arcilla, sino también por su porosidad, puesto que la disminución del tamaño de los poros al aumentar la densidad seca podría dificultar el desarrollo de las dobles capas difusas. Esto se refiere al caso en el que la arcilla se satura a volumen constante, impidiéndose la expansión que de otra forma se produciría.

Lo mostrado en esta sección constituye únicamente una justificación de la obtención de grados de saturación mayores de 100 % cuando éstos se calculan considerando la densidad del agua como la del agua libre ($1,00 \text{ g/cm}^3$). Según se ha comprobado, esto no es correcto, y para hacerlo notar se utiliza en lo que sigue el símbolo S_r^* para referirse al grado de saturación calculado como es la práctica habitual en geotecnia, suponiendo una densidad del agua adsorbida igual a la del agua libre.

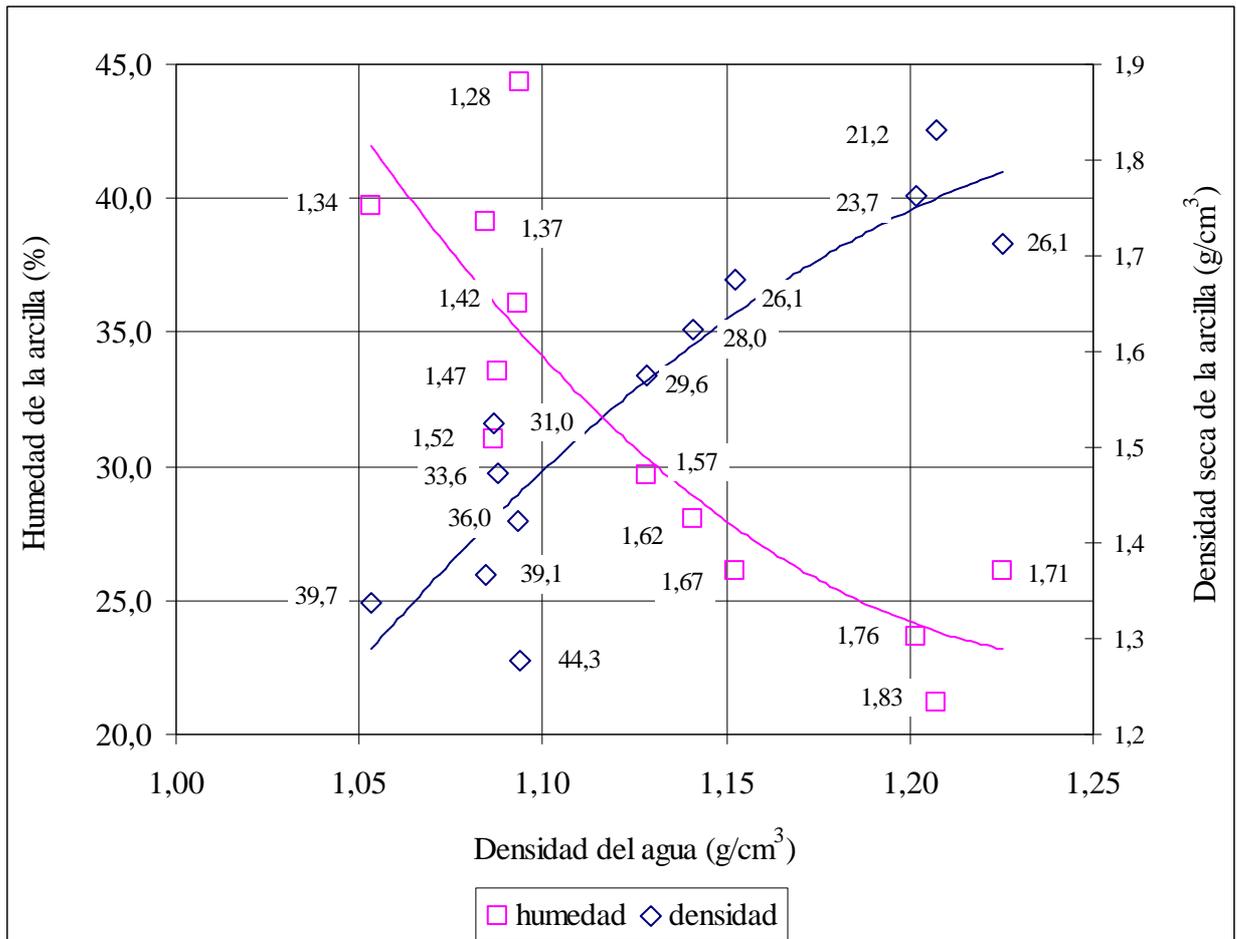


Figura 3: Valores de densidad del agua adsorbida calculados para muestras de arcilla de diferente densidad seca saturadas a volumen constante con agua destilada (la densidad seca y la humedad de cada punto están expresadas en g/cm³ y %, respectivamente)

2.3. CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

CIEMAT ha realizado medidas directas de la conductividad térmica de la bentonita compactada con diferentes densidades secas y humedades (Tabla Anexo I- I a Tabla Anexo I- IV), para ello se ha utilizado un equipo que funciona según el método transitorio del hilo caliente. Se compactaron bloques a partir de muestras sin mezclar y a partir de la muestra homogénea, obteniéndose resultados que pueden tratarse conjuntamente. Se ha constatado un aumento de la conductividad con la densidad seca y con la humedad de las muestras. En la Figura 4 se muestra cómo la conductividad térmica disminuye al aumentar el contenido volumétrico de aire en las muestras. Puede establecerse una sencilla correlación entre la conductividad térmica (λ , W/mK) y el contenido volumétrico de aire (en el rango de porosidades, n , entre 0,35 y 0,45):

$$\lambda = 1,260 \cdot 10^{-2,182(n(1-S_r))} \quad [1]$$

A partir de estos mismos resultados, se puede obtener la siguiente regresión entre el grado de saturación, S_r , y la conductividad térmica (Figura 5):

$$\lambda = 1,28 - \frac{0,71}{1 + e^{(S_r - 0,65)/0,100}} \quad [2]$$

La conductividad térmica medida en dirección paralela a la superficie de compactación ha resultado ser ligeramente mayor que la medida en la dirección normal a dicha superficie.

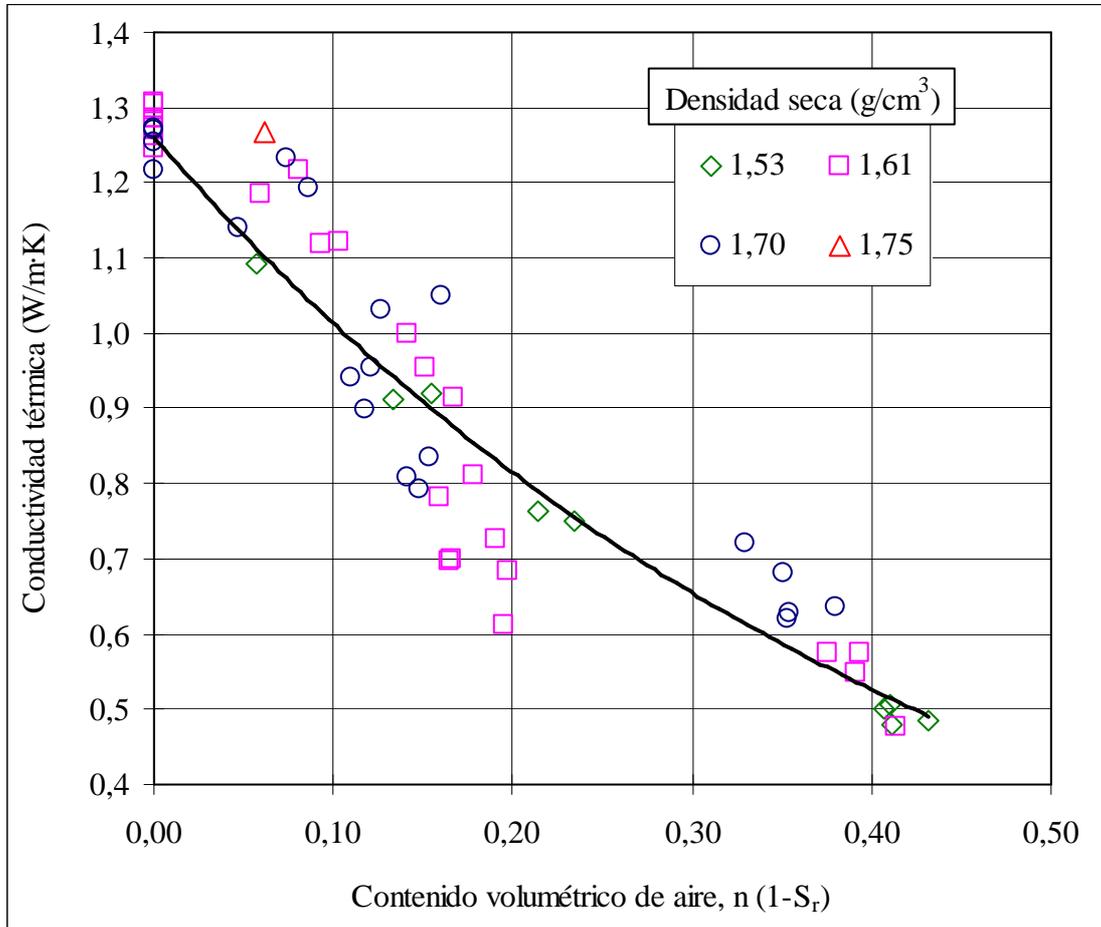


Figura 4: Relación entre la conductividad térmica de la bentonita compactada y el contenido volumétrico de aire

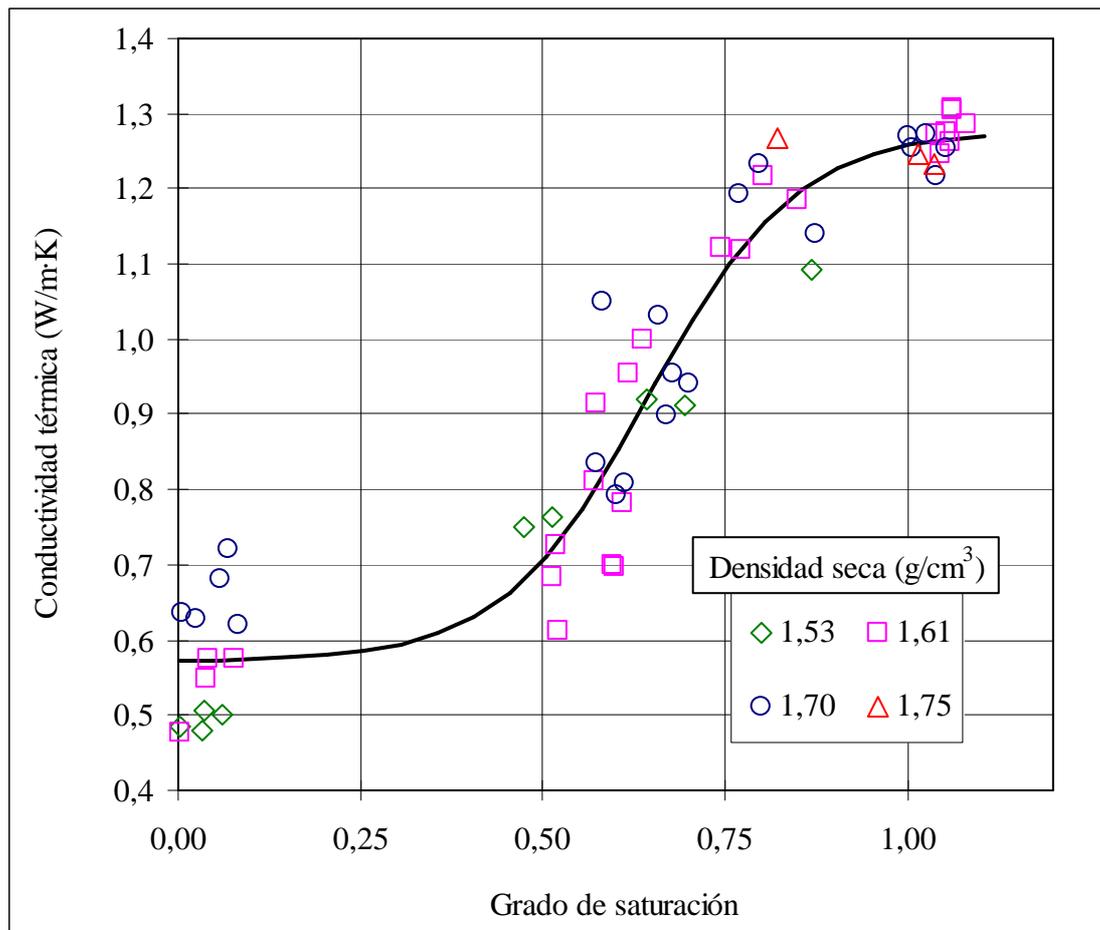


Figura 5: Relación entre la conductividad térmica de la bentonita compactada con distintas densidades secas y el grado de saturación

2.4. CALOR ESPECÍFICO

El calor específico ha sido determinado por CIEMAT mediante calorimetría diferencial de barrido. Para el calor específico las partículas sólidas (c_s , J/kg°C), en un intervalo de temperaturas entre 45 °C y 150 °C, se ha obtenido la siguiente dependencia de la temperatura (T , °C):

$$c_s = 1,38 T + 732,52 \quad [3]$$

2.5. RELACIÓN SUCCIÓN/HUMEDAD

2.5.1. Relación succión/humedad sin confinamiento

Se han realizado medidas de la humedad y de la densidad seca de la bentonita compactada a diversas densidades secas iniciales y sometida posteriormente a una succión. La succión se ha impuesto tanto mediante el control de la humedad relativa de la atmósfera donde se ha mantenido la muestra (rango de succiones entre 400 y 3 MPa) como mediante el uso de células de membrana (rango de succiones entre 2 y 0,1 MPa).

CIEMAT ha realizado ensayos sobre pastillas compactadas a densidad seca de 1,75 g/cm³ y sobre muestras talladas de bloques de bentonita en la dirección normal y paralela a la dirección de compactación (densidad seca inicial media de 1,67 g/cm³) (Tabla Anexo I- V a Tabla Anexo I- VIII). No se han observado diferencias de comportamiento entre muestras talladas en una u otra dirección, por lo que en lo sucesivo se tratarán conjuntamente. UPC ha realizado ensayos sobre muestras compactadas a una densidad inicial de 1,64 g/cm³ (Tabla Anexo II- I a Tabla Anexo II- III).

En la Figura 6 se muestran los resultados de los ensayos en términos de cambio de humedad. En la figura se incluyen los ensayos de humectación a partir de las condiciones higroscópicas tras la compactación (succión aproximada de unos 130 MPa) y los ensayos con trayectorias de humectación que incluyen un secado inicial hasta una succión cercana a los 400 MPa. El efecto de la histéresis por humectación tras ese secado es pequeño y tiende a disminuir a medida que lo hace la succión durante la trayectoria de humectación, por lo que se han agrupado los datos según la densidad inicial. De forma aproximada, puede establecerse una relación lineal entre los cambios del logaritmo de la succión (s, MPa) y de humedad (w, %), teniendo en cuenta la densidad seca inicial (ρ_{d0} , g/cm³):

$$w = (45,1 \rho_{d0} - 39,2) - (18,8 \rho_{d0} - 20,3) \log s \quad [4]$$

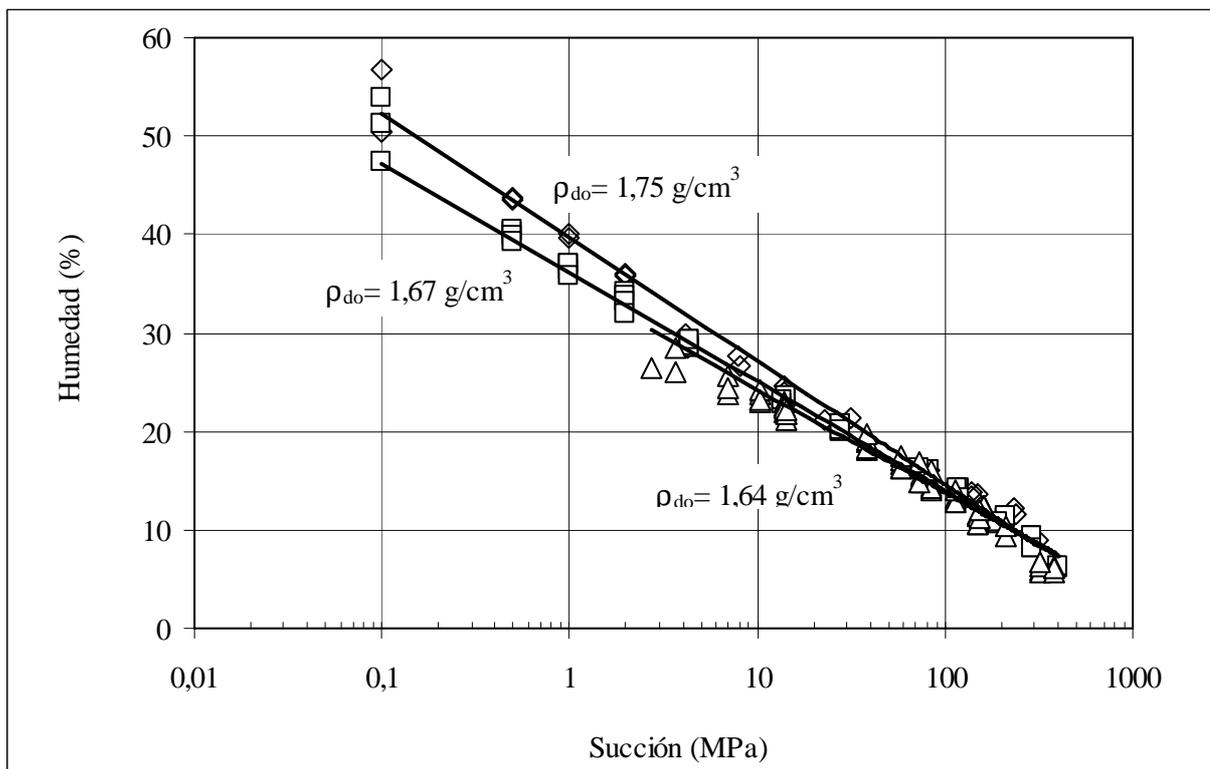


Figura 6: Relación succión/humedad en ensayos sin confinamiento

Los cambios de volumen observados al imponer las diversas succiones han sido importantes. En la Figura 7 se muestra la relación entre la densidad seca y el cambio de succión para las distintas muestras ensayadas. El efecto de la histéresis por secado inicial de las muestras hasta una succión de 400 MPa es prácticamente inobservable, y por tanto, se han agrupado los ensayos según la densidad inicial de las muestras con

independencia de que la trayectoria seguida en el ensayo haya sido sólo de humectación o de secado-humectación. Una aproximación aceptable para obtener la densidad seca en el rango de succión 400 y 0,1 MPa es la siguiente:

$$\rho_d = 1,15 s^{0,13} \rho_{do}^{-0,15} \quad [5]$$

donde ρ_{do} es la densidad seca inicial en g/cm^3 y s la succión en MPa.

Asimismo, en la Figura 8 se muestra el cambio de volumen en términos de índice de poros (e) en función de la succión. De esta figura pueden deducirse los siguientes parámetros:

$$\frac{-\Delta e}{\Delta \log_{10} s} = 0,388 ; \quad \frac{-\Delta e}{\Delta \ln s} = 0,168 \quad [6]; [7]$$

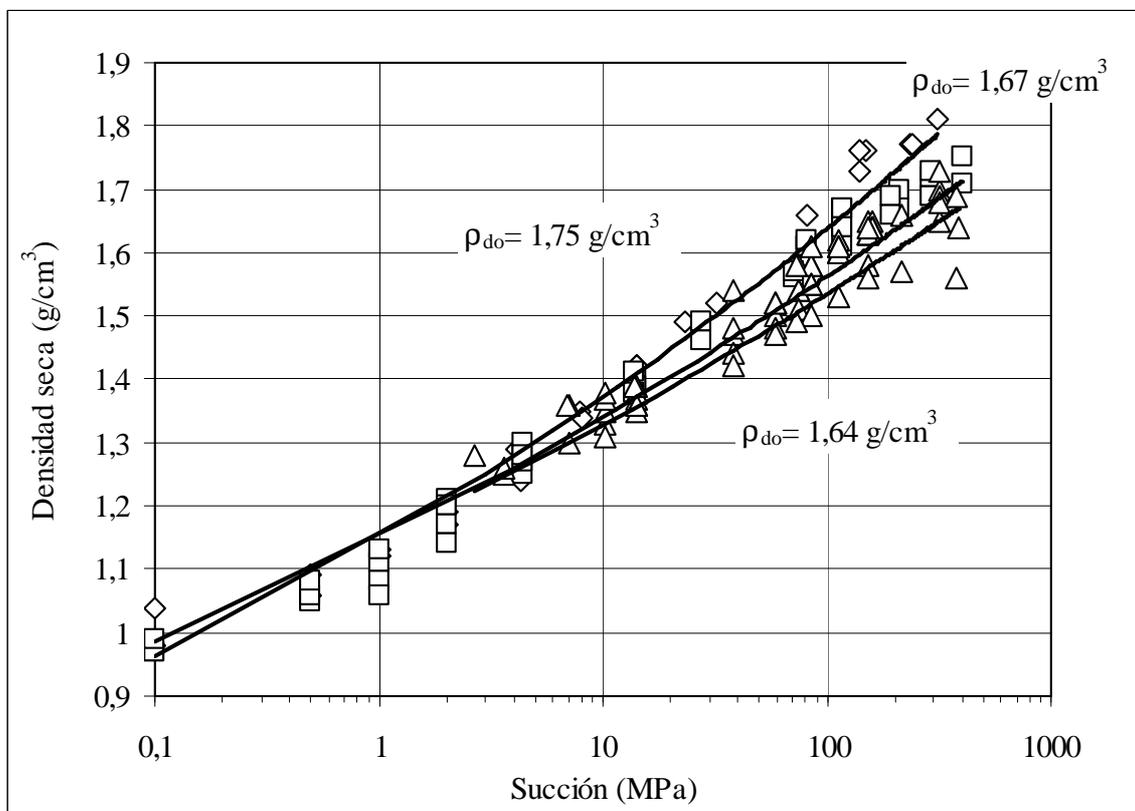


Figura 7: Relación entre la densidad seca y la succión en ensayos de disminución de succión sin confinamiento

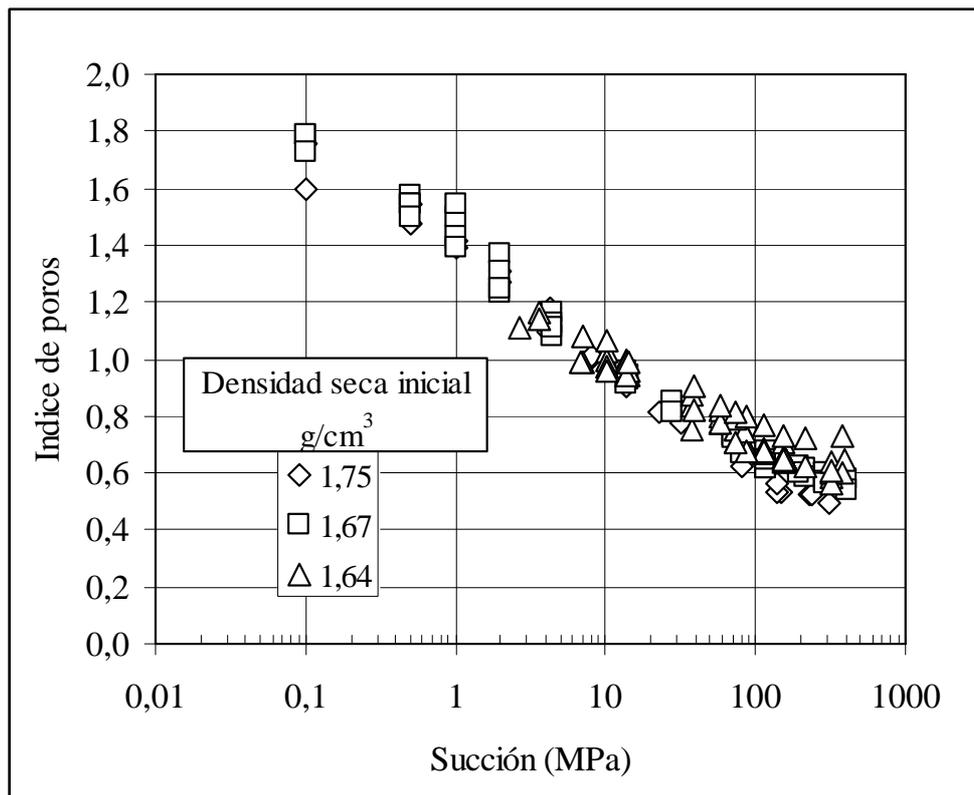


Figura 8: Cambio de índice de poros en los ensayos de disminución de succión sin confinamiento

La relación entre los incrementos de volumen de poros (volumen total, si se consideran las partículas sólidas indeformables) y de volumen de agua se muestra en la Figura 9. De esta figura se desprende que en trayectorias de humectación, y en el rango de succión entre 80 y 0,4 MPa, el aumento de volumen es del mismo orden e incluso supera al incremento de volumen de agua y por tanto en ese rango los cambios de saturación al cambiar la succión sin confinamiento serán muy pequeños. Para succiones mayores a 100 MPa el aumento de volumen es significativamente menor que para succiones inferiores, ya que se trata de trayectorias de humectación tras secado. Por último, para succiones inferiores a 4 MPa se observa una disminución notable de la relación entre los cambios de volumen de poros y de agua, lo que conduce a aumentos significativos del grado de saturación en este rango de succiones más bajas.

En la Figura 10 se muestra la relación entre la succión y el grado de saturación obtenida en los ensayos sin confinamiento. En la misma figura, se muestran curvas de nivel correspondientes a la densidad seca del suelo medida en cada ensayo. Puede observarse que los cambios en el grado de saturación son importantes para succiones mayores de 100 MPa y menores de 0,5 MPa, aproximadamente. Se pone de manifiesto el efecto de la histéresis en trayectorias de secado hasta 400 MPa, aunque este efecto desaparece para succiones inferiores a 3 MPa. El efecto de la densidad seca inicial es importante y se mantiene en todo el rango de las succiones empleadas.

Utilizando las expresiones obtenidas para los cambios de densidad seca (ρ_d) y de humedad (w) expuestas anteriormente, puede escribirse una expresión para el grado de

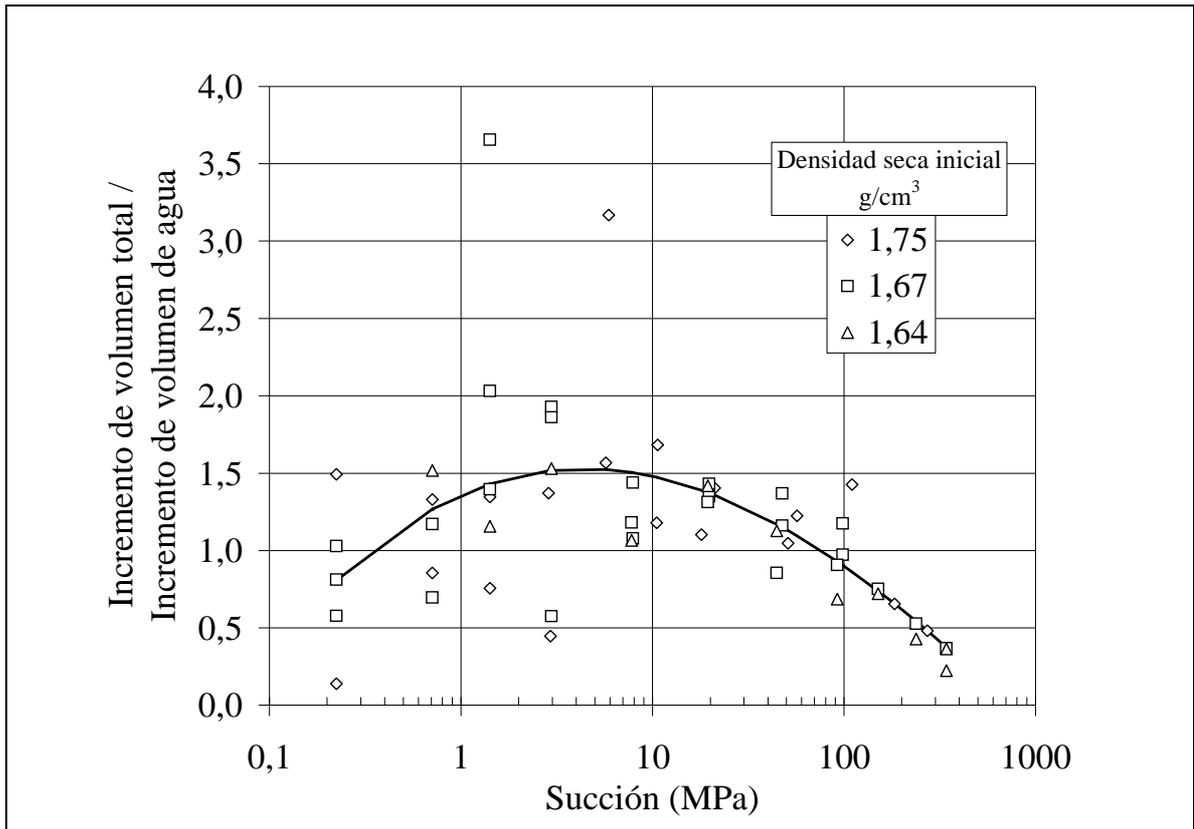


Figura 9: Relación entre los incrementos de volumen total y de agua en suelo en función de la succión en los ensayos de disminución de succión sin confinamiento

saturación, S_r , en función de la densidad seca inicial y de la succión (ρ_{d0}, s):

$$S_r = \frac{\rho_s \rho_d(\rho_{d0}, s) w(\rho_{d0}, s)}{\rho_w (\rho_s - \rho_d(\rho_{d0}, s))} \quad [8]$$

donde ρ_s y ρ_w son, respectivamente, las densidades de las partículas del suelo y del agua.

En la Figura 11 se muestran en línea continua las relaciones obtenidas empleando la expresión anterior. En la misma figura se incluye a trazos la relación entre la succión y el grado de saturación, supuesta en el caso de que el volumen del suelo permaneciera constante y la relación entre la succión y la humedad fuera la establecida anteriormente con deformación libre:

$$S_r = \frac{\rho_s \rho_{d0} w(\rho_{d0}, s)}{\rho_w (\rho_s - \rho_{d0})} \quad [9]$$

Puede observarse un ajuste relativamente bueno con los resultados de los ensayos en el caso de que se considere el cambio de densidad seca del suelo. Las relaciones obtenidas, en el supuesto de que el volumen del suelo permanezca constante, dan buenas aproximaciones sólo para succiones mayores de 100 MPa, donde los cambios de volumen son pequeños. Sin embargo, estas leyes pueden ser útiles como complemento a los ensayos realizados a volumen constante.

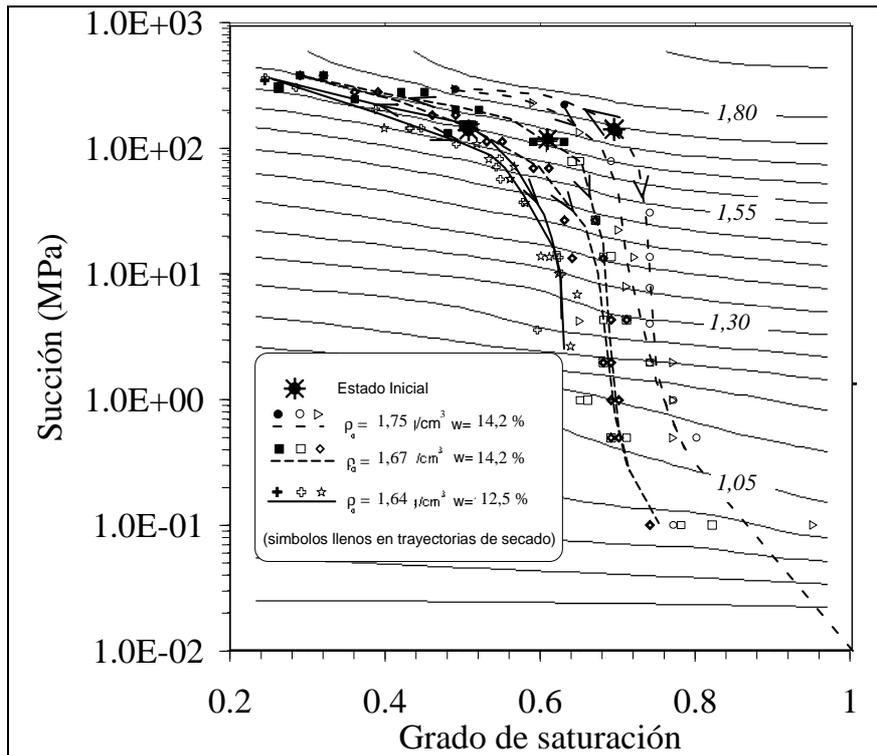


Figura 10: Relación succión/grado de saturación en ensayos sin confinamiento

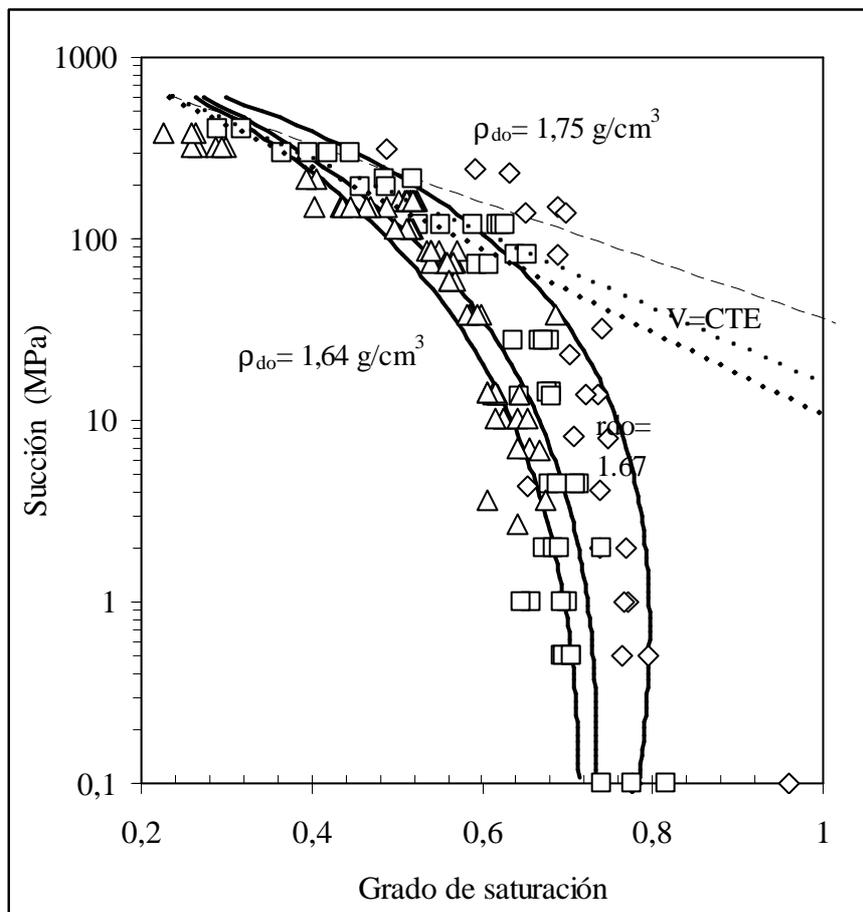


Figura 11: Relaciones ajustadas entre el grado de saturación y la succión considerando el volumen del suelo variable (trazo continuo) o constante (trazo discontinuo)

2.5.2. Relación succión/grado de saturación con confinamiento

En los ensayos sin confinamiento descritos en la sección anterior, la estructura y densidad seca de la bentonita sufren importantes cambios durante el proceso de hidratación. Sin embargo, los cambios de volumen en la barrera de bentonita son pequeños, por lo que el conocimiento de la relación succión/humedad a densidad constante es esencial.

Se han realizado dos tipos de ensayo para determinar la curva de retención de la arcilla con el mínimo cambio de volumen posible. En el primer tipo de ensayo, realizado en CIEMAT, se ha cambiado la succión en un rango de 0 a 275 MPa en condiciones edométricas utilizando edómetros con succión controlada (Tabla Anexo I- IX a Tabla Anexo I- XIII). En el segundo tipo de ensayo, realizado en la UPC, se ha mantenido la muestra de arcilla confinada en una cápsula de metal sinterizado que permite el intercambio de agua en forma de vapor entre la muestra y la atmósfera que la rodea (Tabla Anexo II- IV). En ambos casos, durante los ensayos han existido pequeños cambios de volumen debido a la alta capacidad expansiva de la bentonita. Además, en las trayectorias de secado, no es posible controlar el cambio de volumen de la muestra.

En la Figura 12 se muestran los valores de la humedad medidos para las diferentes succiones impuestas en trayectorias de humectación. En la misma figura se incluyen las líneas de tendencia derivadas de los ensayos sin confinamiento. En la Figura 13 se muestran las humedades obtenidas en los edómetros en trayectorias de humectación y secado.

En la Figura 14 se muestran la curva de retención en trayectorias de humectación para densidades secas de 1,59 g/cm³ y en el rango de 1,75 a 1,70 y de 1,65 a 1,60 g/cm³. En el mismo gráfico se ha incluido las líneas de tendencia derivadas de los ensayos realizados sin confinamiento. Hasta valores del grado de saturación de entre 0,70 y 0,85, dependiendo de la densidad seca, estas líneas se ajustan relativamente bien a los resultados de los ensayos con confinamiento.

Las curvas de retención se pueden ajustar utilizando la expresión de van Genuchten (1980):

$$\frac{S_r - S_{r_0}}{S_{r_{\max}} - S_{r_0}} = \left[1 + \left(\frac{s}{P_0} \right)^{\frac{1}{1-\lambda}} \right]^{-\lambda} \quad [10]$$

Sin embargo, en algunos casos esta expresión conduce a succiones demasiado altas para los grados de saturación menores de 0,4. Para obtener mejores ajustes en ese rango de succiones se puede utilizar la siguiente modificación de la ecuación anterior:

$$\frac{S_r - S_{r_0}}{S_{r_{\max}} - S_{r_0}} = \left[1 + \left(\frac{s}{P_0} \right)^{\frac{1}{1-\lambda}} \right]^{-\lambda} \left[1 - \frac{s}{P_s} \right]^{\lambda_s} \quad [11]$$

donde S_{r_0} y $S_{r_{\max}}$ son los grados de saturación residual y máximo, s la succión (MPa) y P_0 (MPa), P_s , λ y λ_s son parámetros del modelo que dependen del material.

Si se toma para el parámetro P_s un valor muy elevado, o cero para el parámetro λ_s , se obtiene la expresión clásica de van Genuchten. Para el ajuste se ha considerado que la muestra tiene un grado de saturación unidad cuando el valor calculado del grado de saturación, ha resultado ser mayor que la unidad. En la Tabla V se indican los valores de los parámetros que conducen a los ajustes de las curvas de retención para trayectorias de humectación que se muestran en la Figura 15. Se pueden conseguir aproximaciones del mismo orden a los valores medidos en los ensayos con parámetros algo diferentes, por lo que los valores indicados en dicha tabla no deben tomarse como exclusivos.

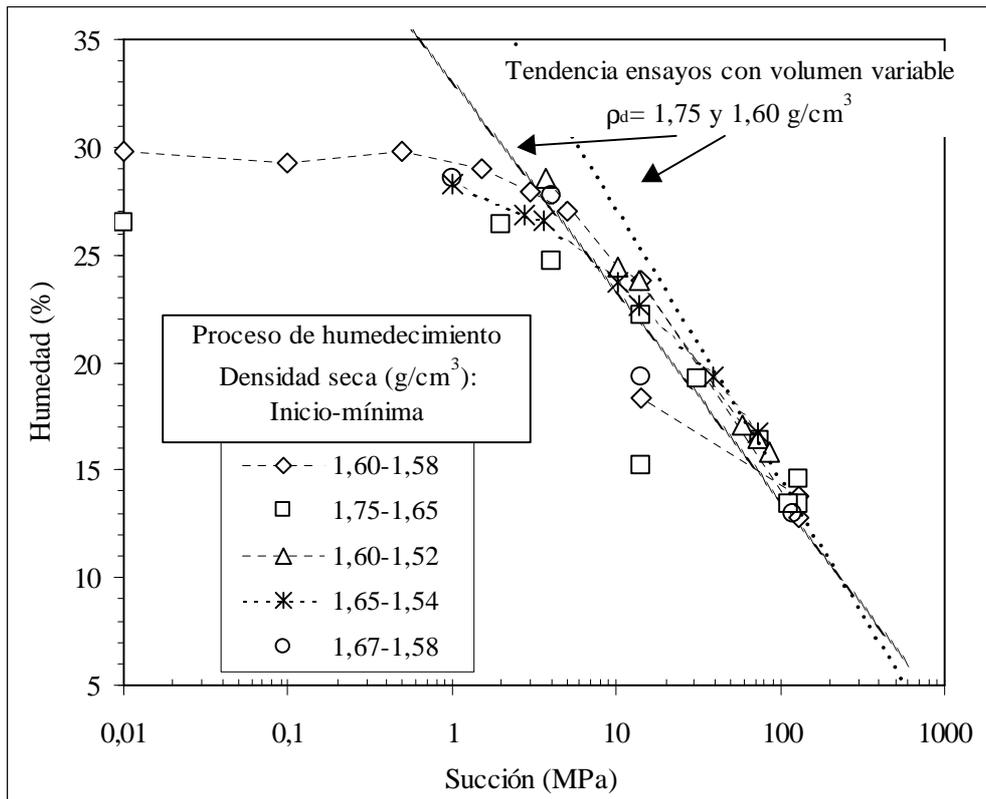


Figura 12: Relación entre succión y humedad en trayectorias de humectación con confinamiento

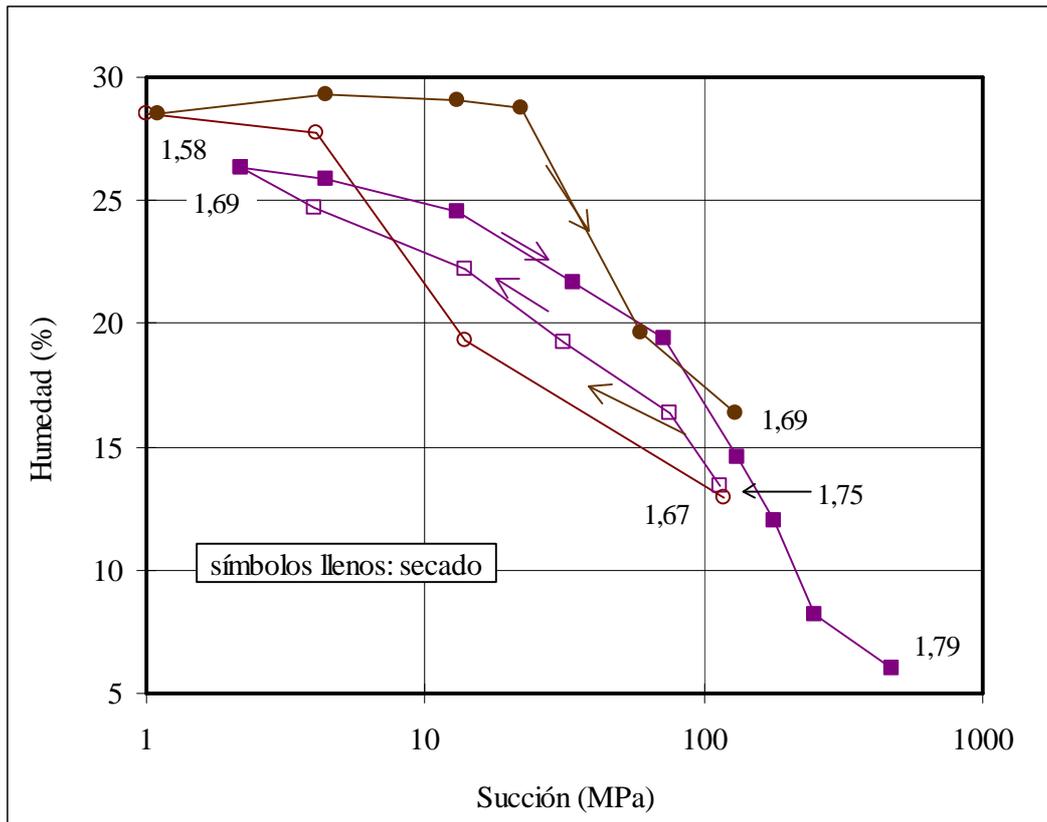


Figura 13: Relación entre succión y humedad en trayectorias de humectación/secado con confinamiento (las densidades secas correspondientes a los extremos de cada trayectoria se indican en g/cm³)

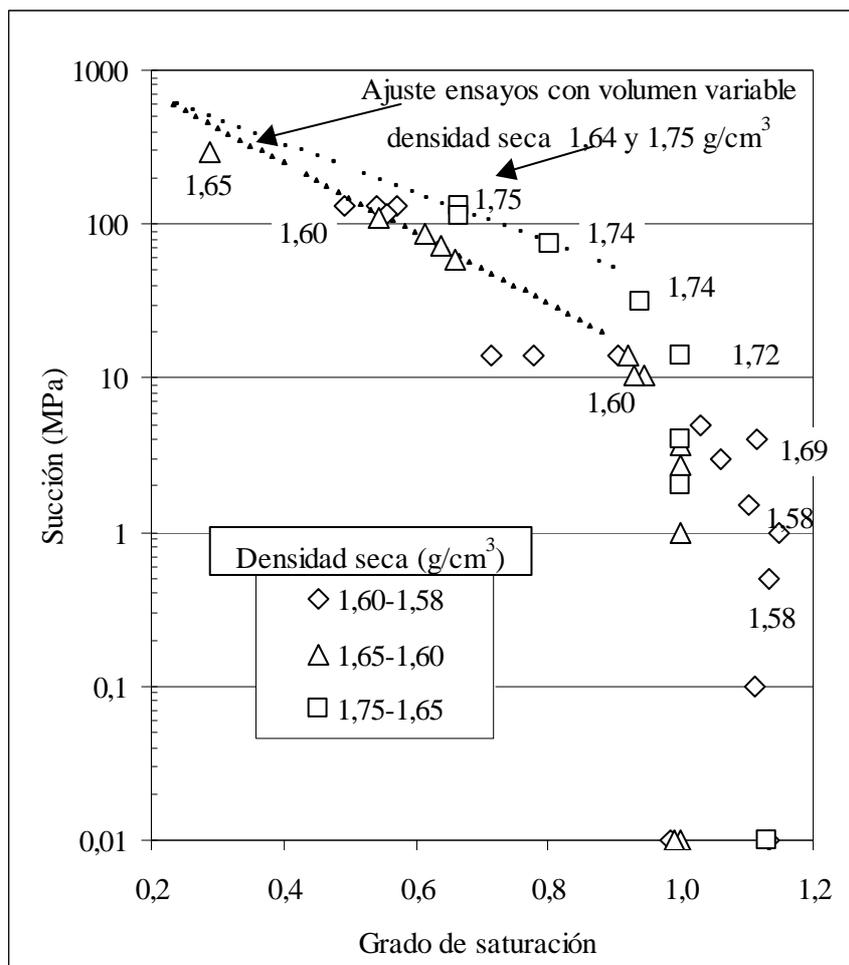


Figura 14: Curvas de retención en trayectorias de humectación con confinamiento (entre paréntesis se indica la densidad seca medida en la muestra ensayada)

Tabla V: Parámetros de ajuste a las curvas de retención en trayectorias de humectación

Intervalo de densidad seca (g/cm^3)	Tipo de ecuación (n° en Figura 15)	P_0 (MPa)	λ	S_{r0}	S_{rmax}	P_s (MPa)	λ_s
1,65-1,75	van Genuchten (1)	90	0,45	0,00	1,00	-	-
1,65-1,75	van Genuchten modificado (2)	100	0,45	0,01	1,00	1500	0,05
1,60-1,65	van Genuchten (3)	30	0,32	0,10	1,00	-	-
1,60-1,65	van Genuchten modificado (4)	35	0,30	0,01	1,00	4000	1,50
1,58-1,60	van Genuchten (5)	5	0,17	0,00	1,00	-	-
1,58-1,60	van Genuchten modificado (6)	2	0,10	0,01	0,99	1000	1,30

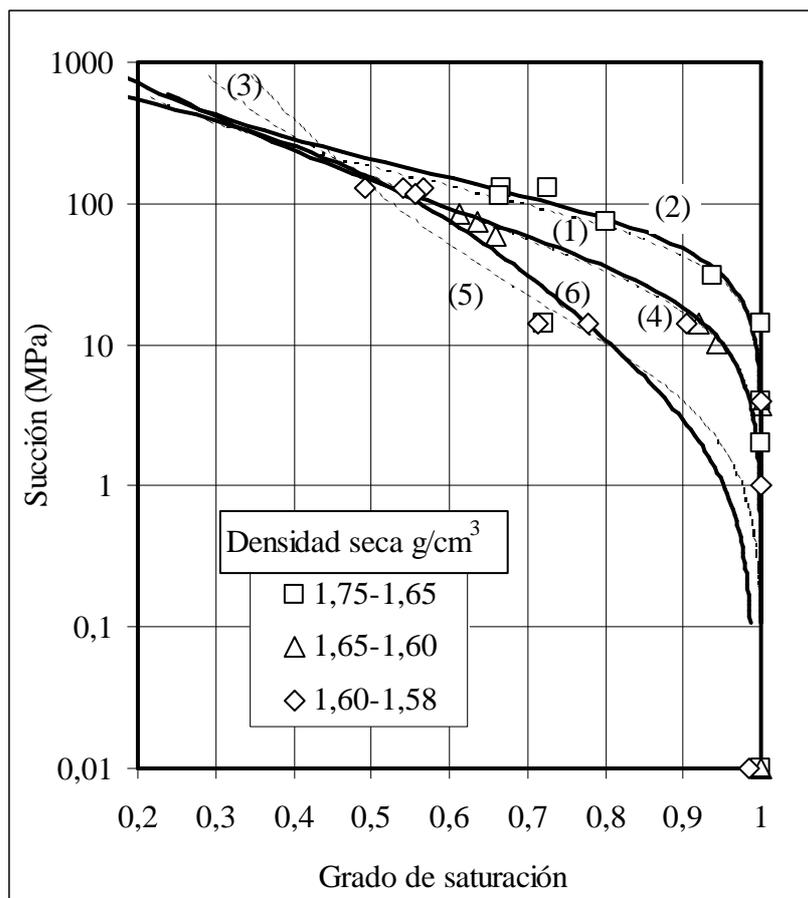


Figura 15: Curvas de retención medidas y ajustadas en trayectorias de humectación con confinamiento. Entre paréntesis se indica el número de ecuación utilizado en la Tabla V

2.5.3. Efecto de la histéresis

En los ensayos con deformación libre, en las trayectorias de humectación tras secado hasta una succión de 400 MPa, se ha observado un comportamiento análogo al de las trayectorias de humectación sin secado previo. Las diferencias han sido pequeñas y se concentran en un rango de succiones entre 10 y 200 MPa, fuera de este rango el efecto del secado previo no es observable (Figura 10).

En las trayectorias de secado tras humectación, el efecto de la histéresis se manifiesta con mayor intensidad si el secado se realiza tras una reducción importante de la succión. En la Figura 16 se muestran los resultados de ensayos de imposición de succión siguiendo diversas trayectorias en condiciones de deformación libre y succiones siempre por encima de 3 MPa. Puede observarse que, para una misma succión, la humedad en un proceso de secado tras humectación es ligeramente superior (en un dos por ciento en media) a la obtenida en el proceso de humectación. En términos de grado de saturación, este efecto no es prácticamente observable.

Sin embargo, en muestras en las que se ha llegado a la saturación en condiciones de confinamiento, al secar puede observarse un importante aumento de la presión de entrada de aire que pasa a ser del orden de 10 MPa para densidades secas de 1,60 g/cm³ y del orden de 80 MPa para densidades secas de 1,75 g/cm³. En la Figura 17 se muestra claramente el efecto de la histéresis en las muestras que han llegado a saturación. En la

Tabla VI se recogen los parámetros utilizados en las curvas de ajuste mostradas en la Figura 17.

Tabla VI: Parámetros de ajuste a las curvas de retención en trayectorias de humectación y secado tras saturación

Intervalo de densidad seca (g/cm³)	Tipo de ecuación (nº en Figura 17)	P_0 (MPa)	λ	S_{r0}	S_{rmax}	P_s (MPa)	λ_s
1,75-1,65 humectación	van Genuchten modificado (1)	100	0,45	0,01	1,00	1500	0,05
1,75-1,65 secado	van Genuchten (2)	180	0,62	0,0	1,00	-	-
1,60-1,58 humectación	van Genuchten modificado (3)	2	0,10	0,01	0,99	1000	1,30
1,60-1,58 secado	van Genuchten (4)	30	0,15	0,0	1,00	-	-

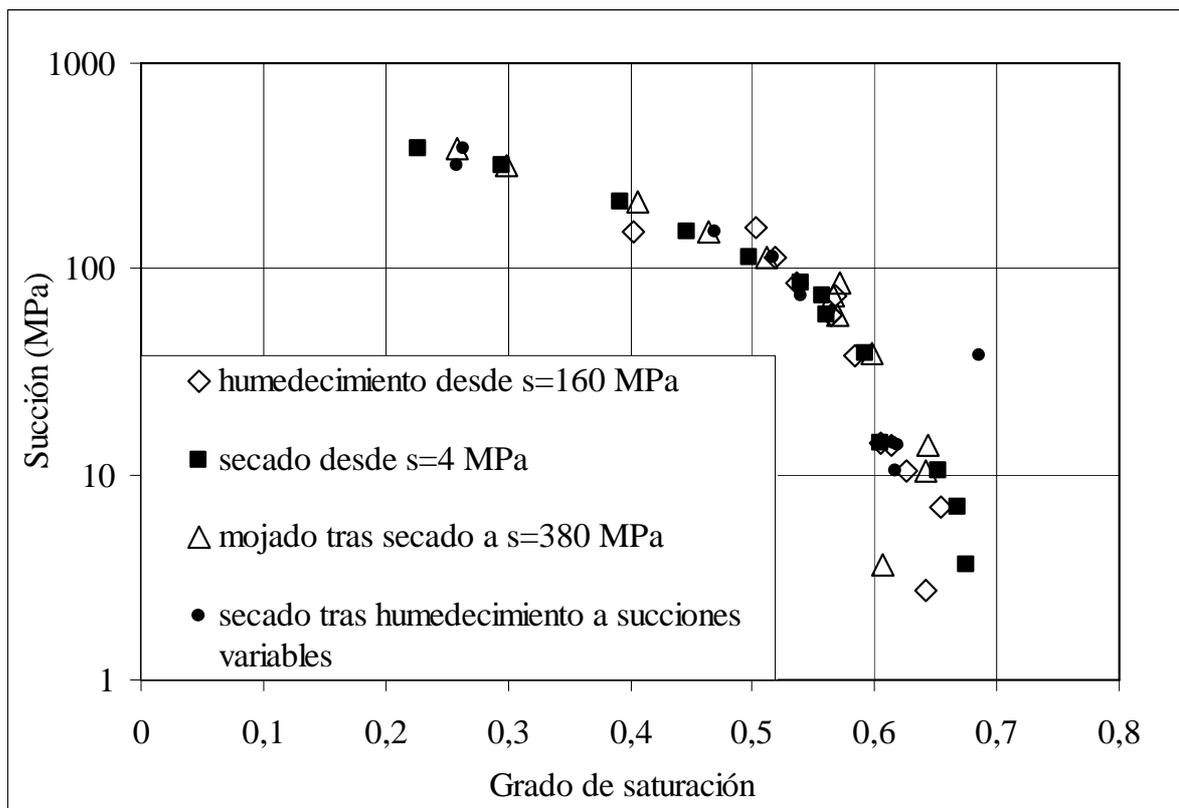
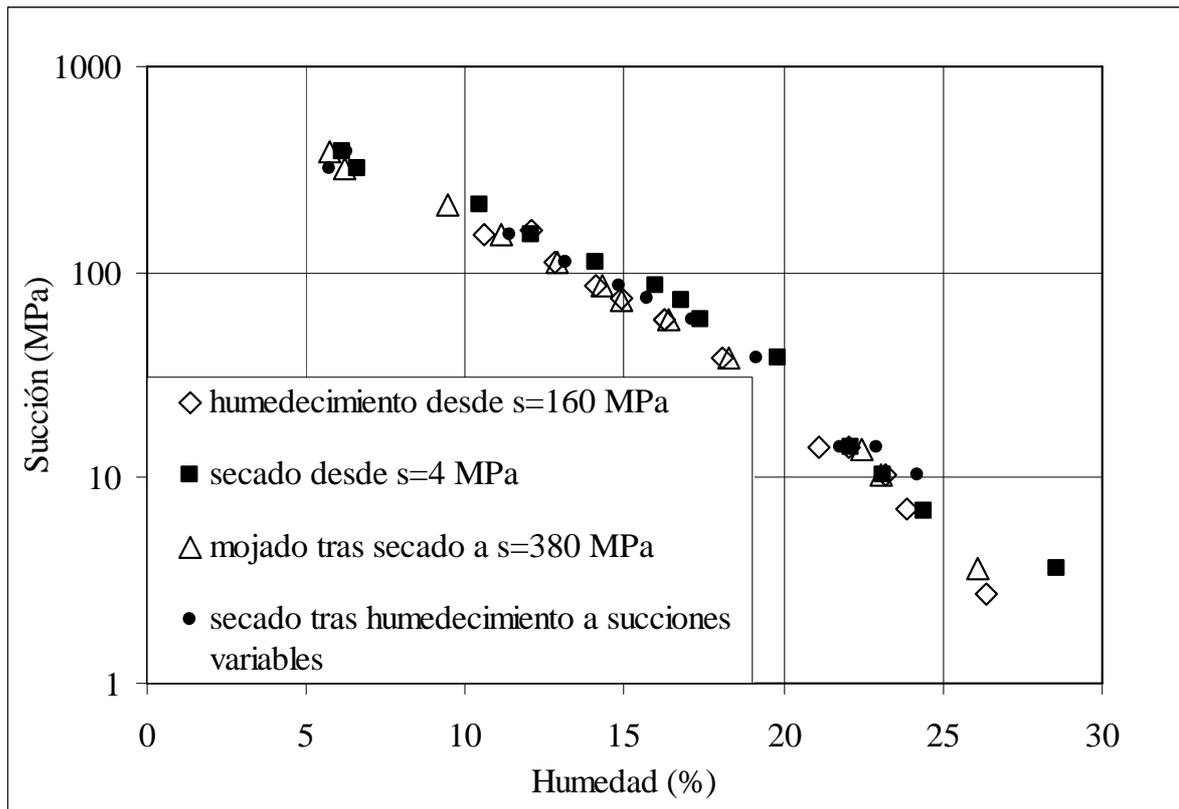


Figura 16: Relaciones succión humedad y grado de saturación en trayectorias de secado/humectación y humectación/secado. Deformación libre

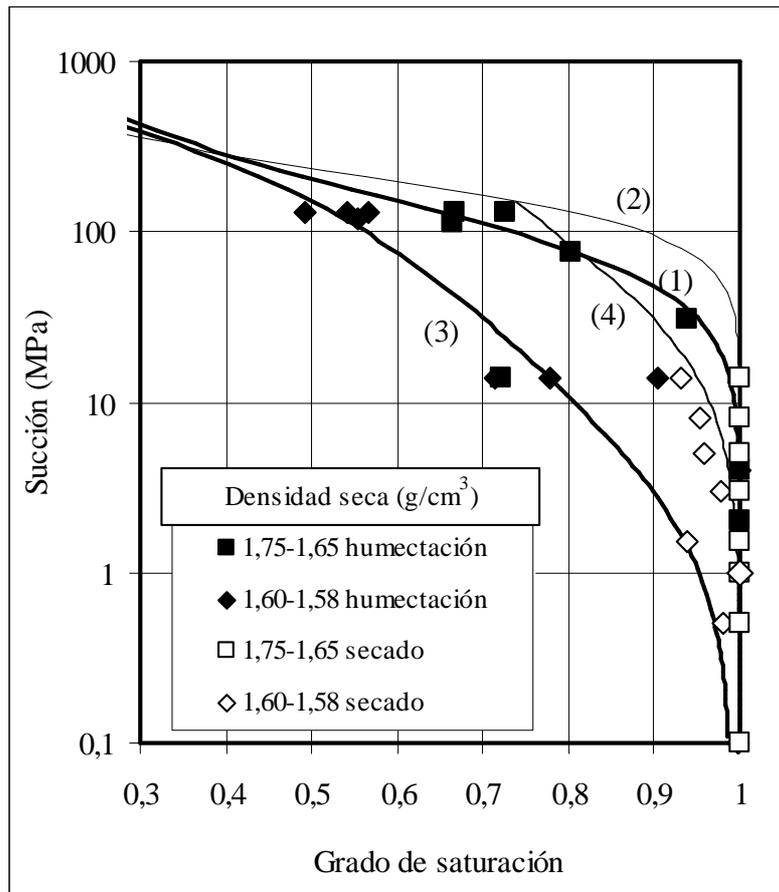


Figura 17: Efecto de la histéresis en trayectorias de humectación/secado en condiciones confinadas. Los números entre paréntesis corresponden a las curvas cuyos parámetros se indican en la Tabla VI

2.5.4. Efecto de la temperatura

En la campaña de ensayos de caracterización durante la fase preoperacional UPC realizó ensayos de imposición de succión a diversas temperaturas (Tabla Anexo II- V). Los ensayos se ejecutaron situando recipientes herméticos donde se imponía la succión en el interior de estufas con temperatura controlada. Durante el ensayo no existía confinamiento sobre la muestra y por tanto la deformación de la misma es libre. El cambio de volumen no se pudo medir dado que las pequeñas dimensiones de las muestras facilitaban la alteración de las muestras durante su manipulación.

El efecto de la temperatura en la relación succión- humedad para succiones superiores a 100 MPa ha sido muy pequeño. Para succiones inferiores, se observan pequeñas diferencias en las humedades correspondientes a una misma succión a diferentes temperaturas. En la Figura 18 se muestra las relaciones entre la succión y la humedad para muestras sometidas a imposición de succión sucesivamente a temperatura ambiente, a una temperatura de 72 °C y finalmente a una temperatura de 27 °C.

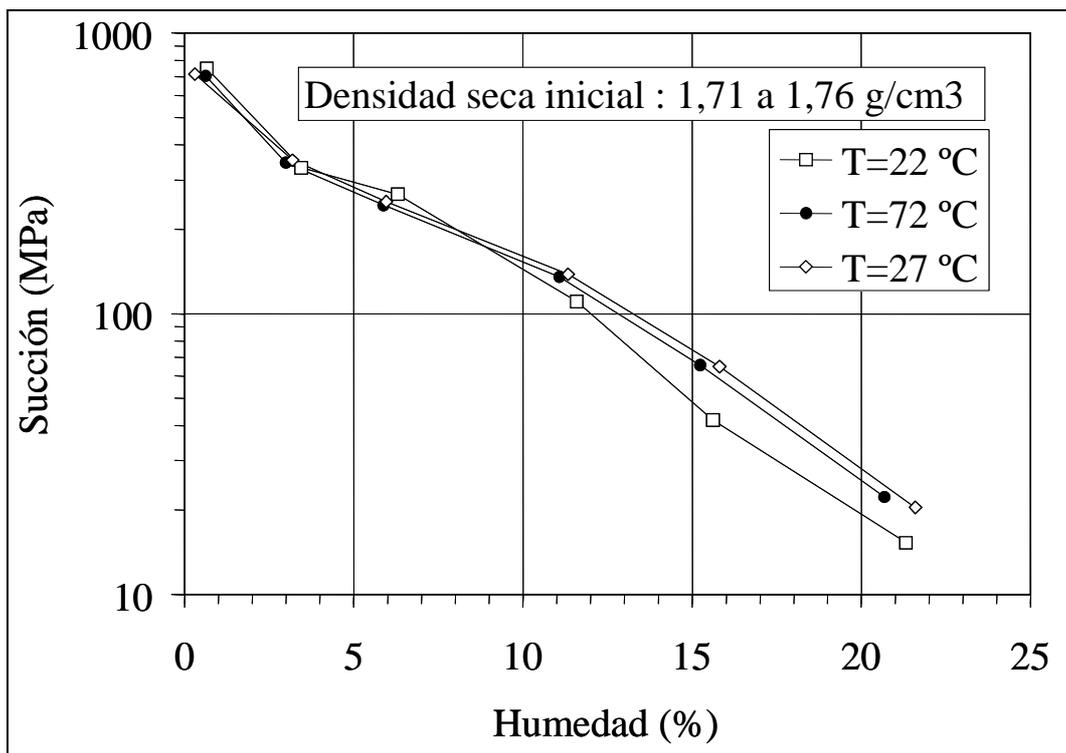
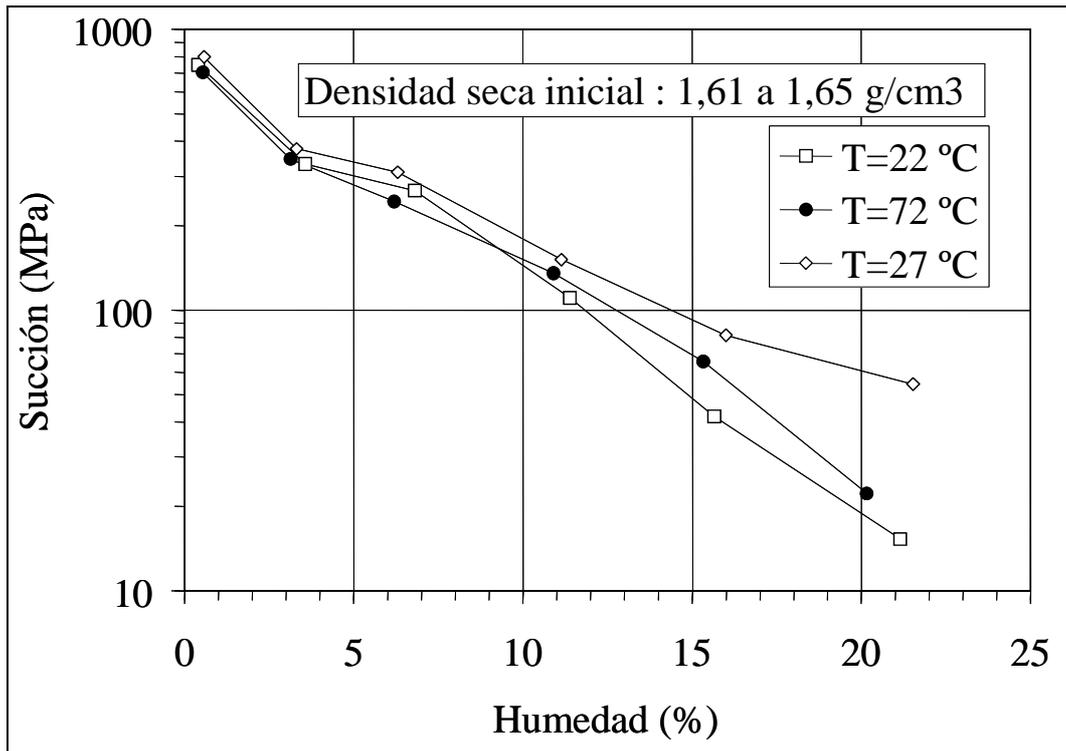


Figura 18: Relación entre succión y humedad para diferentes temperaturas y densidades

El efecto del calentamiento a 72 °C se manifiesta como un aumento de la cantidad de agua existente en el suelo para una succión dada. Este incremento puede explicarse por el aumento de volumen de poros derivado de la dilatación térmica del suelo que incluye una parte irreversible y otra de menor cuantía de tipo reversible. El efecto de la temperatura en la tensión superficial conduce a succiones menores (para una misma humedad) en el caso del calentamiento del suelo. Por tanto, puede deducirse que en este

primer calentamiento el efecto del cambio de volumen predomina sobre el efecto del cambio de tensión superficial. La posterior disminución de temperatura se traduce en un incremento adicional de la humedad del suelo para 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.

La cuantificación del efecto de la temperatura en la relación succión/grado de saturación hace necesaria la realización de nuevos ensayos en los que se controlen los cambios de volumen del suelo durante el ensayo.

2.6. PERMEABILIDAD SATURADA AL AGUA

En CIEMAT se han realizado un elevado número de ensayos de medida directa de la permeabilidad saturada de la bentonita compactada a diferentes densidades secas (Tabla Anexo I- XIV a Tabla Anexo I- XVIII). Se ha investigado el efecto de diversos aspectos que en principio podían afectar al valor de la permeabilidad. En la Figura 19 se han recogido los resultados de todos los ensayos realizados. Puede observarse que la permeabilidad tiene importantes variaciones con la densidad seca de la muestra utilizada, sin embargo otros aspectos estudiados tienen una influencia prácticamente nula. Así, no es posible distinguir el efecto de medir la permeabilidad sobre probetas compactadas con bentonita procedente de diversas muestras o usar probetas con bentonita procedente de la mezcla de diversas muestras. Tampoco es posible distinguir el efecto de ensayar muestras compactadas utilizando como molde el propio permeámetro o ensayar muestras talladas a partir de bloques. En este último caso, la dirección del flujo respecto a la dirección de la compactación tampoco se ha mostrado relevante. Por último, el uso de agua granítica o destilada tampoco tiene efectos relevantes en la permeabilidad. Sin embargo, el uso de agua salina conduce a valores de la permeabilidad que, pese a la dispersión que se puede observar en la Figura 19, pueden considerarse como más elevados que los que se obtienen con agua destilada.

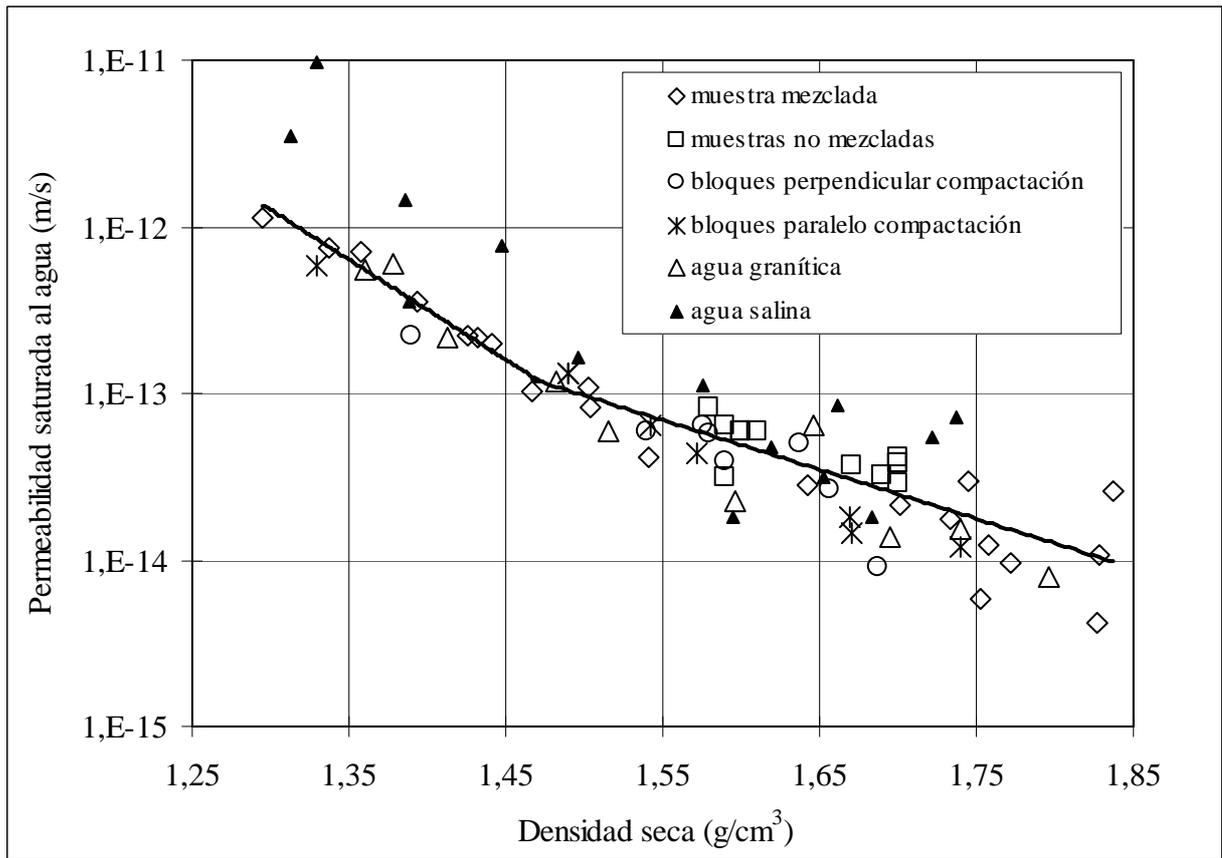


Figura 19: Relación entre la permeabilidad saturada al agua y la densidad seca de la bentonita, a partir de diversos tipos de muestras de bentonita y composición del agua

A partir de los resultados mostrados en la Figura 19 pueden establecerse las siguientes relaciones entre la densidad seca (en g/cm^3) y la permeabilidad al agua destilada (en m/s):

$$\log k_w = -6,00 \rho_d - 4,09 \quad \text{si } \rho_d < 1,47 \text{ g/cm}^3 \quad [12]$$

$$\log k_w = -2,96 \rho_d - 8,57 \quad \text{si } \rho_d > 1,47 \text{ g/cm}^3 \quad [13]$$

En la Figura 20 se muestra el efecto del índice de poros, e , en el valor de la permeabilidad al agua destilada (k_w en m/s). Este efecto puede cuantificarse como:

$$\log k_w = 4,21 e - 16,41 \quad \text{para } 0,5 < e < 0,8 \quad [14]$$

$$\log k_w = 2,96 e - 15,36 \quad \text{para } 0,8 < e < 1,1 \quad [15]$$

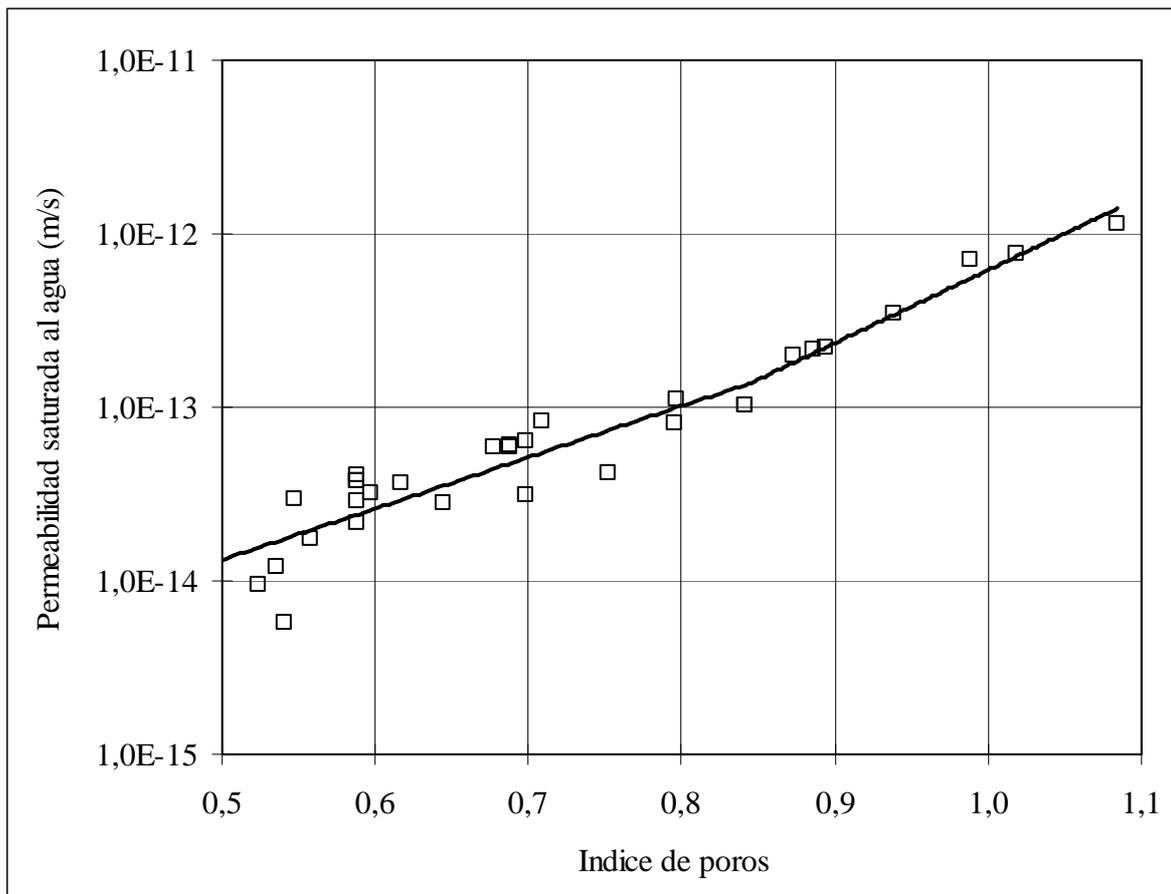


Figura 20: Variación de la permeabilidad saturada de la bentonita compactada con diferentes índices de poros

En la Figura 21 se muestran los valores de la permeabilidad intrínseca (k_{iw} , m^2) obtenidos a partir de los ensayos de permeabilidad al agua destilada en función de la porosidad (n) del suelo. En dicha figura se ha representado la predicción del modelo de Kozeny para todo el intervalo de porosidad. Puede observarse cómo la variación de la permeabilidad con el volumen de poros resulta ser mayor que la que predice el modelo de Kozeny para arenas. Las líneas indicadas en la Figura 21 pueden escribirse como:

Ley exponencial para el intervalo de porosidades entre 0,46 y 0,52:

$$k_{iw} = 5,08 \cdot 10^{-28} e^{37,33 n} \quad [16]$$

Ley exponencial para el intervalo de porosidades entre 0,46 y 0,32:

$$k_{iw} = 2,79 \cdot 10^{-24} e^{18,39 n} \quad [17]$$

Modelo de Kozeny para el intervalo de porosidades entre 0,52 y 0,32:

$$k_{iw} = 7,72 \cdot 10^{-21} \frac{(1 - 0,420)^2}{0,420^3} \frac{n^3}{(1 - n)^2} \quad (\text{modelo de Kozeny}) \quad [18]$$

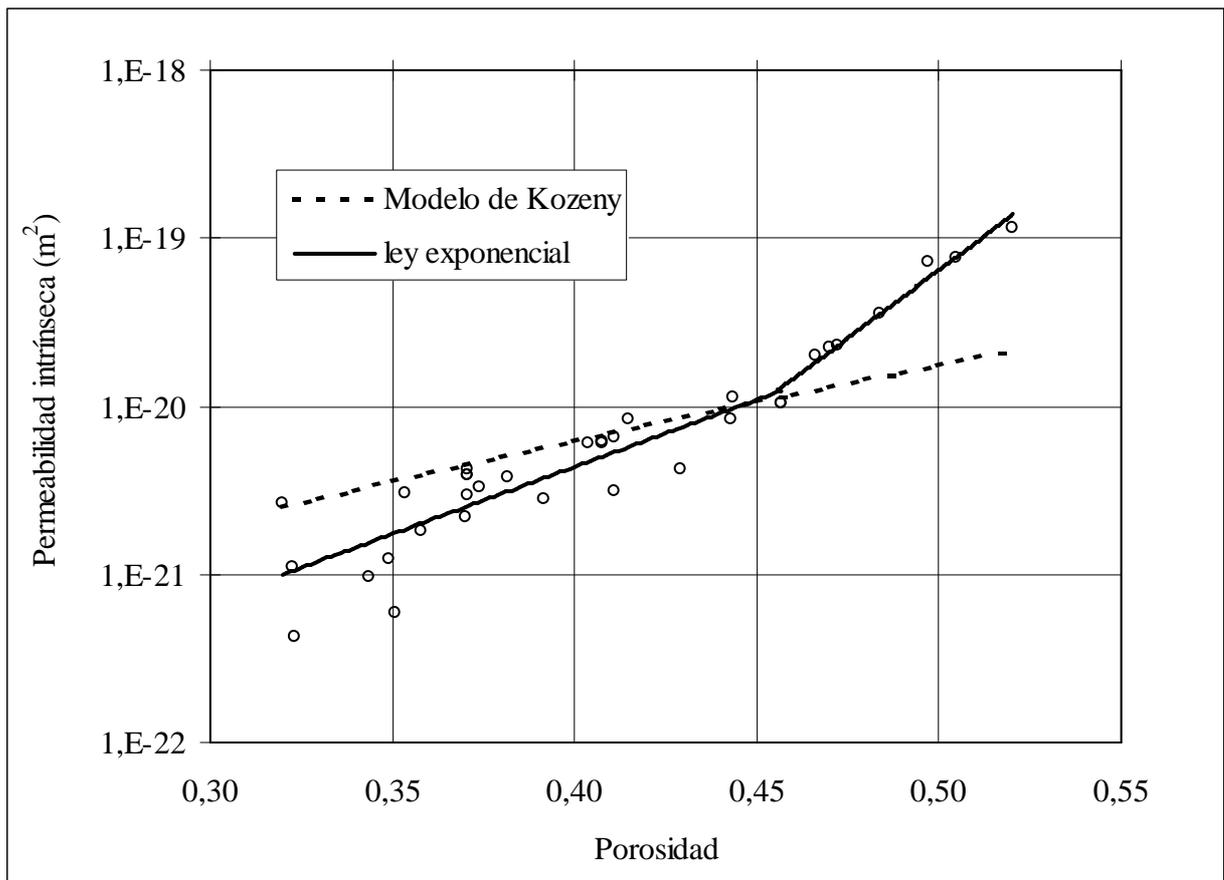


Figura 21: Variación de la permeabilidad intrínseca de la bentonita con diferentes porosidades

2.7. PERMEABILIDAD AL GAS

En CIEMAT se ha medido la permeabilidad al gas en muestras de bentonita compactada a densidades secas comprendidas entre 1,5 y 1,7 g/cm³, utilizando gas nitrógeno inyectado a baja presión (Tabla Anexo I- XIX a Tabla Anexo I- XXII). La humedad de la arcilla ha sido relativamente baja (entre el 7 % y el 24 %) ya que la permeabilidad al gas se hace prácticamente nula para grados de saturación altos. En la Figura 22 se muestra la variación de la permeabilidad al gas (k_g) en función del volumen de poros disponible para el paso del gas, representado como el producto del índice de poros por la unidad menos el grado de saturación.

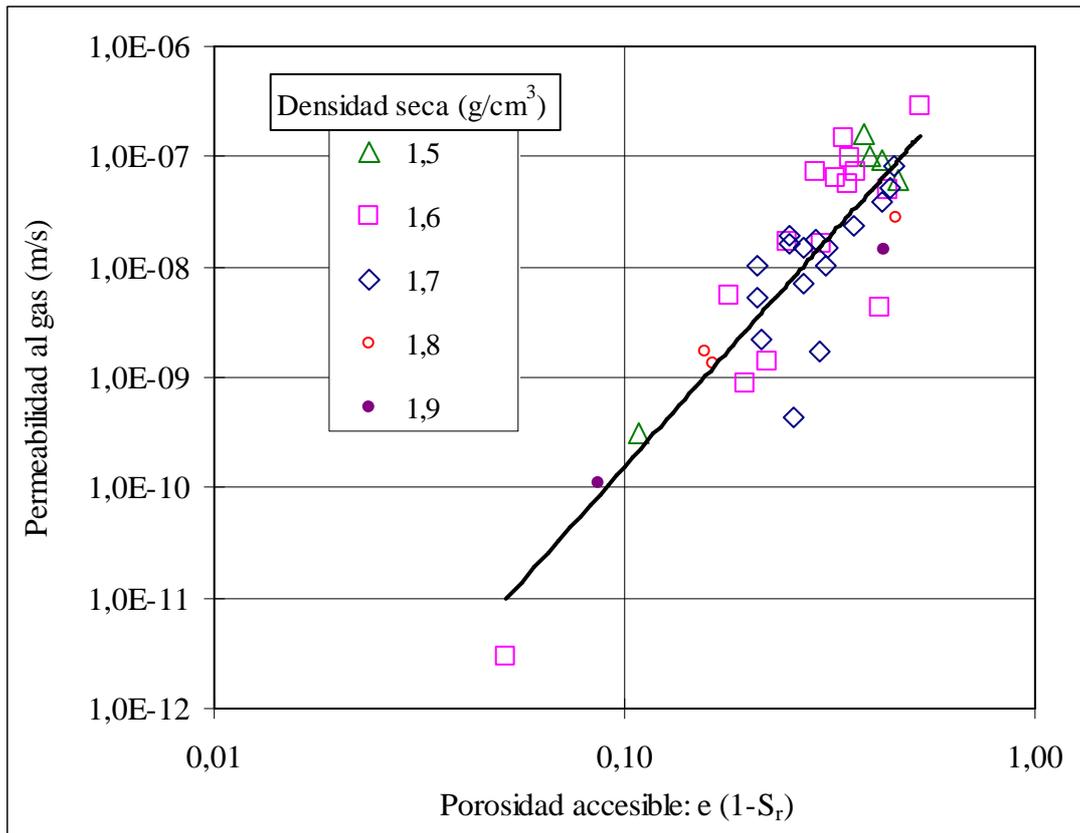


Figura 22: Relación entre la permeabilidad al gas y el volumen de poros accesible al gas

De la Figura 22 puede desprenderse la siguiente regresión entre la permeabilidad (k_g , m/s), el grado de saturación (S_r) y el índice de poros (e), para grados de saturación entre 0,25 y 0,80:

$$k_g = 2,29 \cdot 10^{-6} (e (1-S_r))^{4,17} \quad [19]$$

El exponente 4,17 es parecido al obtenido para la permeabilidad relativa al agua (del orden de tres). Por otra parte, si se utiliza la regresión mencionada con un grado de saturación nulo, y teniendo en cuenta que la densidad del nitrógeno es $1,12 \text{ kg/m}^3$ y su viscosidad $1,78 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$, la permeabilidad intrínseca de la bentonita (k_{ig} , m^2) a partir de la medida de la permeabilidad al gas (k_g , m/s) sería:

$$k_{ig} = 1,62 \cdot 10^{-6} k_g = 3,72 \cdot 10^{-12} e^{4,17} \quad [20]$$

Para una densidad seca de $1,65 \text{ g/cm}^3$ ($e=0,636$) resulta una permeabilidad intrínseca de $5,65 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$, muy por encima de la obtenida a partir de la medida de la permeabilidad al agua en condiciones saturadas (del orden de 10^{-21} m^2). En la Figura 23 se puede comparar el valor de la permeabilidad intrínseca deducida de la expresión anterior con las medidas de la permeabilidad obtenidas a partir del flujo de agua.

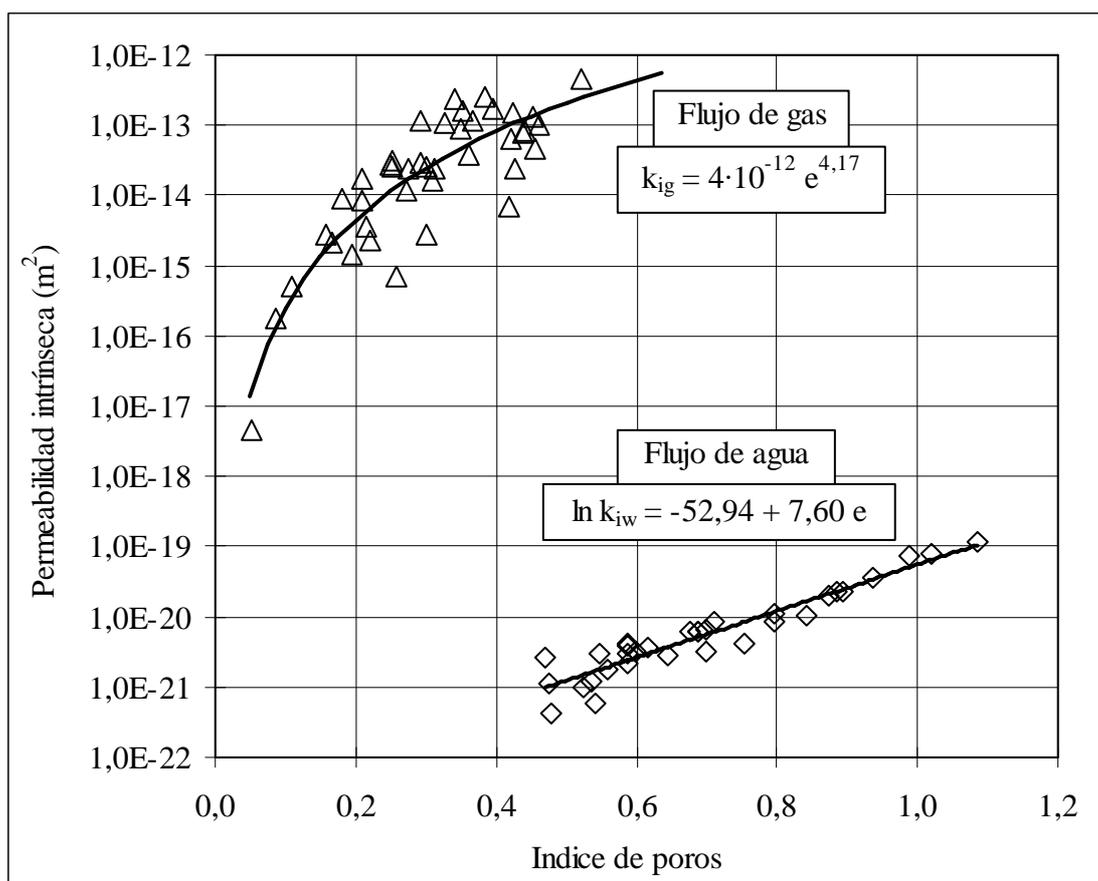


Figura 23: Permeabilidad intrínseca de la bentonita calculada a través de flujo de agua en condiciones saturadas y de flujo de gas con grados de saturación bajos

La diferencia de valores entre la permeabilidad intrínseca obtenida a partir de medidas de flujo de gas o de agua es consecuencia del cambio en la estructura de la bentonita según su grado de saturación. En los ensayos con flujo de agua en condiciones saturadas, la bentonita está hidratada y ocupa en gran medida los poros entre agregados. En estas condiciones, el tamaño medio de los poros está cerca del tamaño de los poros del interior de los agregados (aproximadamente $0,01 \mu\text{m}$). Por otra parte, en los ensayos de flujo de gas con grados de saturación bajos, el tamaño medio de los poros es mucho mayor, aunque el volumen total de los mismos, medido a través del índice de poros, sea del mismo orden que en los ensayos con agua. En este caso, el tamaño de los poros corresponde al tamaño de poros entre agregados, cuyo diámetro es mayor de $1 \mu\text{m}$. Asumiendo que para una misma porosidad, la permeabilidad depende del cuadrado del diámetro de los poros por los que circula el fluido, la diferencia en el tamaño de los poros puede explicar las divergencias en la permeabilidad intrínseca según se derive de las medidas de flujo de gas o de agua.

2.8. MÓDULO ELÁSTICO

Mediante el empleo de un equipo de columna resonante, en la UPC se ha medido el módulo elástico de corte (G) sobre muestras compactadas con diversas densidades secas y humedades (Tabla Anexo II- VI). En la Figura 24 se muestran los resultados obtenidos. Puede observarse cómo, para el rango de densidades y humedades utilizado, el efecto del grado de saturación incrementando el valor del módulo prevalece sobre el de la densidad seca. En la Figura 25 puede observarse que el módulo aumenta hasta

valores del grado de saturación inicial (antes de aplicar la presión de confinamiento) del orden de 0,9, y a partir de este máximo, se reduce a medida que el suelo se acerca a la saturación total.

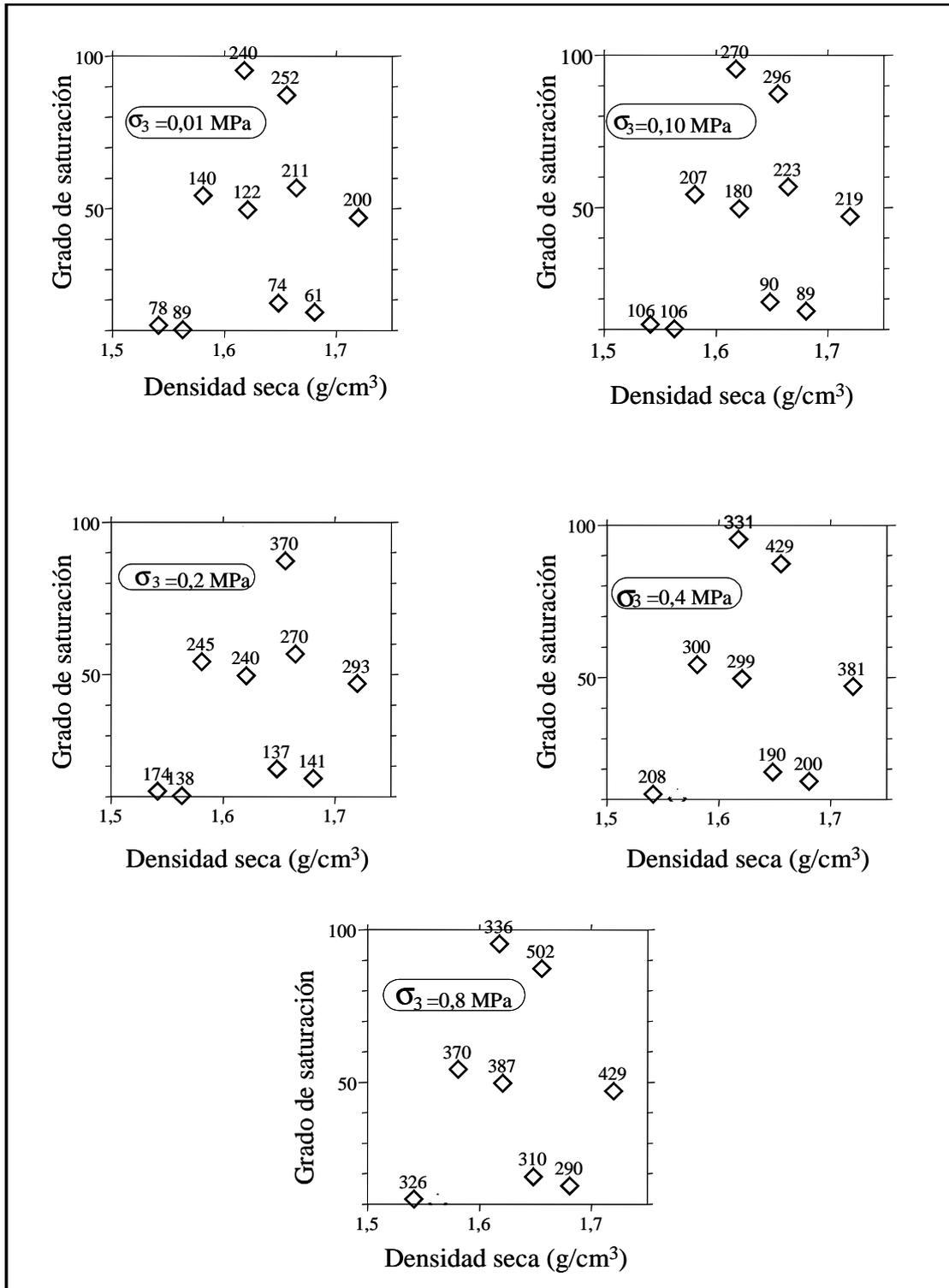


Figura 24: Módulo elástico de corte (expresado en MPa) a pequeñas deformaciones, medido en muestras con diversa densidad seca y grado de saturación

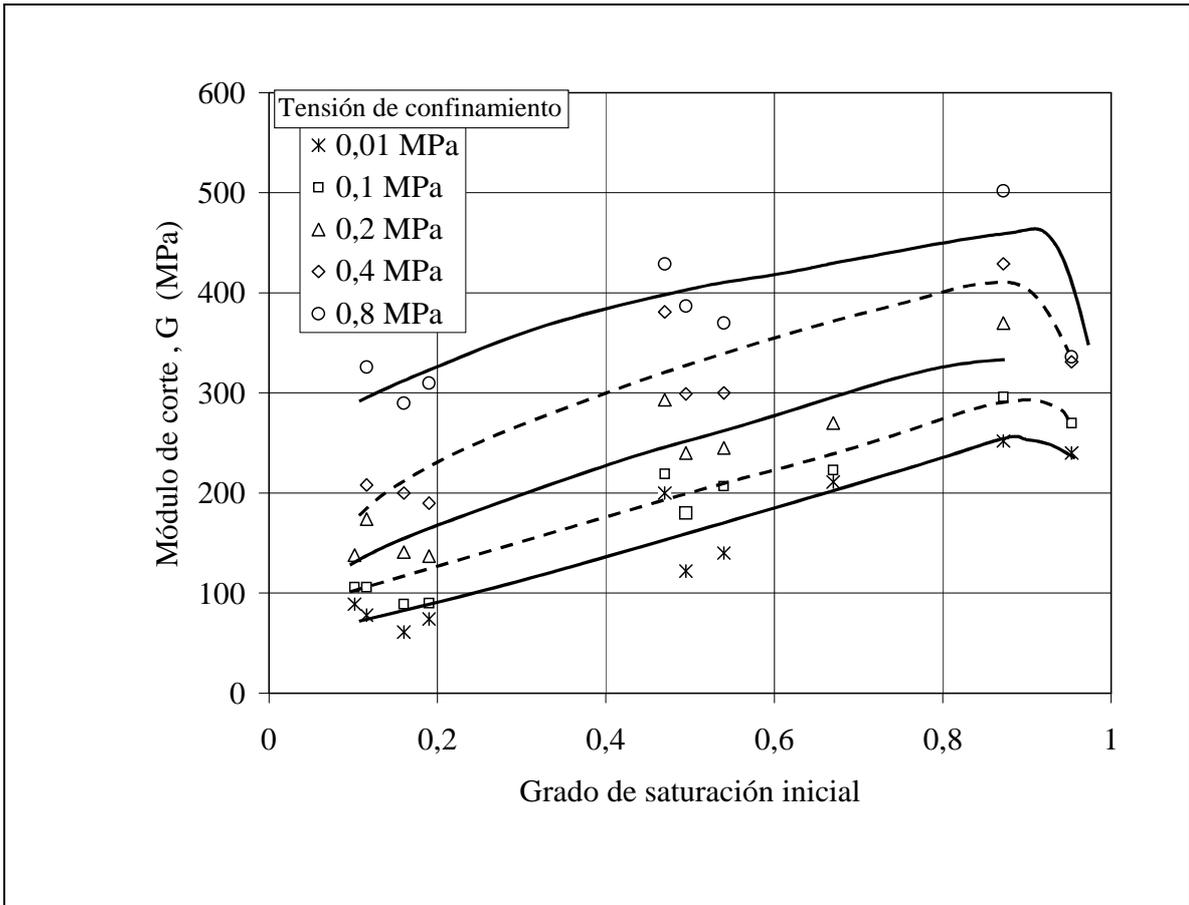


Figura 25: Evolución del módulo de corte con el grado de saturación para distintas presiones de confinamiento

3. CALIBRACIÓN DE MODELOS MEDIANTE RETROANÁLISIS

3.1. ENSAYOS DE INFILTRACIÓN

En el caso de arcillas poco permeables, la importante dependencia de la permeabilidad con el grado de saturación no puede ser evaluada mediante ensayos “directos”. El único procedimiento disponible para realizar esta evaluación es la utilización de técnicas de identificación de parámetros similares a las comúnmente utilizadas en geofísica o hidrología subterránea. Para ello, se ha puesto a punto un método de optimización que busca los parámetros del modelo numérico (CODEBRIGHT) que minimizan las diferencias entre los valores medidos en los ensayos y los valores calculados por el propio modelo cuando reproduce un ensayo de laboratorio tratado como un problema de contorno. Obviamente, en los ensayos de laboratorio a reproducir numéricamente, los parámetros que se buscan deben tener una influencia importante. Para el caso de la permeabilidad relativa al agua, los ensayos de infiltración son los más adecuados para ser modelados.

CIEMAT ha realizado dos tipos de ensayos de infiltración. En el primer caso se han utilizado celdas de acero de 2,5 cm de altura y 5,0 cm de diámetro, y se ha partido de bentonita compactada a una densidad seca inicial de 1,65 y 1,70 g/cm³ y humedades cercanas al 14 % (Tabla Anexo I- XXIII). En el segundo caso, se han empleado células de teflón con una altura de 10,1 cm y un diámetro de 5,3 cm en las que se han apilado cuatro pastillas de 2,5 cm de altura. En este caso, se han utilizado dos densidades secas iniciales (1,60 y 1,75 g/cm³) y los ensayos se han realizado a temperaturas de 20°C y 60°C (Tabla Anexo I- XXIV a Tabla Anexo I- XXVIII). Durante el ensayo se ha medido la evolución del agua que va entrando en las células y al final del ensayo se mide la humedad (y en el caso de la célula de teflón, la densidad seca) de las diversas secciones en las que se subdivide la muestra.

La Figura 26 muestra la evolución del agua que entra en las células de acero en función del tiempo. En todos los ensayos, el volumen de agua que ha entrado en la célula coincide con la diferencia entre el peso de la muestra al principio y al final del ensayo, por lo que cabe descartar posibles fugas de agua en el equipo de ensayo. Además, la humedad correspondiente al volumen de agua medido coincide razonablemente bien con el valor medio de la humedad que se ha determinado en diferentes secciones de cada probeta mediante secado en estufa al final del ensayo. Sin embargo, se han obtenido grados de saturación superiores a 110 %, lo que se justifica por el hecho de haber utilizado para su cálculo un valor de 1,00 g/cm³ para la densidad del agua adsorbida, lo que, según se explicó en la sección 2.2, es incorrecto.

En los ensayos en celda de acero, la evolución de la humedad en puntos situados a distintas distancias del borde no se ha podido establecer con precisión, ya que incluso para los tiempos más cortos de ensayo, las muestras estaban prácticamente saturadas en todos sus puntos y los cambios de humedad que se han medido obedecen a los distintos valores de la porosidad a lo largo de la muestra.

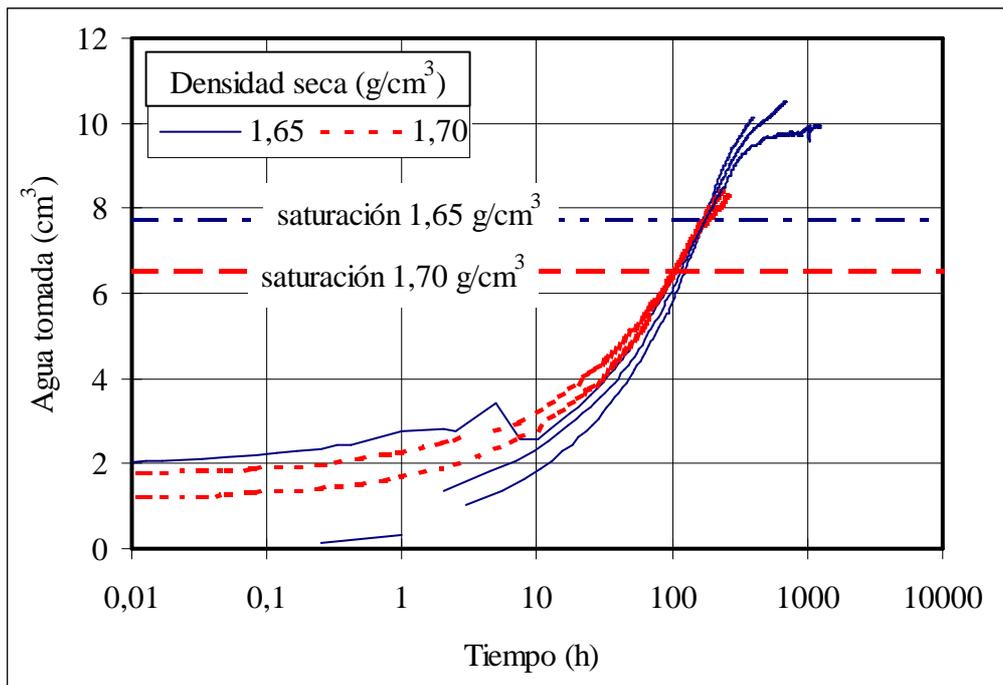


Figura 26: Evolución de la medida de la entrada de agua en los ensayos de infiltración en células de acero (las líneas horizontales indican la cantidad de agua estimada para saturar las muestras cuando se considera que la densidad del agua adsorbida es $1,00 \text{ g/cm}^3$)

En la Figura 27 se muestra la evolución de la entrada de agua en tres ensayos realizados en las células de teflón para diversas densidades y temperaturas. Puede observarse una entrada rápida de agua inmediatamente después de iniciado el ensayo que corresponde al agua necesaria para rellenar los huecos iniciales entre las pastillas y las paredes de la célula. Hay que señalar que debido a la existencia de estas holguras y a la propia deformabilidad de la célula, la densidad seca media final del material ha resultado bastante menor que la inicial ($1,41$ y $1,49 \text{ g/cm}^3$ en promedio, para densidades secas iniciales nominales de $1,60$ y $1,75 \text{ g/cm}^3$, respectivamente).

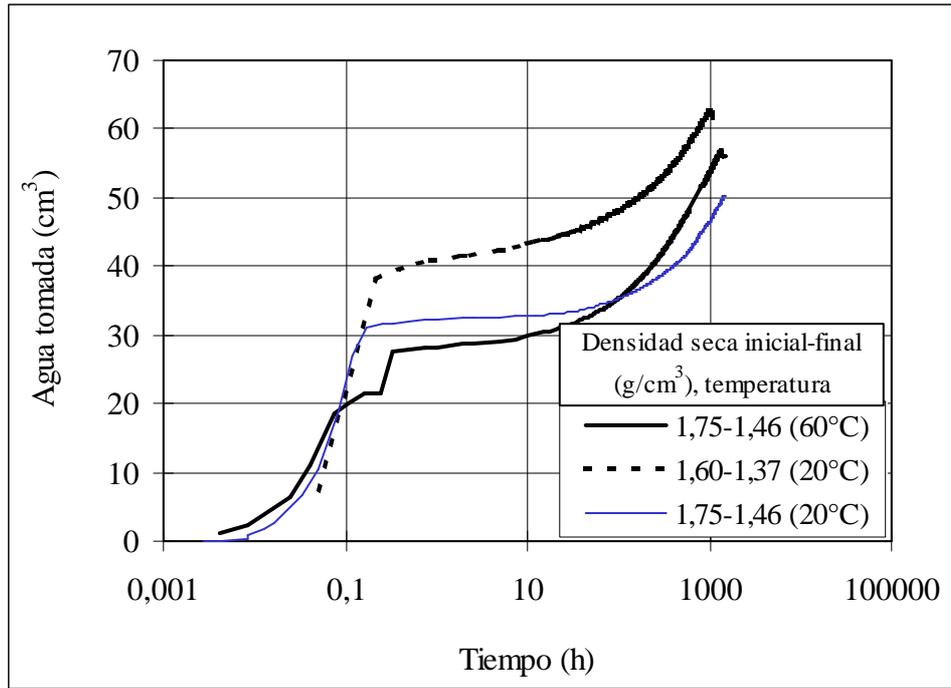


Figura 27: Evolución de la entrada de agua en tres ensayos en celda de teflón para diversas temperaturas y densidades secas iniciales de la bentonita

El efecto de la temperatura puede caracterizarse a partir del cambio de viscosidad del agua ($1 \cdot 10^{-3}$ Pa·s a 20°C y $0,47 \cdot 10^{-3}$ Pa·s a 60°C). Por otra parte, el efecto del cambio de porosidad puede estimarse a partir de las relaciones obtenidas entre la permeabilidad saturada y la densidad seca a temperatura ambiente (Ecuación 13). En este caso, si se consideran las densidades medias entre las iniciales y las finales ($1,485$ y $1,605$ g/cm^3 para densidades secas iniciales de $1,60$ y $1,75$ g/cm^3 respectivamente) resulta:

$$k_{iw}(\rho_{di} = 1,60) = k_{iw}(\rho_{di} = 1,75) 10^{-2,96(1,485-1,605)} = 2,27 k_{iw}(\rho_{di} = 1,75) \quad [21]$$

En la Figura 28 puede comprobarse que si se divide el tiempo por la viscosidad correspondiente a cada temperatura y se multiplica en el caso de la densidad seca de $1,6$ g/cm^3 por un factor de $2,27$ para tener en cuenta el cambio de porosidad, las tres curvas tienden a superponerse. En el eje vertical se ha colocado la relación entre el agua que ha entrado en cada momento y el agua necesaria para saturar el suelo (se ha considerado que el volumen de la célula es el correspondiente a la densidad seca final que se ha medido y que el agua que entra antes de la primera media hora forma parte del agua inicial del suelo). Puede constatar que los cambios de permeabilidad por efecto de la temperatura y de la porosidad pueden explicarse relativamente bien considerando el cambio de viscosidad y el efecto de la porosidad en la permeabilidad intrínseca. Por tanto, la permeabilidad no saturada, $k(S_r, T, \rho_d)$, puede expresarse como:

$$k(S_r, T, \rho_d) = k_{iw}(S_r=1, \rho_d = \rho_{d0}) 10^{-3,6(\rho_d - \rho_{d0})} k_r(S_r) (\gamma_w / \mu_w(T)) \quad [22]$$

Donde k_{iw} es la permeabilidad intrínseca obtenida mediante flujo de agua, ρ_d la densidad seca, ρ_{d0} la densidad seca de referencia, μ_w y γ_w la viscosidad y el peso específico del agua y $k_r(S_r)$ la permeabilidad relativa (relación entre la permeabilidad para un cierto grado de saturación y la permeabilidad en condiciones de saturación).

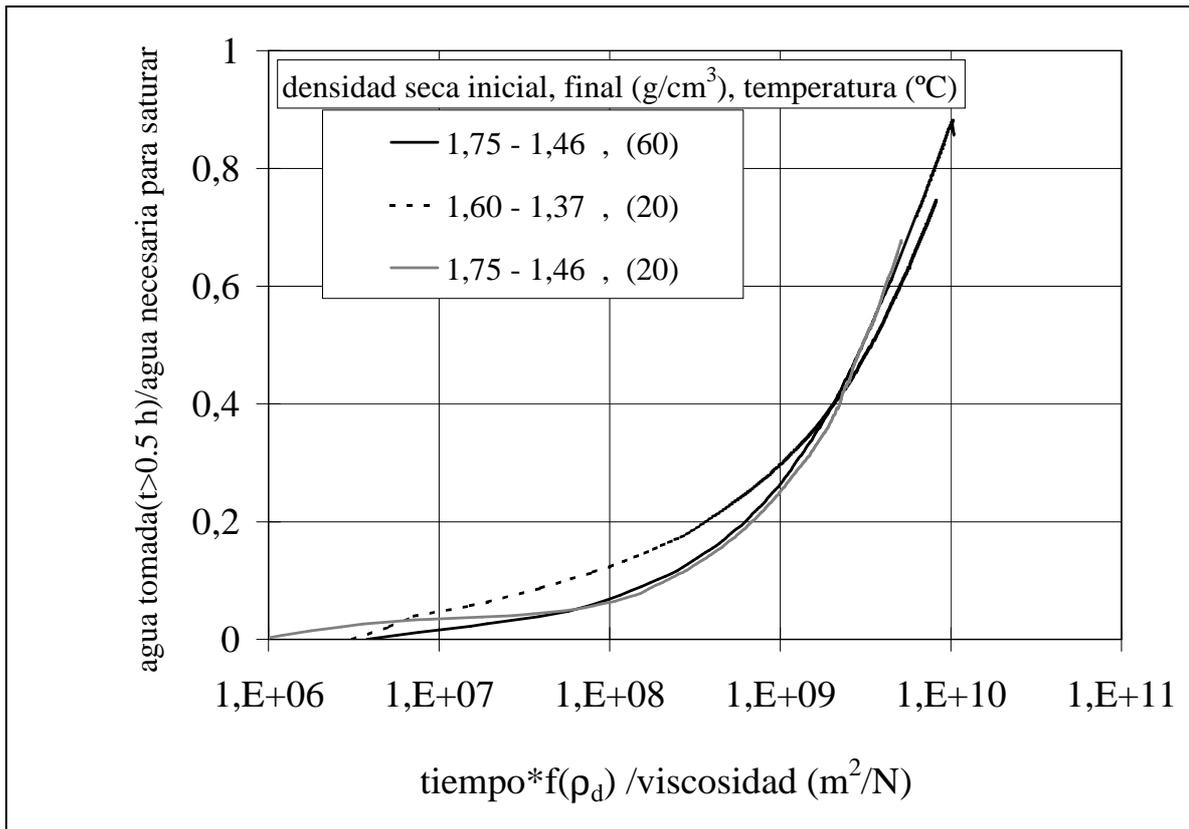


Figura 28: Evolución del agua tomada para tiempos superiores a 30 minutos con relación al agua necesaria para saturar el suelo considerando el efecto de la viscosidad del agua y la porosidad del suelo. ($f(\rho_d)=1$ para $\rho_d=1.605$ (densidad seca inicial $1,75 \text{ g/cm}^3$) y $f(\rho_d)= 2,27$ para $\rho_d=1,485$ (densidad seca inicial $1,60 \text{ g/cm}^3$))

La medida de la densidad seca y de la humedad en diferentes tiempos a lo largo de las muestras ha permitido, mediante la utilización de un método de identificación de parámetros, obtener una estimación de la permeabilidad intrínseca de la bentonita y del exponente de la ley utilizada para modelar el efecto del grado de saturación sobre la permeabilidad relativa ($k_r=S_r^a$). Mediante retroanálisis de los ensayos realizados con una densidad seca inicial de $1,75 \text{ g/cm}^3$, se ha obtenido para la permeabilidad intrínseca un valor de $0,295 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$ (para un valor de la porosidad $n=0,4$) y un valor de $4,64$ para el exponente “a”. Para la modelización numérica del flujo de agua se ha utilizado el programa CODEBRIGHT, pero considerando sólo los fenómenos hidráulicos (en cada tramo de la muestra, la porosidad se ha considerado invariable en el tiempo e igual a la final medida en ese tramo).

En la UPC se han realizado ensayos de tipo similar. Uno de los objetivos iniciales del plan de ensayos era observar si en el contacto entre el granito y la bentonita se producía la desaturación del granito por efecto de la elevada succión inicial de la bentonita. Para estudiar este efecto, una pastilla (7,0 cm de altura y 5,0 cm de diámetro) de bentonita compactada a una densidad seca inicial de $1,65 \text{ g/cm}^3$ se puso en contacto con un testigo de roca del mismo tamaño. Ambas muestras se colocaron en el interior de una cámara como las utilizadas en los ensayos triaxiales y se les aplicó una presión de confinamiento de 0,8 MPa. En el borde inferior del granito se aplicó una presión de agua de 0,6 MPa, mientras el borde superior de la bentonita se colocó a presión atmosférica. Tras varios periodos de tiempo se midió la distribución de humedad a lo largo de la muestra (Tabla Anexo II- IXVII; **Error! No se encuentra el origen de la**

referencia. a Tabla Anexo II- IX). En los ensayos no se detectó ningún cambio apreciable en la humedad del granito, pero las medidas de la humedad en la bentonita han permitido obtener un nuevo valor para el exponente de la ley que proporciona la permeabilidad relativa al agua. La permeabilidad del granito ha resultado ser muy superior a la de la bentonita por lo que a efectos de modelación puede ser considerada como infinita. En este caso, el valor obtenido para el exponente de la ley que define la permeabilidad relativa de la bentonita ha sido de “a”=3,5.

Desde las primeras modelizaciones de los ensayos de maqueta e *in situ* del proyecto, se ha constatado que con un valor del exponente de 3 se obtienen buenos ajustes a la cantidad de agua que entra en la maqueta y a la humedad de diversos puntos de medida en ambos experimentos (UPC 1998). Por otra parte, este exponente conduce a predicciones relativamente buenas de las medidas realizadas tanto en los ensayos de infiltración de CIEMAT y UPC que se han analizado, como en los ensayos de flujo térmico que se describen más adelante. En la Figura 29 y en la Figura 30 se recoge la comparación de los valores de la humedad medidos en los ensayos de infiltración en celda de teflón y en contacto con granito con los obtenidos en la modelización numérica de los ensayos considerando un exponente para la ley que proporciona la permeabilidad relativa de valor 3,0.

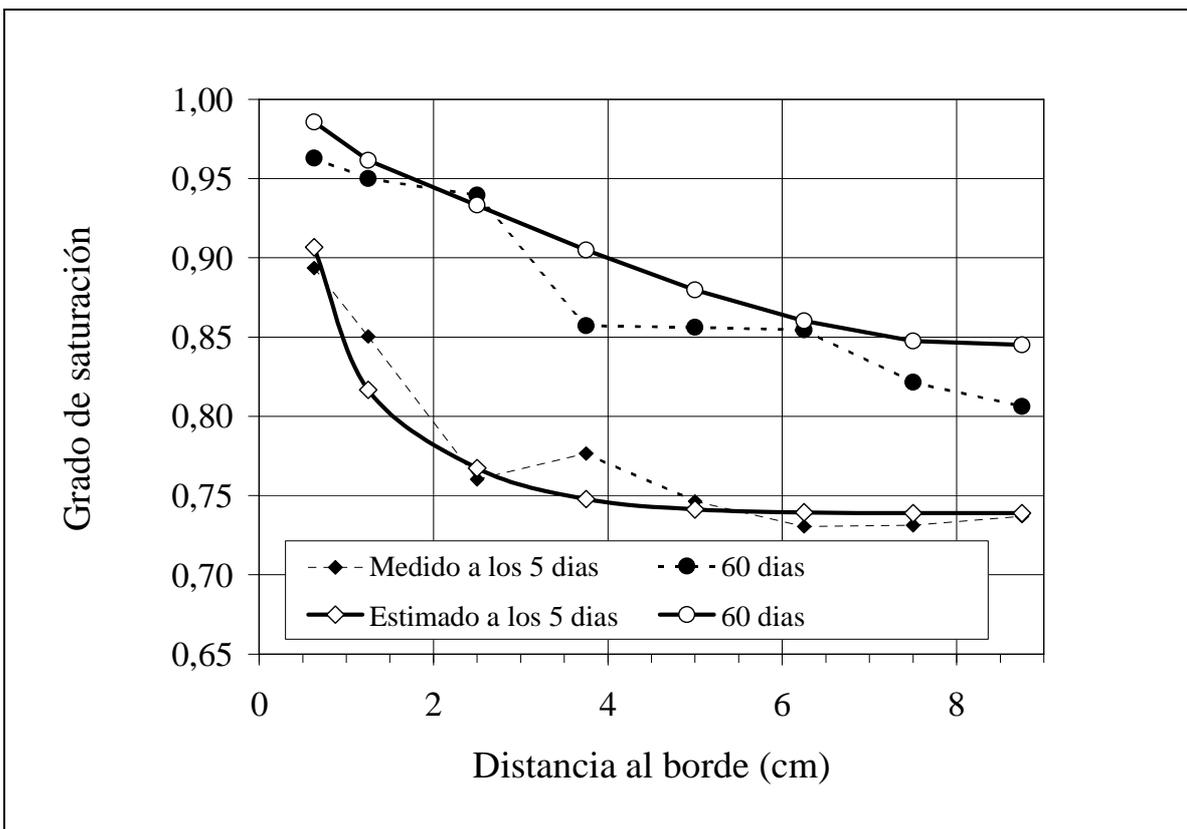


Figura 29: Comparación entre valores medidos y estimados en ensayos de infiltración en célula de teflón. Densidad inicial 1,75 g/cm³, humedad inicial 14 %, ($k_r=S_r^3$)

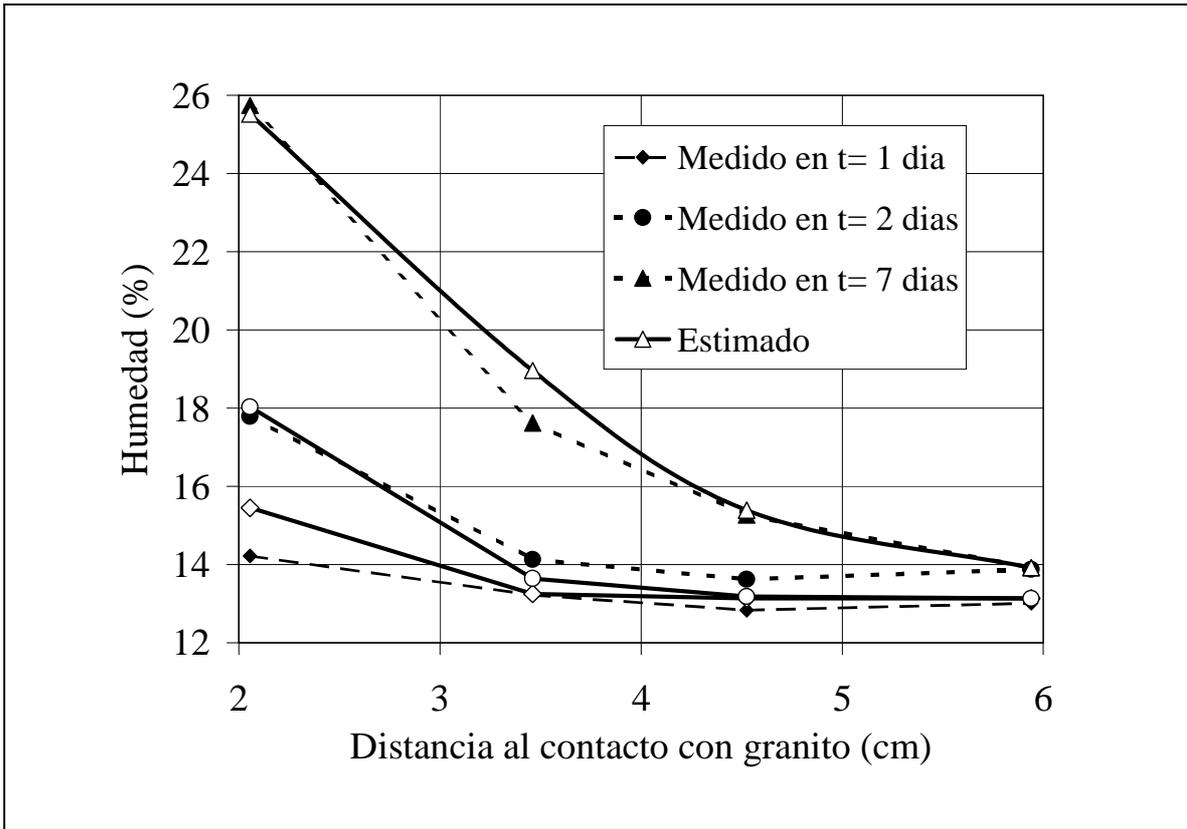


Figura 30: Comparación entre valores medidos y estimados de la humedad en ensayos de infiltración de bentonita en contacto con granito, en célula triaxial ($k_r=S_r^3$)

3.2. ENSAYOS DE FLUJO DE CALOR

En la UPC se ha puesto a punto un equipo para imponer un flujo controlado de calor sobre probetas de bentonita compactada (Tabla Anexo II- X). En el ensayo se aplica un flujo de calor controlado en uno de los extremos de una muestra cilíndrica (7,6 cm de altura y 3,8 cm de diámetro), mientras que en el opuesto se mantiene la temperatura fijada a 30 °C. La muestra está enfundada en una membrana de látex a fin de asegurar que el contenido de agua se mantiene constante durante el ensayo y cubierta por una capa de 5,5 cm de espesor de material aislante deformable.

Mediante retroanálisis de la evolución de la temperatura y la humedad en varios puntos de la muestra ha sido posible obtener algunos valores de la conductividad térmica y del calor específico de la bentonita. Si en el análisis se considera el medio como monofásico, el valor de la conductividad térmica y del calor específico que se obtienen corresponden al valor medio de la probeta y el problema a resolver numéricamente se considera como únicamente térmico y se ajustan sólo las medidas de temperatura. Sin embargo, si se considera el problema como termohidráulico acoplado, es necesario introducir la variación de la conductividad térmica y del calor específico del medio con el grado de saturación. En este caso, se ajustan tanto las medidas de temperatura como las de humedad. Para modelar el cambio de conductividad térmica con el grado de saturación se ha utilizado la siguiente relación:

$$\lambda = (\lambda_w)^{S_r} (\lambda_d)^{(1-S_r)} \quad [23]$$

donde λ_w y λ_d son las conductividades térmicas de la bentonita en condición de saturación y secado respectivamente. En este caso, la transferencia de calor se realiza tanto por conducción como por advección asociada al flujo de agua líquida y en forma de vapor. Dado que el número de parámetros que entran en juego es alto no es posible obtener el valor óptimo de todos ellos de forma conjunta y por ello el proceso de identificación debe centrarse en unos pocos parámetros (2 ó 3 es un número de parámetros a identificar asumible). Se han considerado dos tipos de análisis termohidráulicos, en el primer tipo los parámetros a estimar han sido el valor de la conductividad térmica en condiciones de saturación (λ_w) y el valor del factor de tortuosidad del medio (τ). Este parámetro está directamente relacionado con la difusividad del vapor de agua, que a su vez controla el flujo de agua en forma de vapor en la muestra. Dado que el gradiente térmico en los ensayos es grande, (del orden de 10 °C/cm), la magnitud del movimiento del agua en forma de vapor será importante. En el segundo tipo de análisis se ha estimado, además de los dos parámetros citados anteriormente, el valor del exponente de la ley que proporciona el valor de la permeabilidad relativa no saturada (a). Los parámetros que no son objeto de identificación tienen el siguiente valor en los retroanálisis:

$$k_i(n=0,4)=2 \cdot 10^{-21} \text{ m}^2$$

$$k_r=S_r^3$$

$$c_s \text{ (J/kg}^\circ\text{C)} = 1,38 T \text{ (}^\circ\text{C)} + 732,52;$$

$$\lambda_d \text{ (W/mK)}=0,47$$

En la Tabla VII se muestran los resultados obtenidos en los retroanálisis efectuados sobre ensayos realizados con muestras con distintas densidades secas y humedades iniciales. Hay que señalar que durante el ensayo se producen cambios de volumen y de humedad a lo largo de la muestra que pueden ser considerables.

Tabla VII : Parámetros obtenidos por retroanálisis en diversos ensayos de flujo de calor

Condiciones de la muestra					Análisis térmico		Análisis termohidráulico (exp "a"=3)		Análisis termohidráulico		
Ensayo	ρ_d (g/cm ³)	w inicial	S_r mínimo	S_r máximo	c_s (J/kg°C)	λ_{medio} (W/m°C)	λ_w (W/m°C)	τ	λ_w (W/m°C)	τ	a
1	1,59	15,86	32	84	1570	0,81	1,03	1,75	1,19	0,82	9,72
2	1,63	15,33	47	75	863	0,87	1,20	0,57	1,19	0,56	3,06
3	1,65	16,33	60	86	780	0,98	1,34	0,52	1,31	0,74	1,00
4	1,63	19,46	60	81	1012	0,91	1,19	0,74	1,18	0,90	1,67
5	1,62	22,50	64	89	1146	0,98	1,37	0,44	1,36	0,49	2,37
6	1,64	23,42	81	97	1738	0,93	-	-	0,91	2,10	0,86
7	1,63	23,60	81	99	1126	0,77	0,81	0,96	0,79	0,85	0,46

En la Figura 31 se muestra la comparación de los valores de la conductividad térmica medidos directamente por CIEMAT (Sección 2.3) con los estimados mediante

retroanálisis por la UPC. En general, los valores obtenidos por retroanálisis son algo menores, aunque comparables, a los obtenidos por medida directa. Para grados de saturación por debajo del 80 %, el ajuste entre los valores medidos y estimados es bueno, sin embargo, la diferencia entre ambos valores aumenta para grados de saturación altos donde el ajuste de las medidas de los ensayos con los resultados de la modelización ha resultado poco satisfactorio. Probablemente ello es debido a que para situaciones próximas a la saturación, las condiciones de estanqueidad en la muestra no se han podido mantener.

En la Figura 32 se muestra la evolución de la temperatura medida y calculada a partir de los parámetros estimados por retroanálisis del problema térmico (considerando el material monofásico), en el caso del ensayo realizado sobre una muestra con un grado de saturación medio de 0,74 (ensayo 4 de la Tabla VII) . En la Figura 33 se muestra la comparación entre los valores de la humedad medidos y estimados a lo largo de la misma muestra al finalizar el ensayo de flujo de calor, resolviendo por retroanálisis el problema termo-hidráulico. Como puede observarse, los ajustes entre los valores medidos y estimados con el modelo numérico son aceptables.

Mediante retroanálisis de los ensayos de flujo de calor realizados en la UPC con la humedad global de la muestra constante, se han obtenido valores del exponente “a” relativamente bajos (mayoritariamente entre 1,1 y 3,1). Desde un punto de vista conceptual, parece que los valores bajos del exponente conducen a permeabilidades demasiado altas en el rango de los grados de saturación más bajos. Por debajo de la humedad higroscópica –que, para las densidades estudiadas, está asociada a grados de saturación relativamente altos (50 al 60 %)–, no parece lógico que el agua pueda moverse fácilmente por el suelo y la permeabilidad relativa debería tender a cero. Esta consideración hace muy cuestionables los valores del exponente “a” por debajo de 3. En la Figura 34 se recogen las distintas relaciones entre el grado de saturación y la permeabilidad relativa derivadas de los distintos valores del parámetro “a” que se han obtenido a partir de los diferentes ensayos.

Hay que señalar que los valores de parámetros obtenidos en el proceso de identificación de cada uno de los ensayos son similares aunque no exactamente iguales. Estos valores, salvo en algún caso concreto, se encuentran en el rango de los valores típicos de cada parámetro. Los valores excesivamente bajos del exponente de la ley de permeabilidad relativa que se han estimado en los ensayos con grados de saturación cercanos a la unidad, pueden explicarse teniendo en cuenta que, para ese rango de saturación, cualquier valor de dicho exponente proporciona valores de la permeabilidad relativa muy próximos a uno. Por tanto, al no ser sensibles las predicciones del modelo al valor de ese parámetro, los valores identificados para el mismo pueden ser poco realistas. Por otra parte, el hecho de que el flujo de agua líquida durante los ensayos de flujo de calor pueda ser pequeño en relación con el flujo de vapor asociado al gradiente térmico, hace que la incertidumbre asociada a los valores del parámetro “a” obtenidos a partir de este ensayo pueda ser grande.

La observación de las diferencias entre valores medidos y modelados que se obtienen con diferentes conjuntos de parámetros conduce a la conclusión de que diversas combinaciones de parámetros pueden proporcionar ajustes entre medidas y predicciones muy similares. Este hecho es razonable si se tiene en cuenta que los ajustes se hacen utilizando las medidas finales de la humedad que incorporan de forma conjunta los cambios originados por el flujo de vapor (dependientes de la tortuosidad, τ) y por el flujo de agua líquida (controlado por la permeabilidad relativa y en concreto por el

parámetro “a”). En la Figura 35 se recogen de forma gráfica los valores del factor de tortuosidad y de “a” obtenidos en los diversos retroanálisis del problema termohidráulico. Puede apreciarse cómo los valores altos del factor de tortuosidad que conducen a favorecer el flujo de vapor desde la parte caliente de la probeta hacia la parte fría, están asociados a valores bajos del exponente “a” que tienden a favorecer el flujo de agua líquida en el medio no saturado desde la parte fría hacia la parte caliente. Si la distribución de humedad final en la muestra debe ser lo más cercana posible a la medida, los dos flujos deben contrarrestarse, y el aumento de uno de ellos está asociado al aumento del otro.

De forma análoga, en la Figura 36 se recogen los valores del factor de tortuosidad y de la conductividad térmica en condiciones saturadas que se han obtenido en los retroanálisis termohidráulicos imponiendo un valor fijo de 3 para el parámetro “a”. Puede constatarse cómo un valor bajo de la conductividad térmica está asociado a un valor alto del factor de tortuosidad que favorece el flujo de vapor y el transporte de calor asociado a dicho flujo. En este caso, el efecto del flujo de vapor no sólo se manifiesta a través del calor transportado por el mismo, sino que también en la alteración de la conductividad térmica global de la bentonita al alterar la distribución de grados de saturación a lo largo de la probeta.

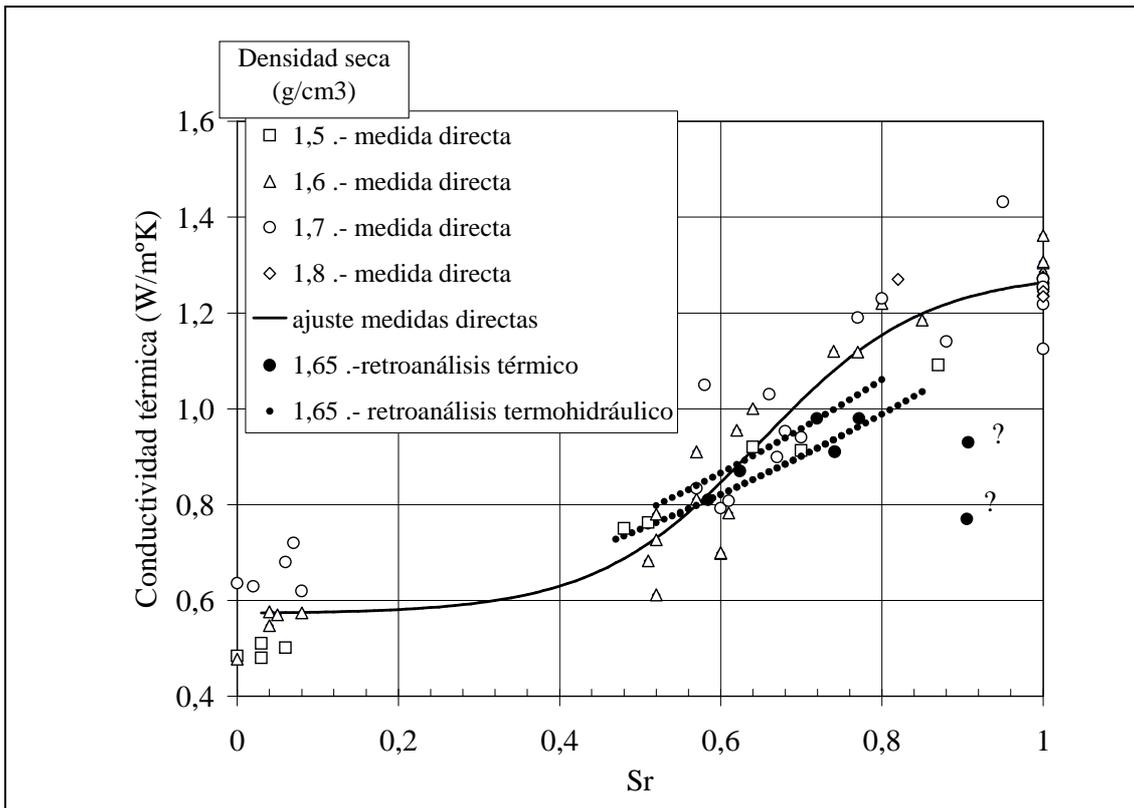


Figura 31: Valores de la conductividad térmica de la bentonita en función del grado de saturación según diversos métodos de medida

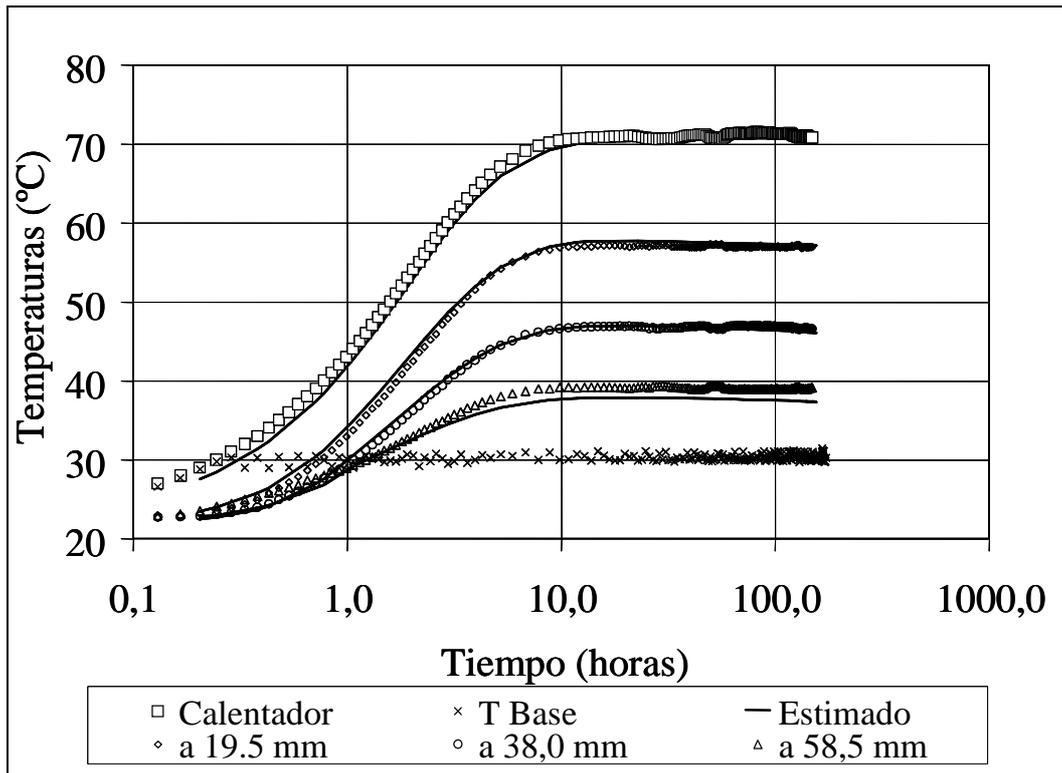


Figura 32: Evolución de la temperatura medida y calculada (análisis térmico) en diversos puntos de una muestra compactada con una densidad seca de $1,63 \text{ g/cm}^3$ y una humedad del 19,5 % (ensayo 4 en la Tabla VII). En un extremo de la muestra se inyecta calor ($314 \text{ cal/s}\cdot\text{m}^2$) mientras que la otra base se mantiene a una temperatura de $30 \text{ }^\circ\text{C}$

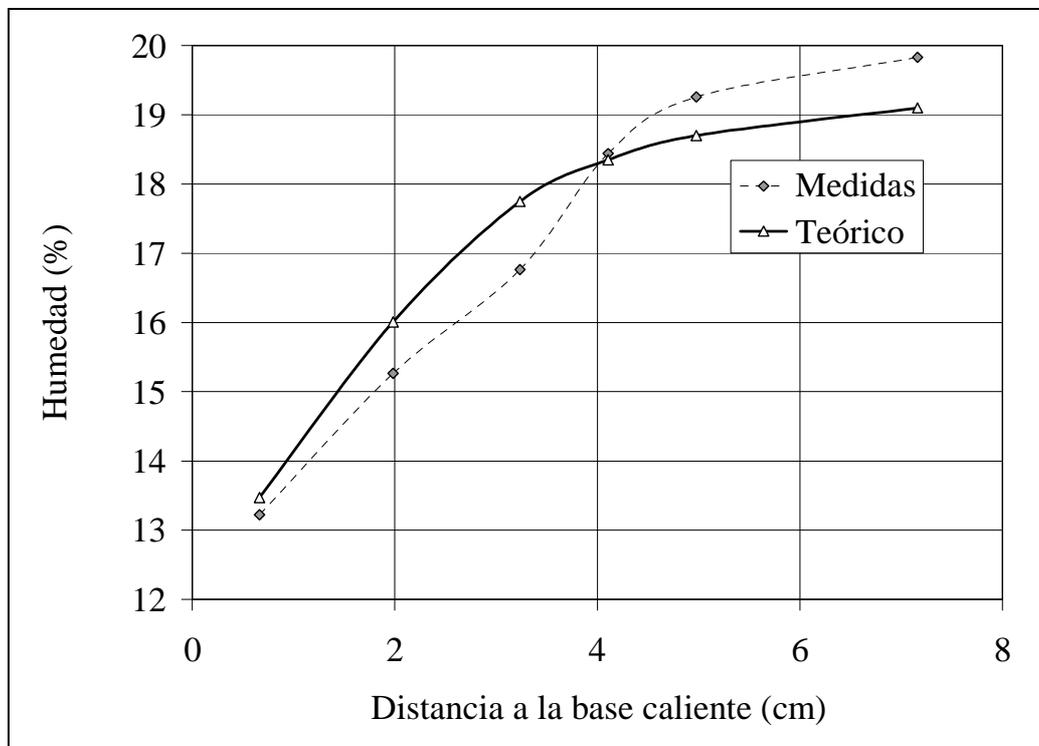


Figura 33: Comparación entre valores medidos y estimados de la humedad al finalizar un ensayo de flujo de calor. Retroanálisis termohidráulico del ensayo 4 de la Tabla VII

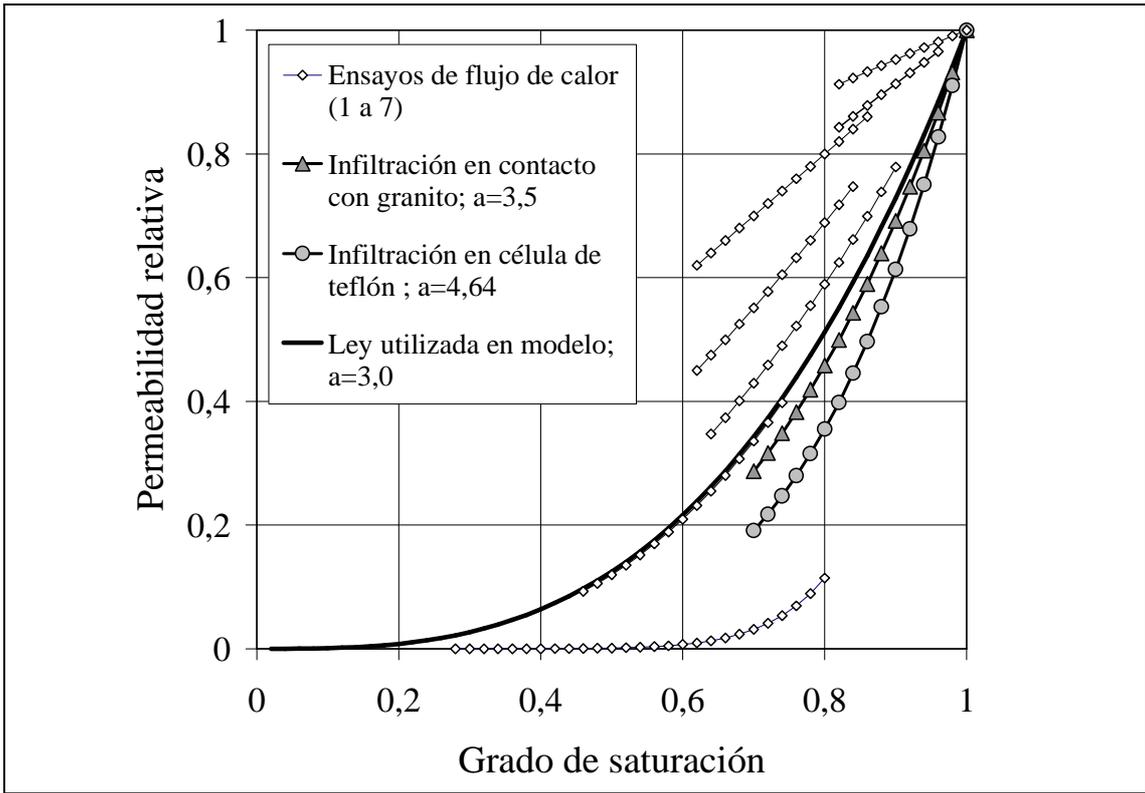


Figura 34: Relaciones entre la permeabilidad relativa y el grado de saturación. Los valores del parámetro “a” en los ensayos de flujo de calor corresponden a los indicados en la Tabla VII

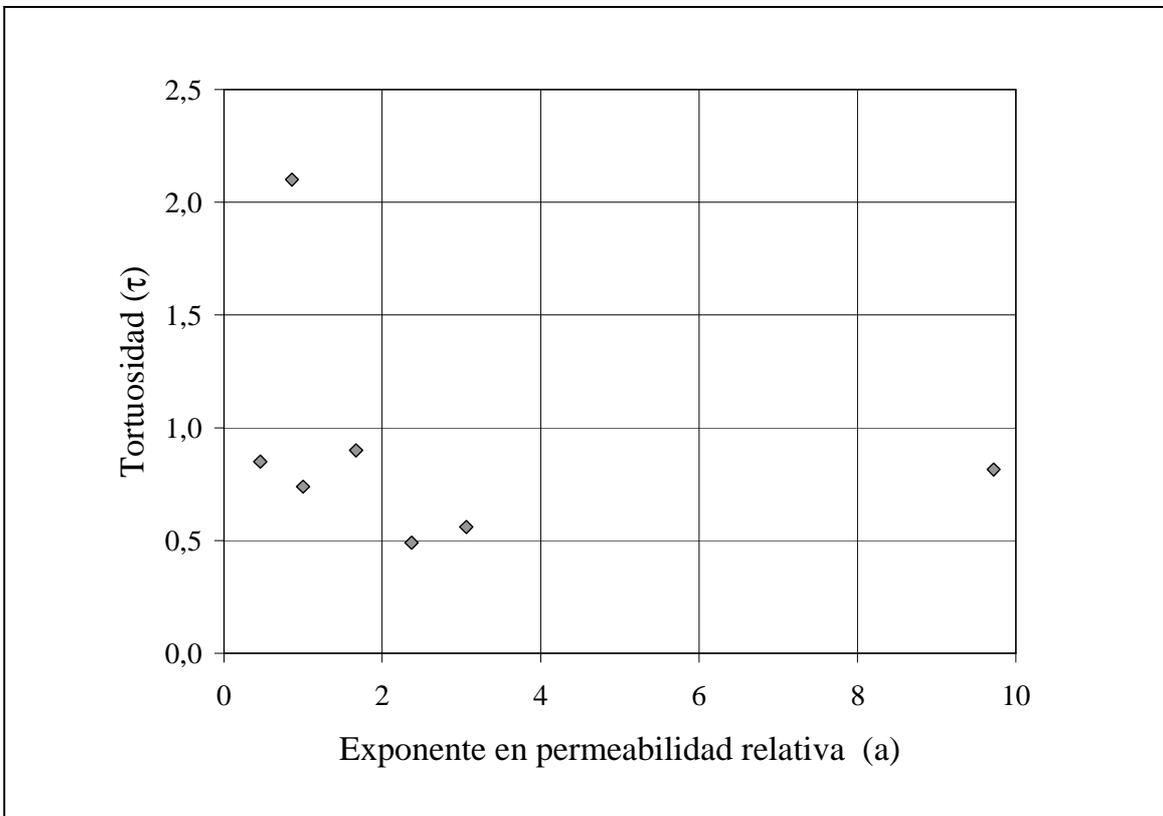


Figura 35: Valores del factor de tortuosidad y del exponente en la ley de permeabilidad relativa obtenidos en los diversos retroanálisis termohidráulicos

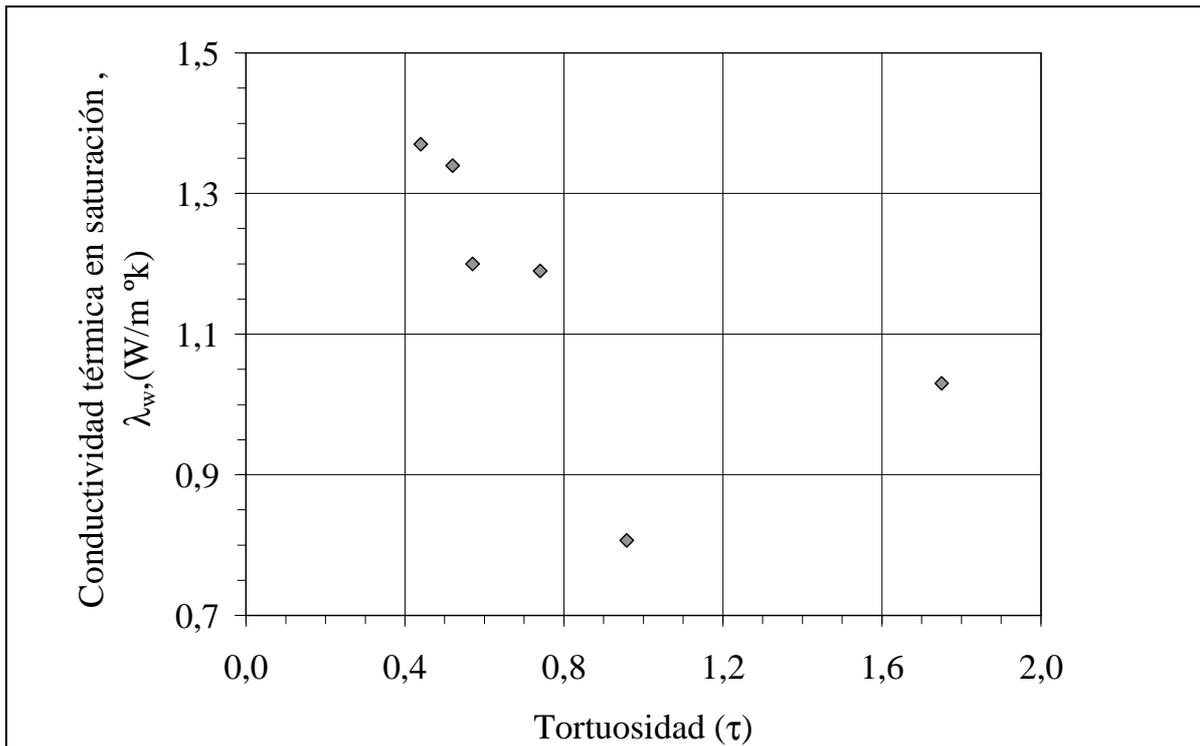


Figura 36: Valores de la conductividad térmica en condiciones de saturación que se han obtenido en los retroanálisis termohidráulicos de los diversos ensayos de flujo de calor. Se ha impuesto un exponente de 3 para la ley de la permeabilidad relativa

La Figura 37 muestra la función objetivo en términos de tortuosidad y del exponente de la ley de la permeabilidad relativa para el caso del ensayo realizado con una humedad inicial del 15,3 % y una densidad seca inicial de $1,63 \text{ g/cm}^3$ (ensayo 2 de la Tabla VII). La función objetivo incorpora tanto las diferencias entre las predicciones y los valores de las temperaturas medidas en cada punto a lo largo del ensayo, como las diferencias entre predicciones y humedades medidas al final del ensayo. El proceso de identificación de parámetros consiste básicamente en obtener el conjunto de parámetros que minimizan esta función. En la función objetivo las diferencias entre predicciones y medidas de cada tipo se ponderan a fin de dar el mismo peso a las numerosas medidas de temperatura y al reducido número de valores medidos de la humedad. Las líneas de nivel indican el mismo valor de la función objetivo obtenido con diferentes combinaciones de parámetros; lógicamente los valores óptimos de los parámetros se sitúan en el mínimo de la función objetivo. Sin embargo, puede apreciarse que los valores de los parámetros obtenidos por retroanálisis del resto de los ensayos conducirían a valores de la función objetivo próximos al mínimo. En la misma figura se indican los valores del exponente de la ley de permeabilidad relativa que se han obtenido por retroanálisis de los ensayos de infiltración expuestos en el apartado 3.1 (Ensayos de infiltración), dado el carácter de esos ensayos, la fiabilidad en el valor de dicho exponente será más alta que la de los valores obtenidos en los ensayos de flujo de calor.

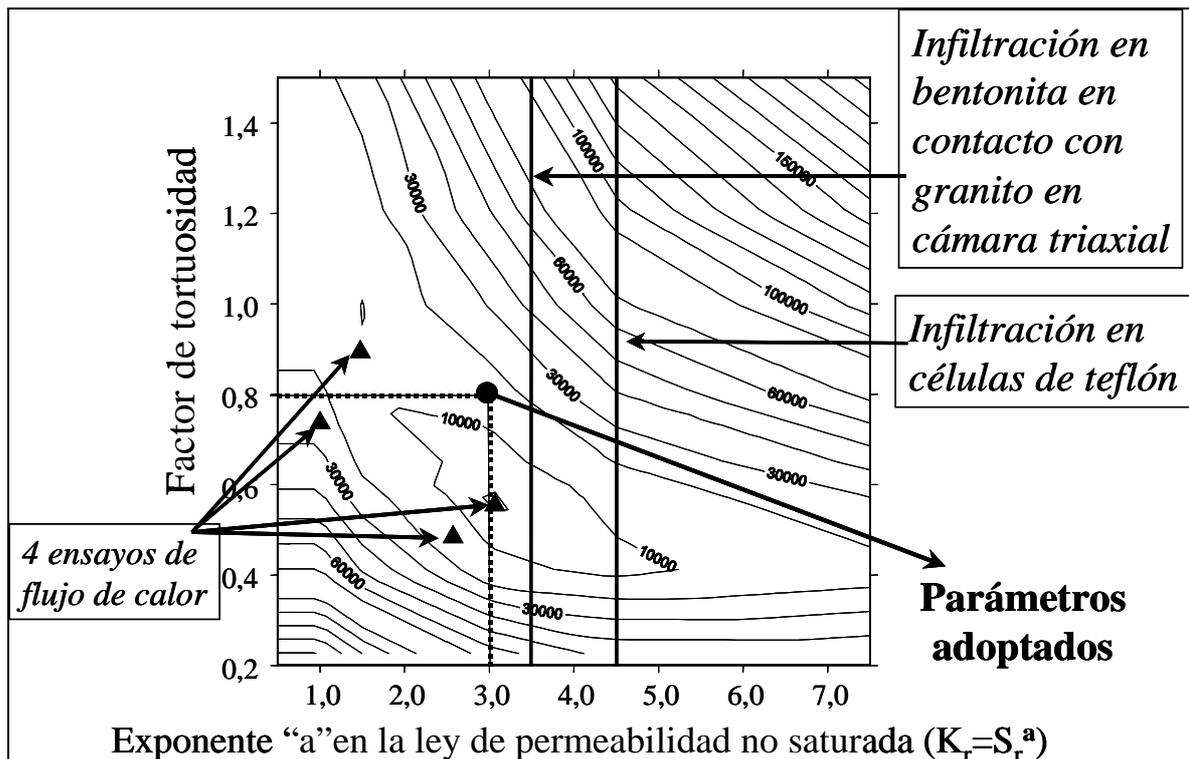


Figura 37: Curvas de nivel de la función objetivo en el caso del ensayo 2 de la Tabla VII. Se indica asimismo, la situación de los puntos representativos de los valores de los parámetros obtenidos en otros ensayos

A la vista de los valores de los parámetros obtenidos por medida directa y por retroanálisis de los diversos ensayos se han seleccionado los siguientes parámetros para definir el comportamiento termohidráulico de la bentonita:

$$k_i (\text{porosidad}=0,4) = 2 \cdot 10^{-21} \text{ m}^2$$

$$k_r = S_r^3$$

$$\tau = 0,8$$

$$\lambda (\text{W/m K}) = 0,47^{1-S_r} 1,15^{S_r}$$

Con este conjunto de parámetros se pueden reproducir con un buen ajuste tanto los ensayos de infiltración de agua, tal como se ha indicado en el apartado 3.1 como los ensayos de flujo de calor. En la Figura 38 y en la Figura 39 se muestra la comparación de las medidas en alguno de los ensayos de flujo de calor con las predicciones realizadas con el modelo termohidráulico y el conjunto de parámetros seleccionados.

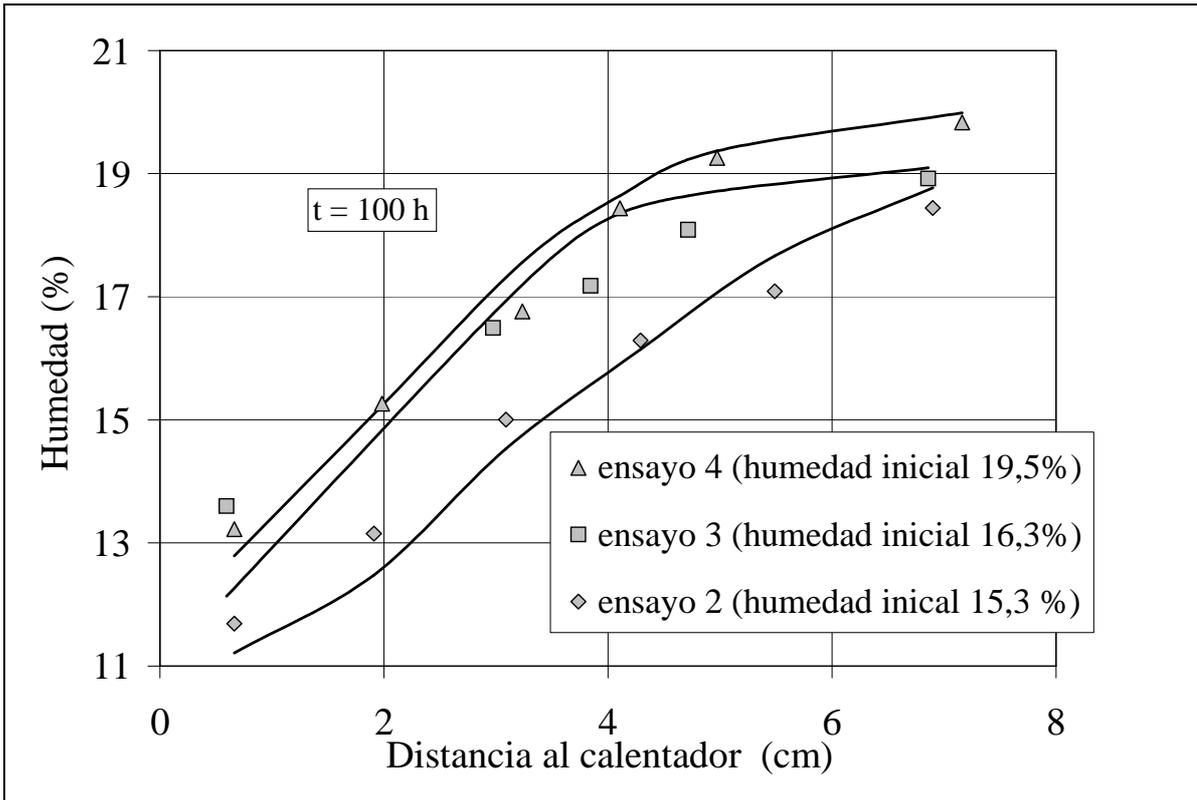


Figura 38: Comparación entre valores de la humedad final medida en los ensayos de flujo de calor y las predicciones numéricas utilizando un mismo conjunto de parámetros

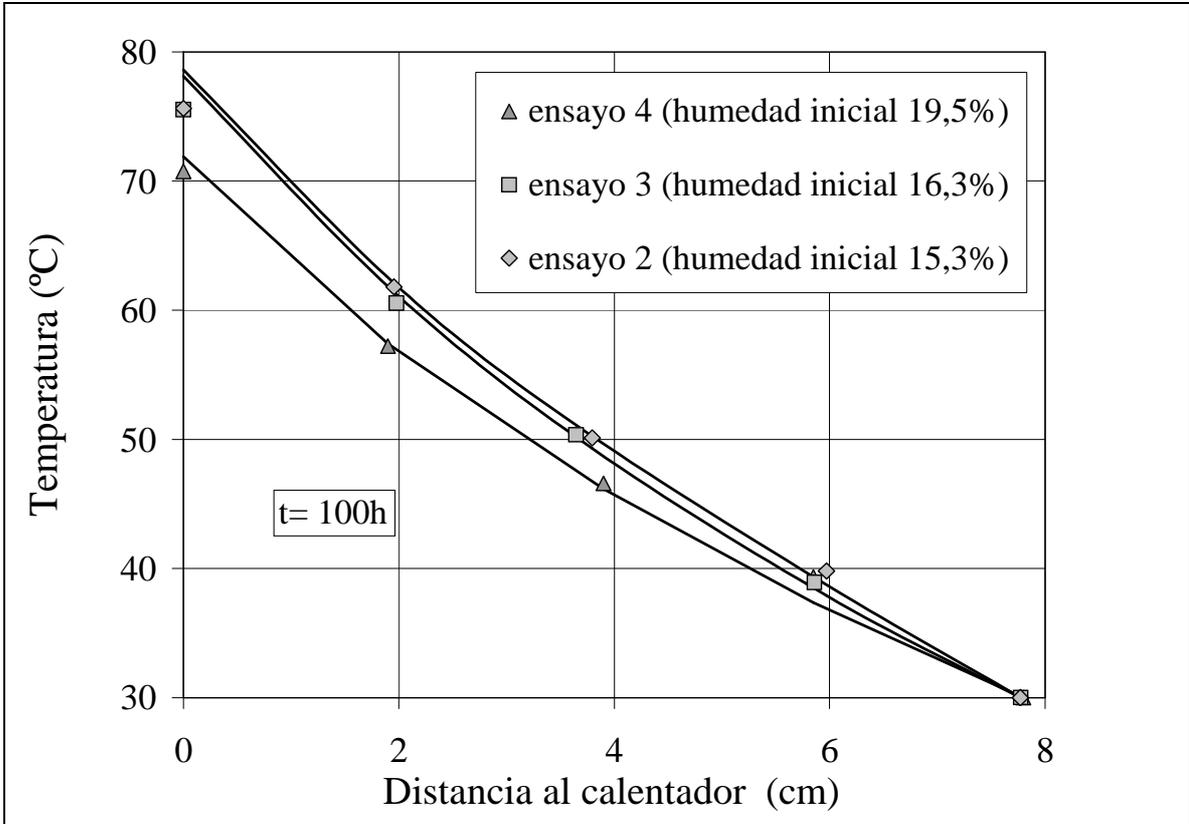


Figura 39: Comparación entre valores de la temperatura final medida en los ensayos de flujo de calor y las predicciones numéricas utilizando un mismo conjunto de parámetros

3.3. ENSAYOS DE CALENTAMIENTO A HUMEDAD CONSTANTE: DEFORMACIONES POR EFECTOS TÉRMICOS

En UPC se han realizado medidas de la deformación vertical debida a cambios de temperatura sobre probetas cilíndricas de bentonita compactada a densidades secas comprendidas entre 1,6 y 1,7 g/cm³ y con grados de saturación aproximados del 60, 80 y 95 % (Tabla Anexo II- XI a Tabla Anexo II- XV). Las probetas se han situado, enfundadas en membrana de látex, en el interior de un baño con control de temperatura, sin más confinamiento que el proporcionado por la presión del agua en el baño (unos 30 cm de columna de agua).

Los movimientos observados han sido pequeños y difíciles de medir, por lo que los resultados presentan bastante dispersión. Sin embargo, de los mismos se pueden extraer algunas tendencias básicas de comportamiento.

En la Figura 40 se muestran algunos resultados típicos. Puede observarse que la pendiente de la relación entre los cambios de temperatura y la deformación aumenta a medida que el material está más caliente. Por otra parte, se observa que tras un ciclo de calentamiento-enfriamiento se puede constatar la existencia de cierta deformación de expansión no recuperable (del orden del 0,3-0,4 %, en ciclos de 25°C a 65 °C y para muestras con grados de saturación próximos al 95 %).

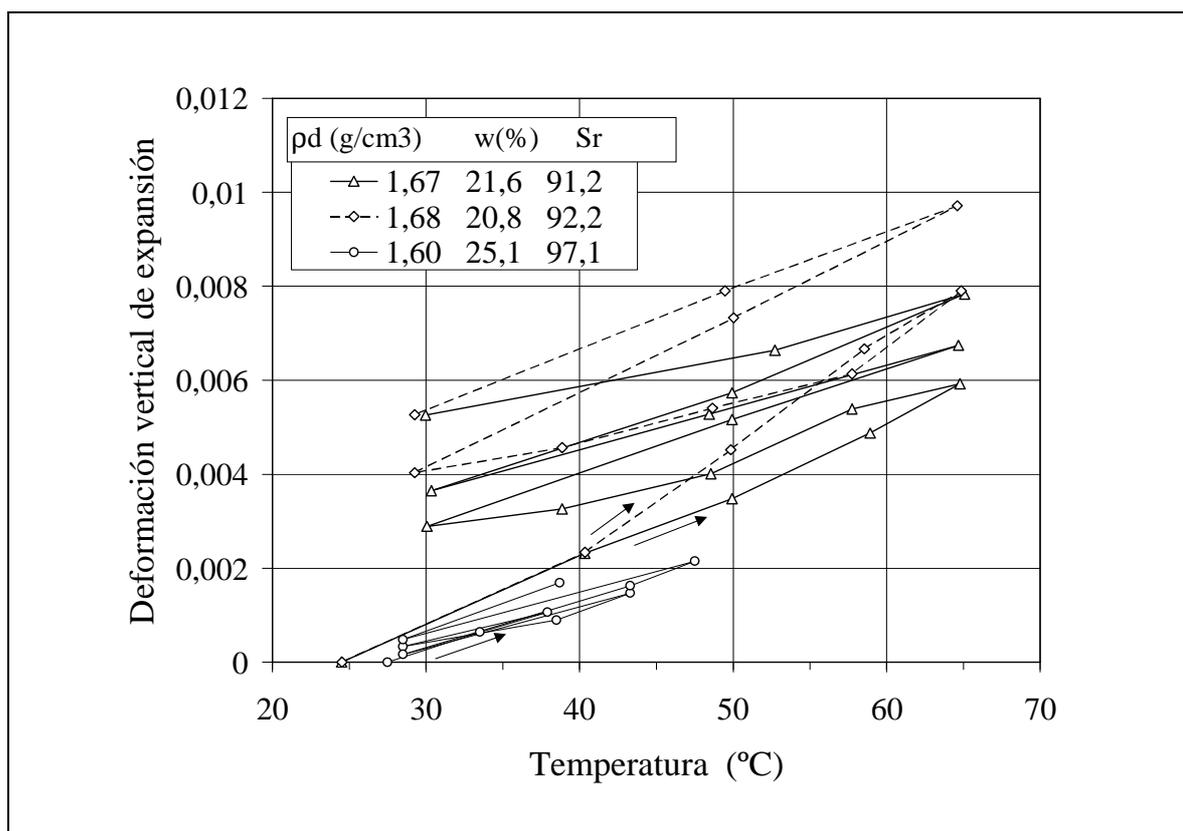


Figura 40: Resultados típicos de la medida de la deformación vertical en ciclos de calentamiento/enfriamiento sobre muestras de bentonita compactada

Con las medidas disponibles resulta difícil establecer de forma clara el papel de la densidad seca inicial de las muestras y el de la humedad de compactación. En la Figura 41 se ha recogido cómo varía la pendiente entre la deformación y los cambios de temperatura en el rango entre 20 a 50 °C durante el primer calentamiento del suelo.

Puede observarse una pequeña tendencia al aumento de dicha pendiente con la densidad seca inicial, aunque la escasez y dispersión de los resultados hace difícil la cuantificación de este efecto. Por otra parte, no se han podido extraer conclusiones claras acerca del papel del grado de saturación en el valor de la expansión de la bentonita, dado que, en general, las deformaciones con un grado de saturación de 0,80 han sido mayores que con un grado de saturación de 0,60, pero también han sido mayores que con un grado de saturación de 0,95.

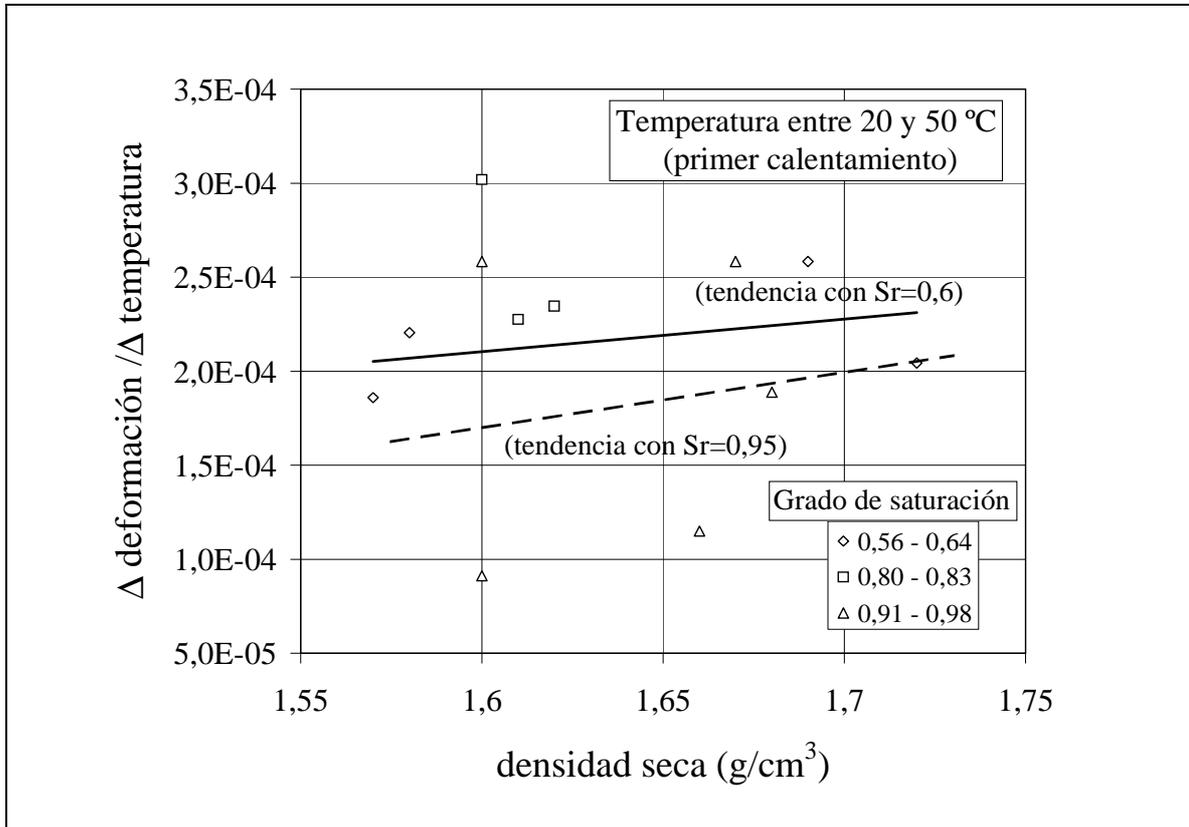


Figura 41: Relación entre las deformaciones lineales y la densidad seca para varios grados de saturación y para un rango de temperaturas entre 20 y 50°C en muestras calentadas por primera vez

La pendiente de la relación entre la deformación lineal y el aumento de temperatura se muestra en la Figura 42 para las distintas medidas realizadas. Puede observarse una dispersión importante de los resultados debida, en parte, a la yuxtaposición de resultados con muestras de distinta densidad. Esta dispersión de resultados aumenta con la temperatura. Los valores de los aumentos de volumen durante el primer calentamiento son relativamente mayores que los aumentos de volumen en calentamientos posteriores, que a su vez, son mayores que las disminuciones de volumen durante las etapas de enfriamiento. Esta gradación de valores es coherente con la acumulación de deformación en ciclos de calentamiento-enfriamiento que se puede observar en la Figura 40.

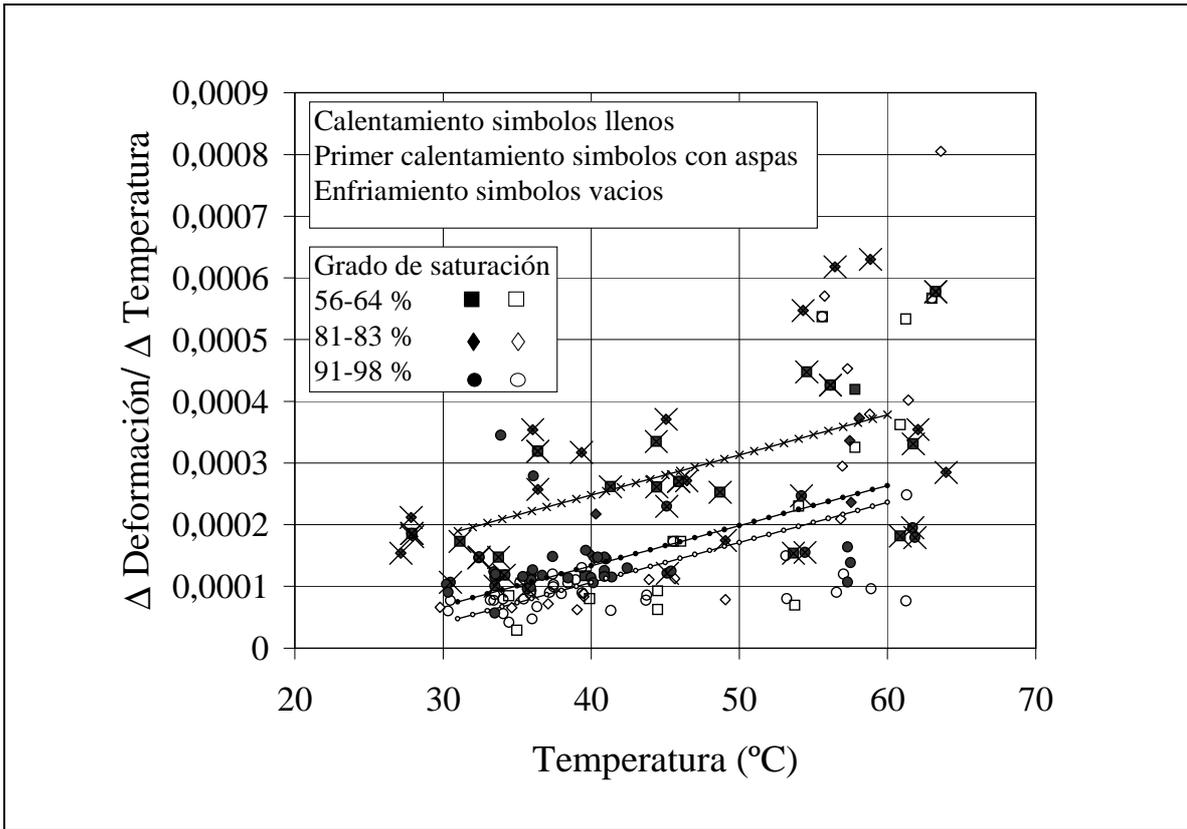


Figura 42: Valores del cociente entre aumento de deformación lineal y temperatura medidos en ensayos con diversos valores de densidad seca y grados de saturación

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

$$\Delta \epsilon_z / \Delta T = - 0,12 \cdot 10^{-4} + 6,5 \cdot 10^{-6} T \text{ (en el primer calentamiento)} \quad [25]$$

$$\Delta \epsilon_z / \Delta T = - 1,27 \cdot 10^{-4} + 6,5 \cdot 10^{-6} T \text{ (en calentamientos posteriores)} \quad [26]$$

$$\Delta \epsilon_z / \Delta T = - 1,54 \cdot 10^{-4} + 6,5 \cdot 10^{-6} T \text{ (en enfriamiento)} \quad [27]$$

Donde se ha considerado positiva la deformación de extensión. Puede observarse que el efecto de la temperatura en los cambios del valor del cambio de volumen por 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):

$$\alpha_{vol.} = \frac{\Delta \epsilon_{vol.}^{elas.}}{\Delta T} = 6,75 \cdot 10^{-5} + 1,95 \cdot 10^{-5} (T - 25) \quad [28]$$

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 rango entre los 30 y 60 °C de los ensayos) se obtiene:

$$\frac{\Delta \mathcal{E}_{vol.}^{elas.}}{\Delta T} = 4,57 \cdot 10^{-4} \quad [29]$$

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.

Los ensayos con flujo de calor descritos en el apartado 3.2 se han utilizado fundamentalmente para obtener parámetros termohidráulicos. Sin embargo, las medidas de los cambios de diámetro de las probetas que se han efectuado tras el final del ensayo pueden ser utilizadas para ilustrar el valor del cambio de volumen del suelo tras un ciclo de calentamiento-enfriamiento. Hay que tener en cuenta que las medidas se realizaban una vez enfriada la probeta y por tanto la temperatura final es la ambiente, sin embargo, el tiempo transcurrido es corto en relación con los cambios de humedad en la probeta, por lo que las humedades medidas pueden considerarse representativas de las que existían en la probeta antes de proceder al enfriamiento de la misma.

En la Figura 43 se muestra la deformación radial medida tras tres ensayos típicos de flujo de calor (ensayos 1, 4 y 6 de la Tabla VII). Puede observarse claramente cómo tras el ensayo se puede medir una retracción en el extremo de la probeta que se ha calentado más, y un hinchamiento en la zona fría de la probeta. Los valores del hinchamiento son más acusados cuanto más seca está inicialmente la probeta, sin embargo, la retracción es análoga para los diversos estados de saturación iniciales. En la Figura 44 se muestra la distribución de humedad medida sobre las probetas de los mismos ensayos mostrados en la Figura 43. Como puede observarse, la redistribución de humedad es importante y permite explicar la magnitud de la retracción medida en la zona de la probeta más cercana al calentador. De forma cualitativa, de la Figura 43 y de la Figura 44 se desprende que las deformaciones asociadas a cambios de humedad (o de succión) prevalecen sobre las deformaciones irreversibles ocasionadas por el ciclo de calentamiento/enfriamiento.

De forma simplificada, asumiendo que los cambios de volumen asociados a cambios de succión son elásticos y que el cambio de volumen asociado al ciclo térmico puede referirse a sendos coeficientes de dilatación lineal en el primer calentamiento (α_{cal}) y en el enfriamiento subsecuente (α_{enfr}), los cambios de volumen medidos tras los ensayos pueden escribirse como:

$$\Delta \mathcal{E}_v = -\frac{\kappa_s}{1+e_0} \Delta \ln(0,1+s) + 3(\alpha_{cal} - \alpha_{enfr}) \Delta T \quad [30]$$

donde κ_s es un parámetro que relaciona los cambios de volumen elásticos con los cambios de succión.

Si se utiliza la expresión que relaciona la succión con la humedad y la densidad seca inicial obtenida en los ensayos de obtención de la curva de retención realizados sin confinamiento, pueden relacionarse los cambios de humedad con los de succión. A partir de los cambios de succión estimados siguiendo el procedimiento indicado y los cambios de temperatura medidos en los ensayos, puede obtenerse el valor del parámetro κ_s y de la diferencia ($\alpha_{cal} - \alpha_{enfr}$) minimizando la diferencia entre las medidas y los valores estimados utilizando la expresión anterior. Tras este proceso de minimización los valores obtenidos han sido:

$$\kappa_s = 0,063$$

$$\alpha_{\text{cal}} - \alpha_{\text{enfr}} = 2,08 \cdot 10^{-5}$$

Aunque la dispersión propia de los ensayos pueda hacer que el valor exacto de estos parámetros pueda estar sujeto a incertidumbre, el orden de magnitud de los mismos sí permite constatar la preponderancia de las deformaciones debidas a cambios de succión frente a las deformaciones debidas a cambio de temperatura. En la Figura 45 se indica el valor de las deformaciones calculadas y medidas en un ensayo típico de flujo de calor. En la misma figura se puede observar el grado de ajuste de la estimación y cómo el valor de las deformaciones irreversibles por cambios de temperatura es muy pequeño.

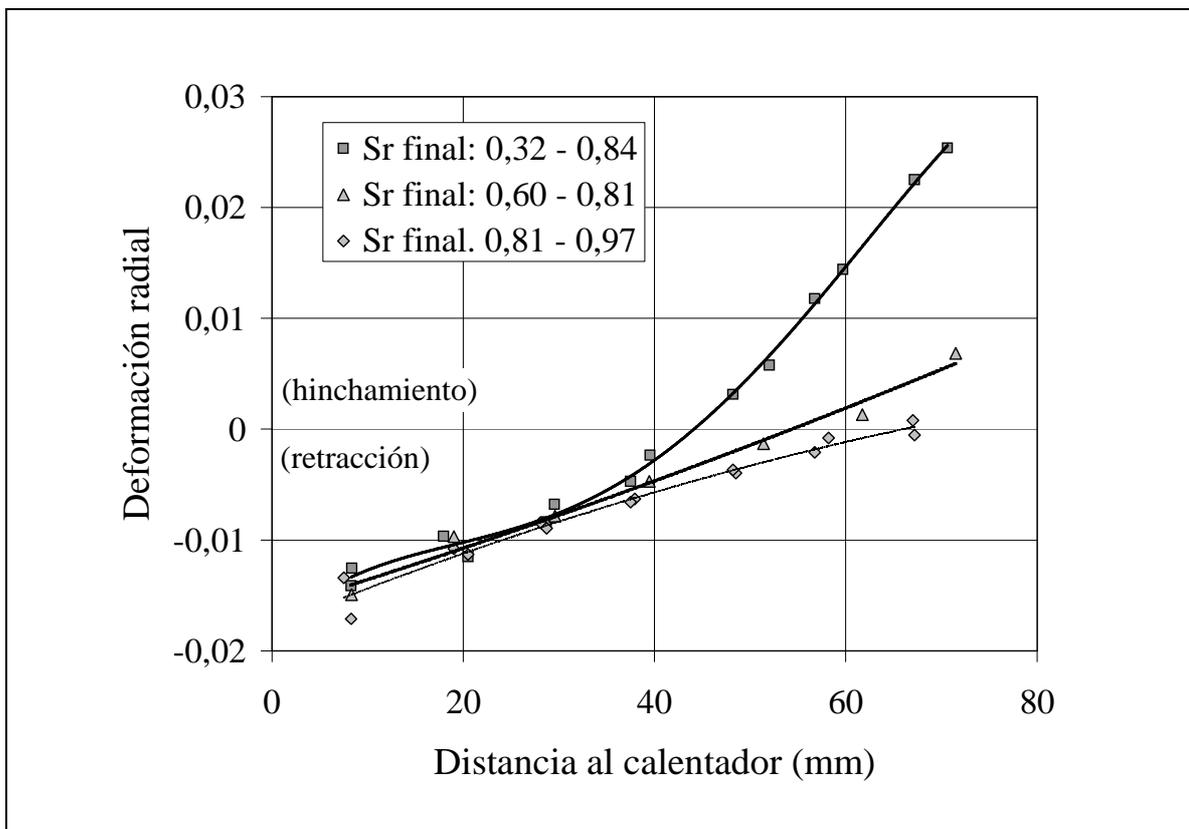


Figura 43: Deformación radial medida tras tres ensayos típicos de flujo de calor (ensayos 1, 4 y 6 de la Tabla VII)

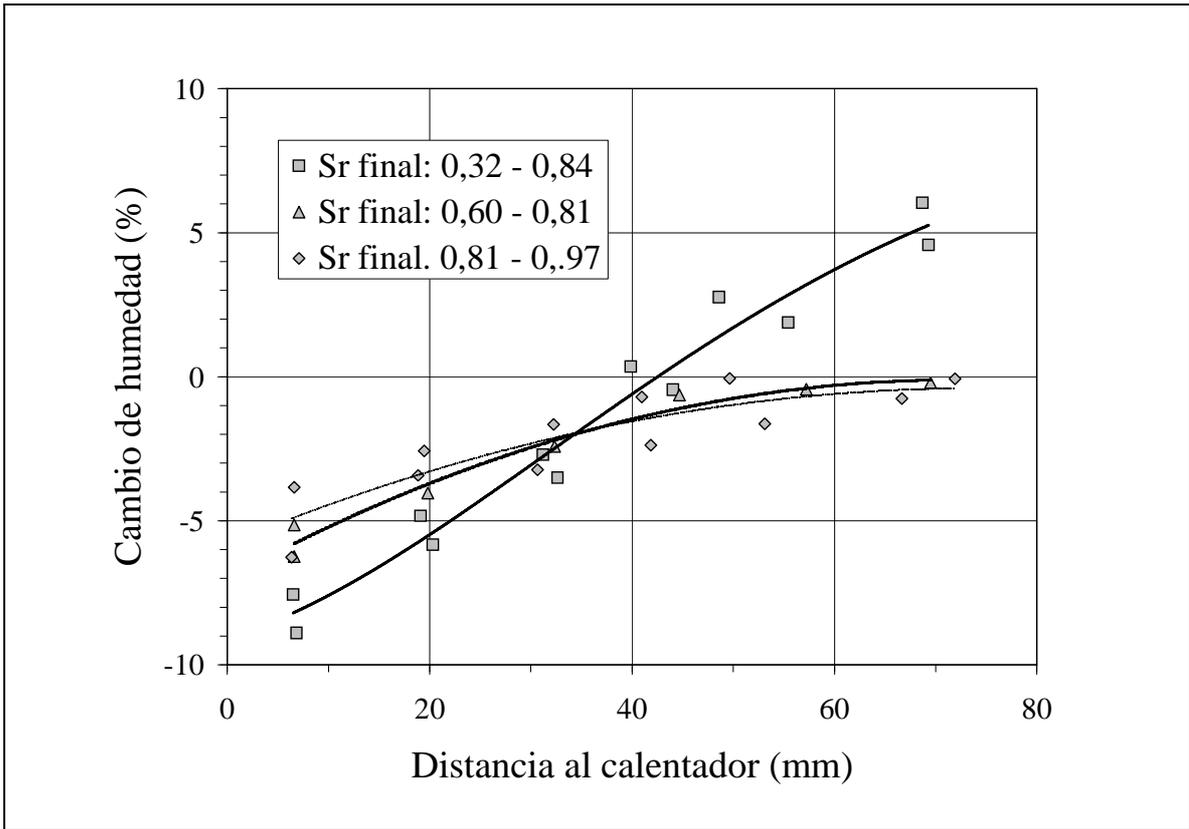


Figura 44: Cambios de humedad medidos tras tres ensayos típicos de flujo de calor (ensayos 1, 4 y 6 de la Tabla VII)

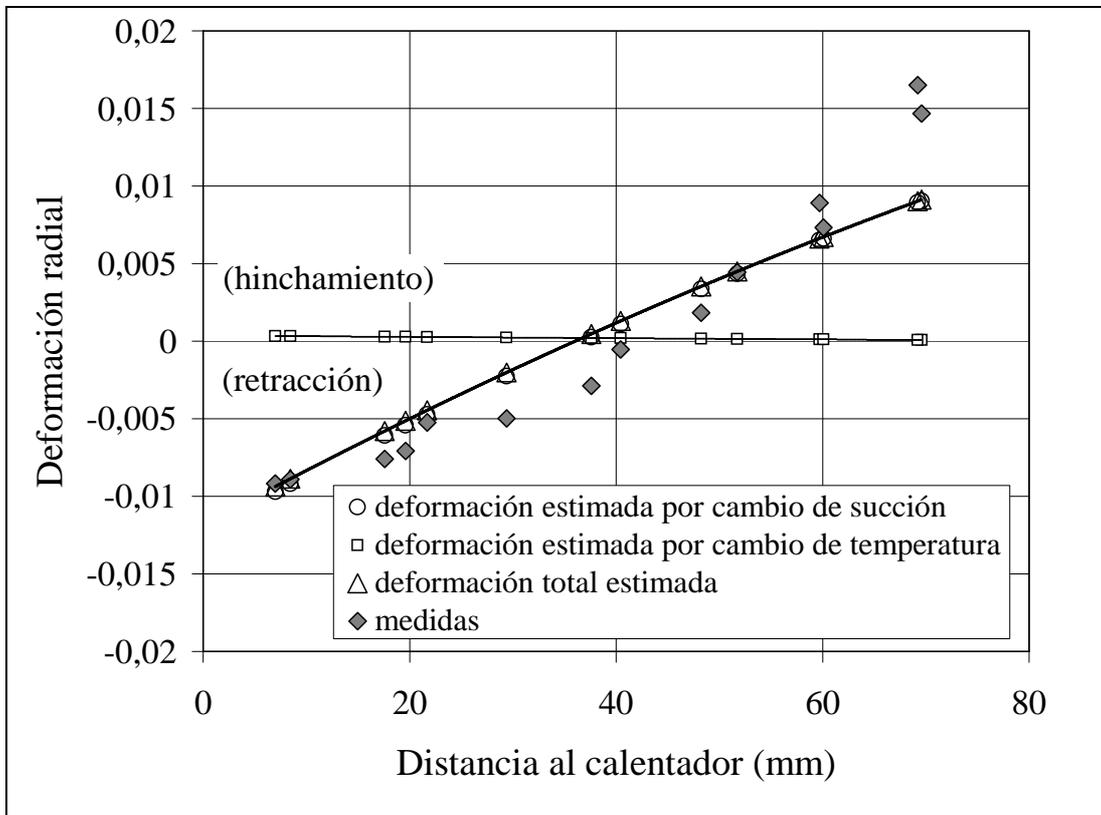


Figura 45: Deformaciones medidas y calculadas en un ensayo de flujo de calor (ensayo 2 de la Tabla VII)

3.4. DEFORMACIONES POR SATURACIÓN BAJO CARGA

Tanto en CIEMAT como en UPC se han realizado ensayos de inundación de muestras de bentonita compactada a diferentes densidades secas. En el caso de UPC la saturación se ha realizado con agua destilada (Tabla Anexo II- XVI) mientras que en el caso de CIEMAT se ha utilizado además agua salina y agua granítica (Tabla Anexo I- XXIX a Tabla Anexo I- XXXI).

En la Figura 46 se muestran las deformaciones de hinchamiento por saturación medidas en muestras compactadas con diferentes densidades secas (entre 1,6 y 1,8 g/cm³) y con la humedad higroscópica, cargadas bajo diferentes cargas verticales en condiciones edométricas y posteriormente inundadas con agua destilada. Estas deformaciones pueden aproximarse utilizando la siguiente regresión:

$$\varepsilon = 0,469 + 0,1935 \log \sigma - 0,366 \rho_d \quad [31]$$

donde la tensión vertical, σ , está expresada en MPa, la densidad seca, ρ_d , en g/cm³ y la deformación, ε , es positiva cuando es de compresión. De esta ecuación se puede obtener aproximadamente la carga necesaria (σ_h^1 , en MPa) para que, con ella aplicada, el cambio de volumen experimentado por el suelo al saturarse sea nulo:

$$\sigma_h^1 = 0,00377 \cdot 77,888^{\rho_d} \quad [32]$$

La Figura 47 muestra las deformaciones medidas en los diversos ensayos que se han realizado utilizando el agua con la composición química indicada en la Tabla I. El efecto de la composición del agua en las deformaciones de hinchamiento ha sido pequeño.

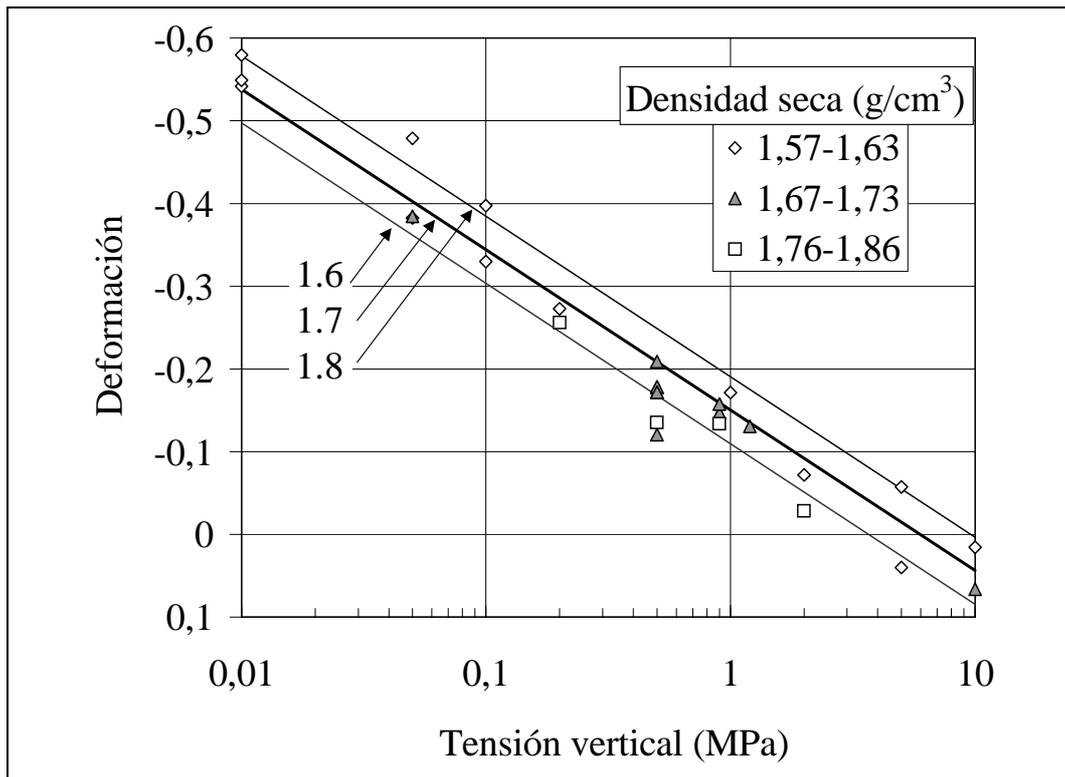


Figura 46: Deformación medida y correlaciones obtenidas en los ensayos de hinchamiento bajo carga realizados en UPC y CIEMAT

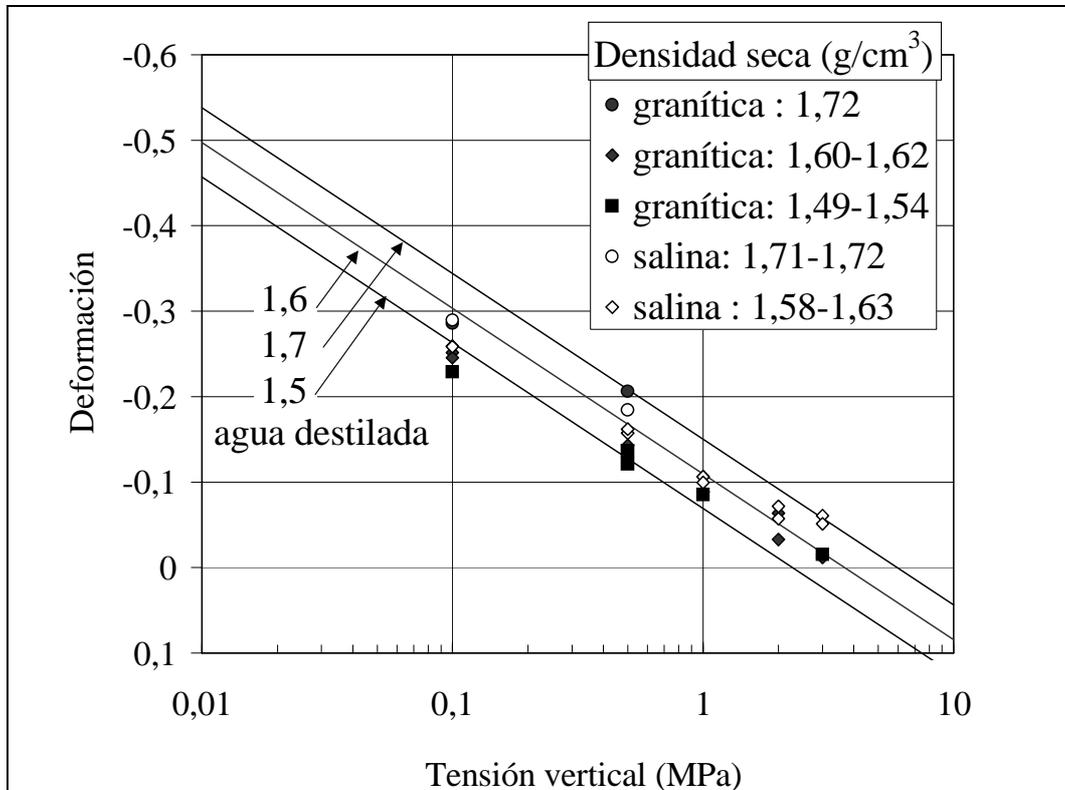


Figura 47: Deformaciones de hinchamiento bajo carga en muestras saturadas con diversos tipos de agua

En la Figura 48 se muestran los cambios de volumen experimentados por la bentonita durante la fase de compactación con la humedad higroscópica, en la posterior descarga y recarga y en la saturación final. Aunque la dispersión de los resultados es importante, se observa que el valor final del índice de poros tiende a ser parecido para muestras con diversas densidades tras el proceso de compactación sometidas a la misma carga vertical. La relación entre el índice de poros final (e) y la tensión mantenida (σ en MPa) durante la fase de saturación es la siguiente:

$$e = 0,78 - 0,309 \log \sigma \quad [33]$$

De la misma figura, se desprende que en condiciones higroscópicas (humedad del orden del 12 al 13 %), se obtiene un valor de $-\delta e / \delta(\log \sigma)$ de aproximadamente 0,5 durante la fase de compactación y del orden 0,065 durante la fase de descarga y recarga. Hay que señalar que en ensayos edométricos convencionales (saturados) realizados por CIEMAT en la bentonita S2 se obtuvieron valores del índice de compresión (C_c) de 0,38.

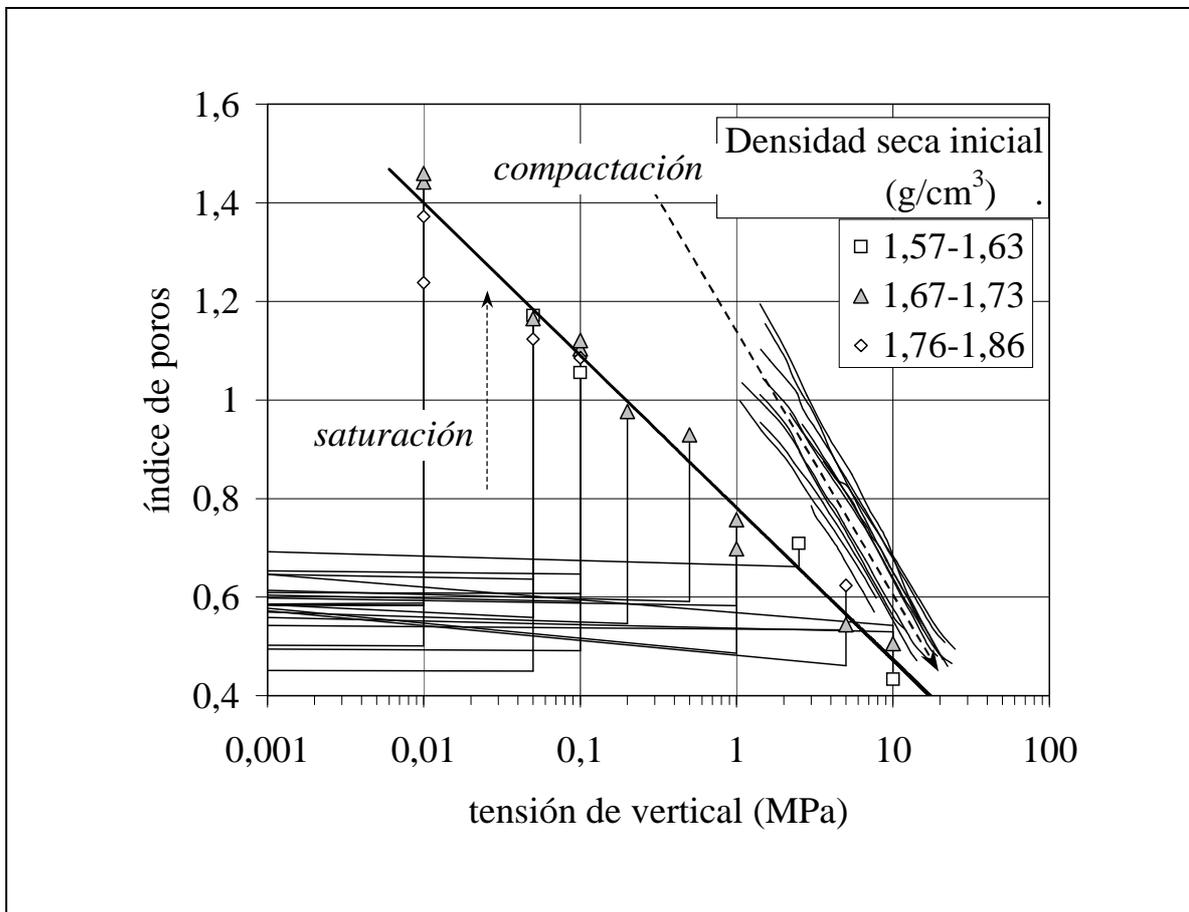


Figura 48: Evolución del volumen de poros en los ensayos de hinchamiento bajo carga

3.5. PRESIÓN DE HINCHAMIENTO

La determinación de la presión de hinchamiento se realizó en CIEMAT mediante el empleo de células edométricas en las que se controlaba la carga para mantener la deformación del suelo nula durante el proceso de saturación de las muestras. En la Figura 49 se muestra el valor de la presión de hinchamiento desarrollada por muestras

compactadas inicialmente con diversas densidades secas y saturadas con agua destilada (Tabla Anexo I- XXXII). A partir de estos resultados la presión de hinchamiento (σ_s en MPa) puede calcularse como:

$$P_s = \exp(6,77 \rho_d - 9,07) \quad [34]$$

Como se puede observar en la Figura 49, a medida que la densidad seca es más alta la dispersión de las medidas es mayor. Esto es debido a que, para ese rango de densidades, el material es muy rígido y pequeños cambios de deformación implican importantes cambios en la carga a aplicar.

Se han realizado también medidas de la presión de hinchamiento en muestras saturadas con aguas de distinta salinidad (Tabla Anexo I- XXXIII) y en muestras talladas en diferentes direcciones a partir de bloques compactados saturadas con agua destilada (Tabla Anexo I- XXXIV y Tabla Anexo I- XXXV). En la Figura 50 se puede comprobar cómo tanto el efecto de la salinidad del agua como el de la dirección del tallado de las probetas extraídas de bloques es del mismo orden que la dispersión propia de los ensayos mostrados en la Figura 49.

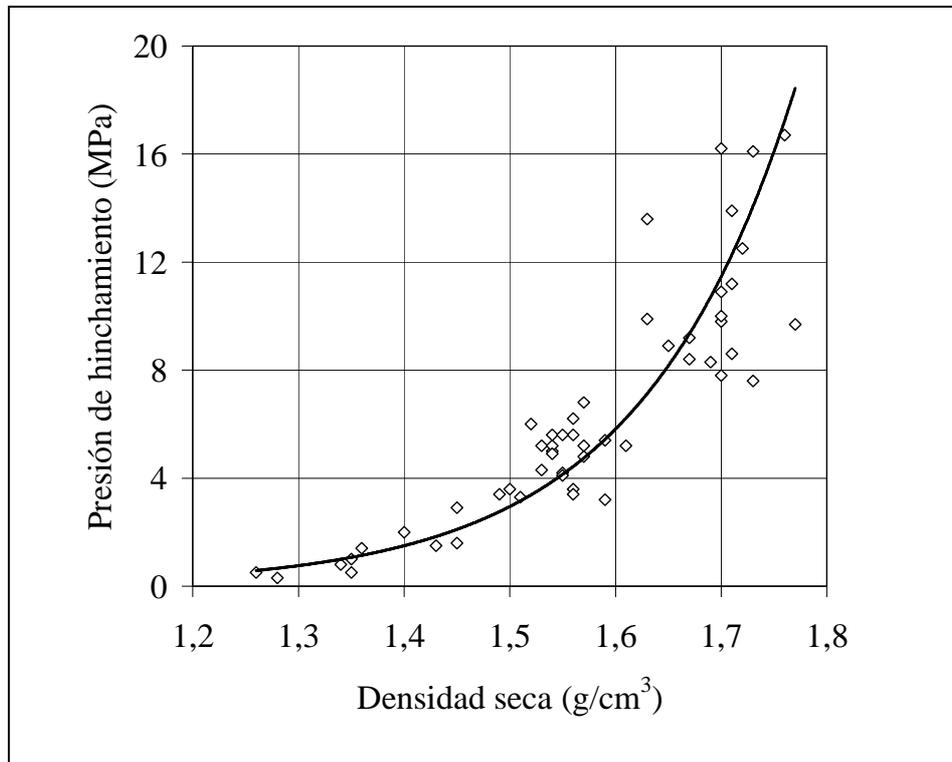


Figura 49: Valores de la presión de hinchamiento obtenidos en muestras compactadas con diversas densidades secas y saturadas con agua destilada

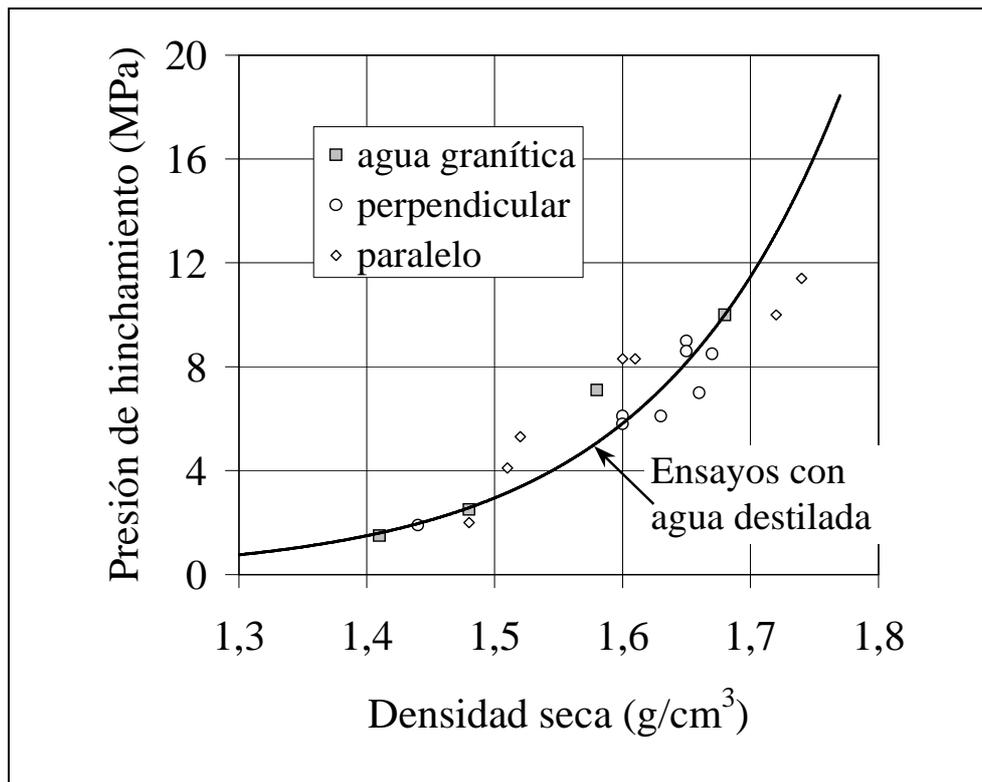


Figura 50: Comparación de las presiones de hinchamiento obtenidas en muestras saturadas con agua granítica (línea continua) y las obtenidas en muestras saturadas con agua granítica y en muestras saturadas con agua destilada pero talladas a partir de bloques en la dirección paralela y perpendicular a la de compactación

En la Figura 51 se puede observar cómo el tipo de trayectoria influye en el estado final de la bentonita. Para una misma carga vertical final, el volumen de poros en un ensayo de presión de hinchamiento (donde se mantiene constante durante el ensayo) es mayor que el volumen de poros que alcanza una muestra que se carga a la misma presión (la final del ensayo de presión de hinchamiento) y posteriormente se satura manteniendo esa carga constante. Para una misma densidad inicial la presión de hinchamiento es superior a la presión que hay que aplicar para que no hinche el suelo en un ensayo de hinchamiento bajo carga. Este comportamiento se puede observar en la Figura 52 donde se muestra, en función de la densidad seca inicial, el valor de presión de hinchamiento junto al valor de la carga que hay que aplicar para que no se produzca ningún cambio de volumen, tal como se ha derivado de los resultados de los ensayos de hinchamiento bajo carga.

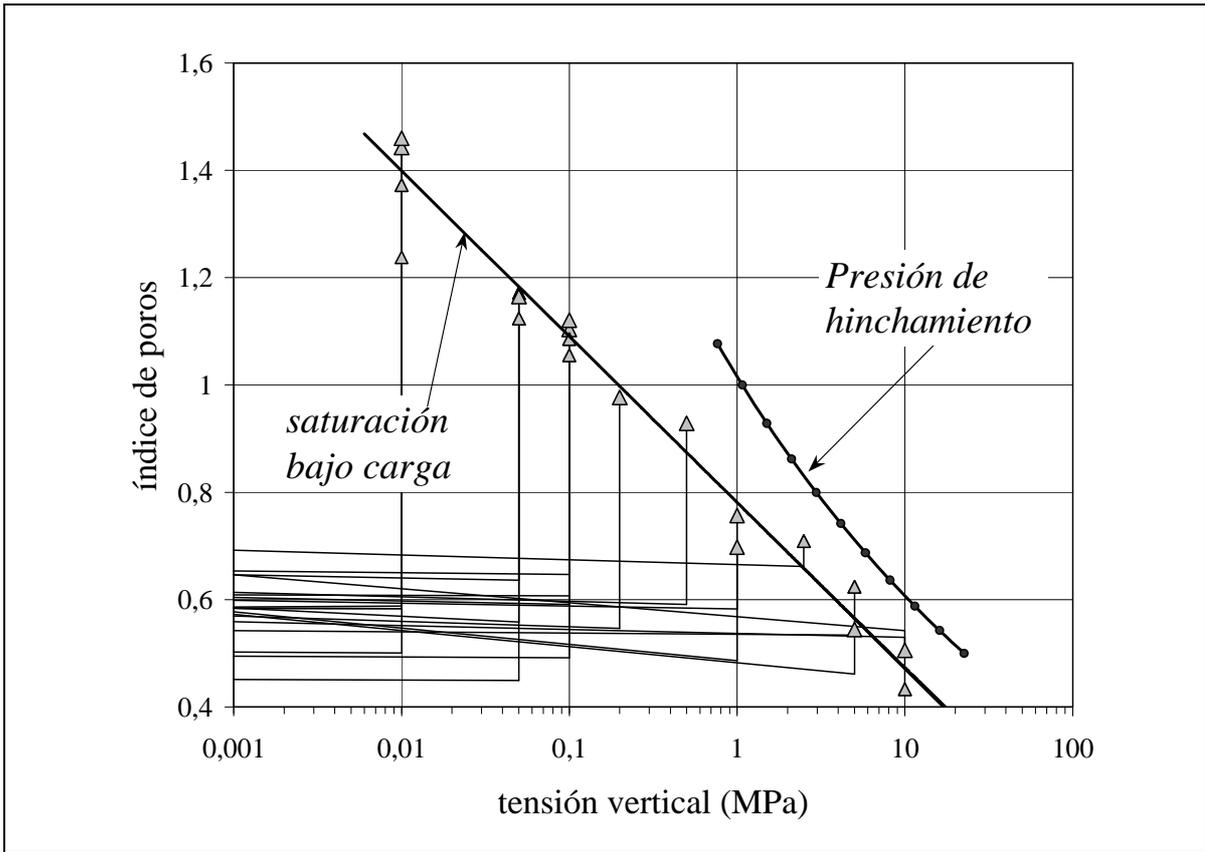


Figura 51: Comparación de los estados finales de tensión y volumen en los ensayos de hinchamiento bajo carga constante y de presión de hinchamiento

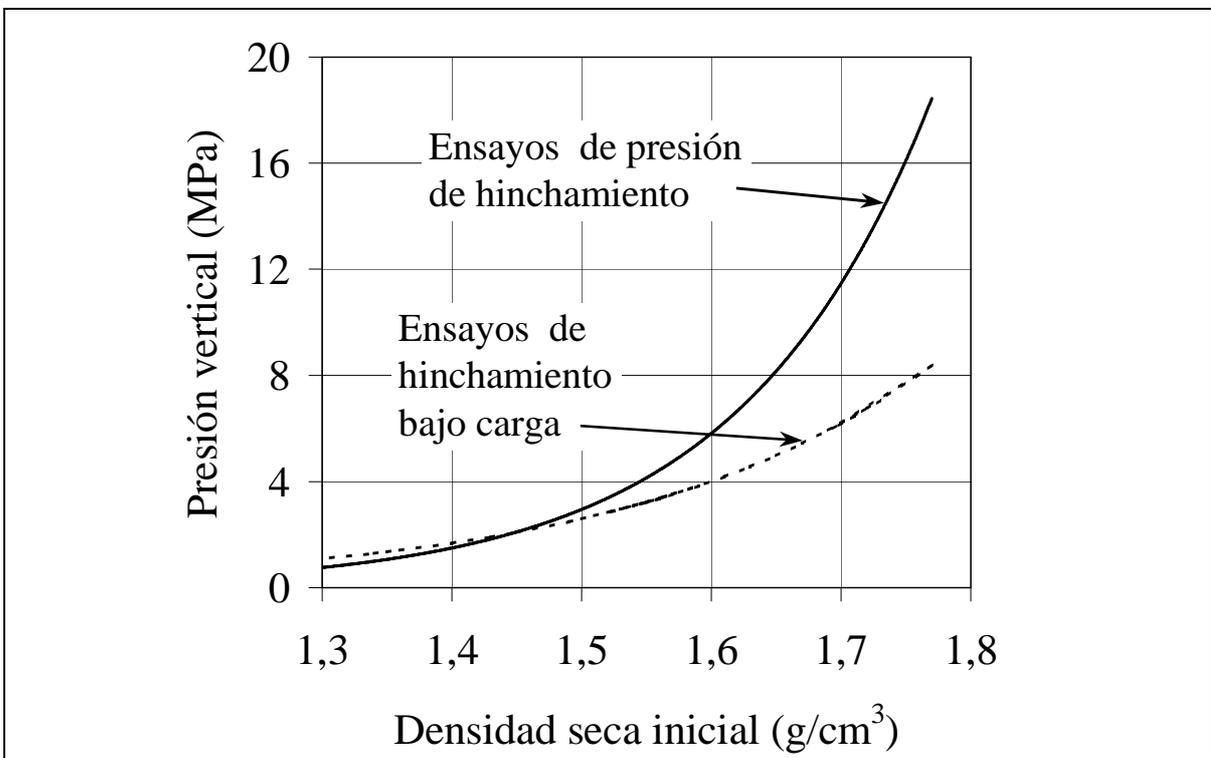


Figura 52: Comparación entre el valor de la presión de hinchamiento y la carga necesaria para que no se produzca ningún cambio de volumen al saturar el suelo

4. AVANCE EN EL CONOCIMIENTO DEL COMPORTAMIENTO THM

4.1. ENSAYOS EDMÉTRICOS A TEMPERATURA AMBIENTE

Se han realizado ensayos edométricos con control de la succión tanto en el laboratorio de CIEMAT como en la UPC. En CIEMAT se ha utilizado disoluciones de ácido sulfúrico para fijar la succión por encima de 3 MPa y la técnica de la traslación de ejes con nitrógeno a presión para succiones por debajo de 14 MPa (Tabla Anexo I- XXXVI a Tabla Anexo I- L). En la UPC la succión se ha fijado utilizando disoluciones de ácido sulfúrico y disoluciones saturadas con distintas sales (Tabla Anexo II- XVII a Tabla Anexo II- XXIII). En CIEMAT la densidad seca inicial de las muestras ensayadas ha sido de 1,70 g/cm³ y en la UPC esta densidad ha sido de 1,63 g/cm³.

Se han realizado dos tipos de ensayo. En el primer tipo de ensayo se han realizado trayectorias de humedecimiento y carga tratando de reproducir los cambios experimentados por la bentonita cerca de la roca (reducción de la succión seguida de un aumento de la carga) y del calentador (aumento de la carga seguido de una reducción de la succión). En algunos ensayos del segundo tipo de trayectorias se ha reducido la succión mientras se aplicaba la carga necesaria para mantener el valor de la deformación permitida a la muestra en un nivel de deformación dado; si este nivel es el de la deformación nula, los ensayos son análogos a los de la obtención de la presión de hinchamiento pero con control de la succión.

4.1.1. Ensayos sin control de la deformación máxima

Las trayectorias seguidas en estos ensayos se muestran en la Figura 53. Salvo en los tramos de secado hasta succiones por encima de la higroscópica y las descargas al finalizar los ensayos, en el resto de las diferentes fases de los ensayos, las acciones aplicadas a las muestras han sido de aumento de carga y de reducción de succión.

En la Figura 54 se muestran los cambios de volumen experimentados por la bentonita en los diversos ensayos edométricos. Se aprecia claramente el importante aumento del volumen de poros al humedecer la bentonita (especialmente bajo cargas reducidas) y cómo la rigidez de la bentonita decrece al disminuir la succión a la que se aplica la carga. La disminución de la rigidez está asociada tanto al efecto de la succión como al hecho de que, tras la reducción de la succión, se ha producido un importante aumento del volumen de huecos que ha alterado la estructura inicial de la bentonita haciéndola más abierta y deformable. En la Figura 55 y en la Figura 56 se muestran los cambios de volumen por efecto del aumento de carga y disminución de la succión en los ensayos realizados en CIEMAT y la UPC, respectivamente. Los cambios de volumen durante la descarga final del ensayo se indican en la Figura 57. En esta figura puede observarse el efecto de la succión en el valor final de estas deformaciones de hinchamiento. En la Figura 58 se muestra un ciclo de carga y descarga bajo succión nula tras un proceso de hidratación de la bentonita donde se aprecia que las deformaciones por descarga tienden a ser importantes. En dicha figura puede apreciarse cómo la pendiente de la rama de descarga es mayor que la pendiente de la rama de carga en el rango de presión vertical por debajo de 0,5 MPa.

En la Figura 59 se muestran los cambios de volumen experimentados por la bentonita en trayectorias de secado y humedecimiento por encima de la succión inicial de las muestras. Puede observarse que estas 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 (ver Figura 55b y Figura 56b).

Por otra parte, las deformaciones remanentes tras el ciclo 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 56a 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 424 MPa y la otra no.

La Figura 60 muestra el índice de poros alcanzado tras la saturación en los ensayos de inundación bajo carga y en los ensayos con control de succión. Aunque la dispersión de los resultados es apreciable (debido a las diferentes técnicas y tipos de equipos empleados y al efecto de las diferentes trayectorias de succión y carga que se han seguido) puede constatar una buena coherencia entre los resultados obtenidos en ambos laboratorios con diferentes equipos.

En la Figura 55a y en la Figura 56a puede constatar que al cargar la bentonita tras un proceso de humedecimiento, la rigidez de la bentonita, para niveles de carga bajos, se reduce ligeramente cuanto menor es la succión aplicada. Sin embargo, el efecto mayor del cambio de succión en las curvas que relacionan el índice de poros con el logaritmo de la carga se aprecia en la posición del cambio de su pendiente, lo que indica que se produce un cambio importante de comportamiento. En el contexto de un modelo elastoplástico, este cambio corresponde al cruce de una superficie de fluencia y la carga a la que se produce puede interpretarse como una presión de preconsolidación aparente asociada a esa succión ($p_0(s)$). Por debajo de esa carga, el comportamiento del suelo es elástico mientras que cuando se supera el comportamiento pasa a ser elastoplástico y se empiezan a manifestar deformaciones irreversibles en ciclos de carga y descarga. Puede comprobarse que, de acuerdo con lo propuesto en el modelo de Gens y Alonso (1992), a medida que se produce un aumento de volumen por efecto de la reducción de la succión, el valor de esa presión de preconsolidación disminuye. En la Figura 61 se muestran los valores obtenidos para esa presión en trayectorias de aumento de carga con diferentes valores de la succión aplicada.

Hay que señalar que, en las trayectorias de reducción de succión, sólo se ha observado un fenómeno análogo de cambio brusco de comportamiento en aquellas muestras en las que se ha realizado un secado previo, cuando recuperan su succión inicial (Figura 59).

En la Figura 62 se ha recogido el valor de las pendientes de las curvas de cambio de volumen en los procesos de carga y descarga. Puede constatar un cambio importante de comportamiento según la carga aplicada esté por encima o por debajo de la presión de preconsolidación aparente asociada a cada succión. La variación con la succión de la rigidez es mucho más evidente en la zona elastoplástica que en la zona elástica. El efecto de la densidad inicial se manifiesta en una mayor deformabilidad frente al aumento de la carga en la zona elastoplástica, mientras que en la zona elástica este efecto es inapreciable. Por otra parte, en algunos casos, pueden apreciarse altos valores

de los cambios de volumen medidos durante la descarga final de los ensayos a succión nula. Como se ha visto en la Figura 58, los valores de las pendientes de las ramas de descarga pueden ser algo mayores que las pendientes de las ramas de carga en la zona elástica.

De forma aproximada pueden establecerse las siguientes relaciones para obtener los cambios de volumen por efecto de los cambios de la tensión vertical (σ):

Carga:

- Sin preconsolidación ($\sigma = p_0(s)$) :

densidad seca inicial del orden de 1,70 g/cm³:

$$\delta e / \delta(\ln \sigma) = \lambda_{ed}(s) = 0,0112 \ln(s+p_{atm}) - 0,0919 \quad [35]$$

densidad seca inicial del orden de 1,63 g/cm³:

$$\delta e / \delta(\ln \sigma) = \lambda_{ed}(s) = -0,14 \text{ (para } s = 3,7 \text{ MPa)} \quad [36]$$

- Con preconsolidación ($\sigma < p_0(s)$) :

densidad seca inicial del orden de 1,70 g/cm³:

$$\delta e / \delta(\ln \sigma) = \kappa_{ed}(s) = 0,0029 \ln(s+p_{atm}) - 0,0193 \quad [37]$$

densidad seca inicial del orden de 1,63 g/cm³:

$$\delta e / \delta(\ln \sigma) = \kappa_{ed}(s) = -0,01 \text{ (para } s > 100 \text{ MPa)} \quad [38]$$

Descarga:

densidad seca inicial del orden de 1,70 g/cm³:

$$\delta e / \delta(\ln \sigma) = \kappa_{ed0} = -0,043 \text{ (con succión nula)} \quad [39]$$

densidad seca inicial del orden de 1,63 g/cm³:

$$\delta e / \delta(\ln \sigma) = \kappa_{ed0} = -0,01 \text{ (s = 3,7 MPa)} \quad [40]$$

$$\delta e / \delta(\ln \sigma) = \kappa_{ed0} = -0,085 \text{ (con succión nula)} \quad [41]$$

En la Figura 63 se puede observar el importante efecto de la carga aplicada sobre el valor de la pendiente que relaciona los cambios de índice de poros con el logaritmo de la succión en las trayectorias de humedecimiento. La deformación por hidratación aumenta de forma casi lineal al disminuir el logaritmo de la carga aplicada. En los ensayos de obtención de la curva de retención sin confinamiento (Apartado 2.5.1) se ha medido un valor de $\Delta e / \Delta \ln(s)$ de $-0,168$. El efecto de la densidad inicial en estos valores puede reconocerse aunque no es muy grande, especialmente cuando la carga aplicada es superior a 0,1 MPa. Como se ha indicado en la Figura 59, los cambios de volumen al aumentar la succión son pequeños y el efecto de la carga aplicada sobre ellos es poco significativo. De forma aproximada, pueden considerarse las siguientes expresiones para los cambios de volumen asociados a cambios de succión:

Secado ($s > s_0 \approx 120$ MPa):

densidad seca inicial del orden de $1,70 \text{ g/cm}^3$:

$$\delta e / \delta(\ln(s+p_{\text{atm}})) = \lambda_{\text{ed } s} = -0,015 \quad [42]$$

densidad seca inicial del orden de $1,63 \text{ g/cm}^3$:

$$\delta e / \delta(\ln(s+p_{\text{atm}})) = \lambda_{\text{ed } s} = -0,023 \quad [43]$$

Humedecimiento:

- ($s < s_0 \approx 120$ MPa)

densidad seca inicial del orden de $1,70 \text{ g/cm}^3$:

$$\delta e / \delta(\ln(s+p_{\text{atm}})) = \beta_{\text{ed}}(\sigma) = 0,017 \ln(\sigma) - 0,0352 \quad [44]$$

densidad seca inicial del orden de $1,63 \text{ g/cm}^3$:

$$\delta e / \delta(\ln(s+p_{\text{atm}})) = \beta_{\text{ed}}(\sigma) = 0,0124 \ln(\sigma) - 0,0248 \quad [45]$$

- ($s > s_0 \approx 120$ MPa)

densidad seca inicial del orden de $1,70 \text{ g/cm}^3$:

$$\delta e / \delta(\ln(s+p_{\text{atm}})) = \kappa_{\text{ed } s} = -0,015 \quad [46]$$

densidad seca inicial del orden de $1,63 \text{ g/cm}^3$:

$$\delta e / \delta(\ln(s+p_{\text{atm}})) = \kappa_{\text{ed } s} = -0,023 \quad [47]$$

Considerando que la reducción de la presión de preconsolidación $p_0(s)$ está ligada al aumento del volumen de poros irrecuperable durante la fase de hidratación (una gran parte de las deformaciones medidas al reducirse la succión van a ser irrecuperables), puede considerarse:

$$(\lambda_{\text{ed}}(s) - \kappa_{\text{ed}}(s)) \Delta \ln(p_0(s)) = (\beta_{\text{ed}}(\sigma) - \kappa_{\text{ed } s}) \Delta \ln(s+p_{\text{atm}}) \quad [48]$$

Con los valores indicados anteriormente para una densidad inicial del orden de $1,70 \text{ g/cm}^3$, suponiendo que la fase de hidratación parte de una succión inicial de 120 MPa y se desarrolla bajo una carga de $0,1$ MPa, la presión de preconsolidación inicial se reduciría por un factor del orden de $12,5$ para cargas bajo una succión de 10 MPa y por un factor del orden de 35 en el caso de una succión de 1 MPa. Estos factores son consecuentes con los bajos valores de la presión p_0 que se muestran en la Figura 61.

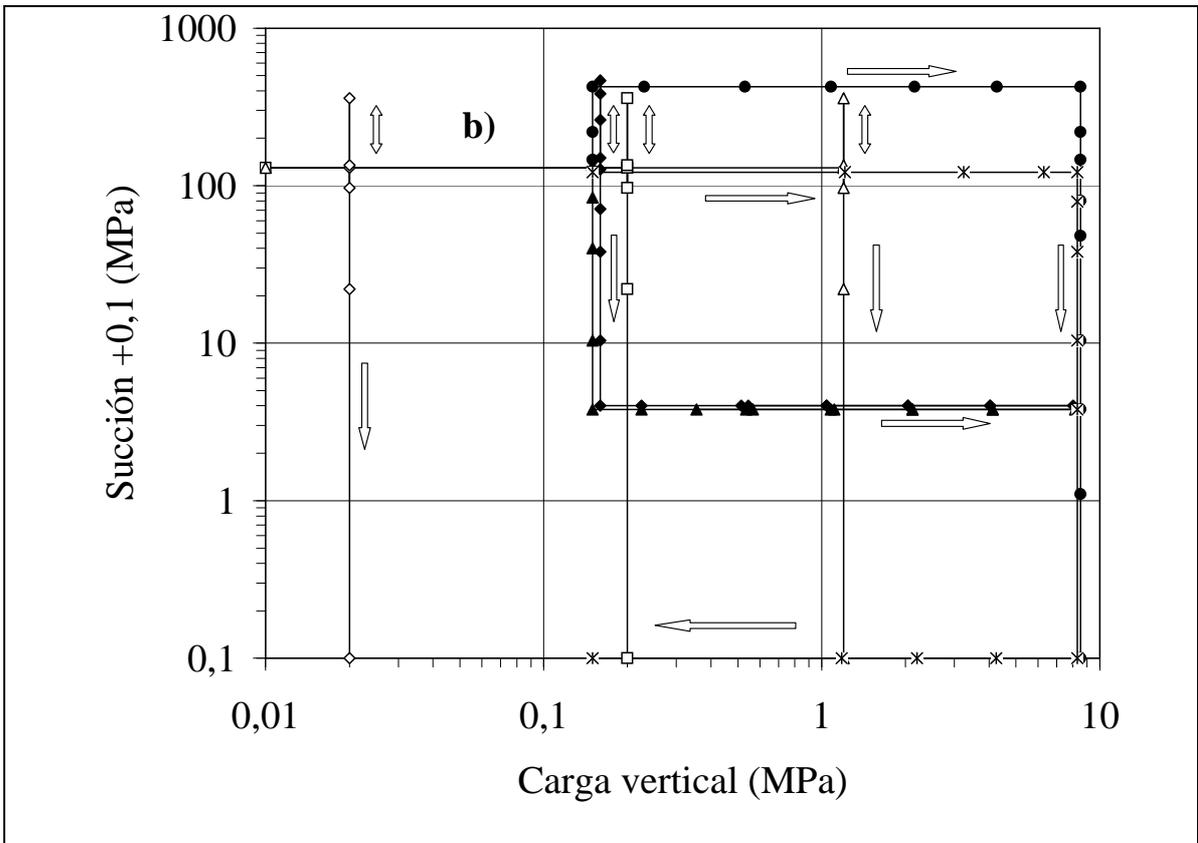
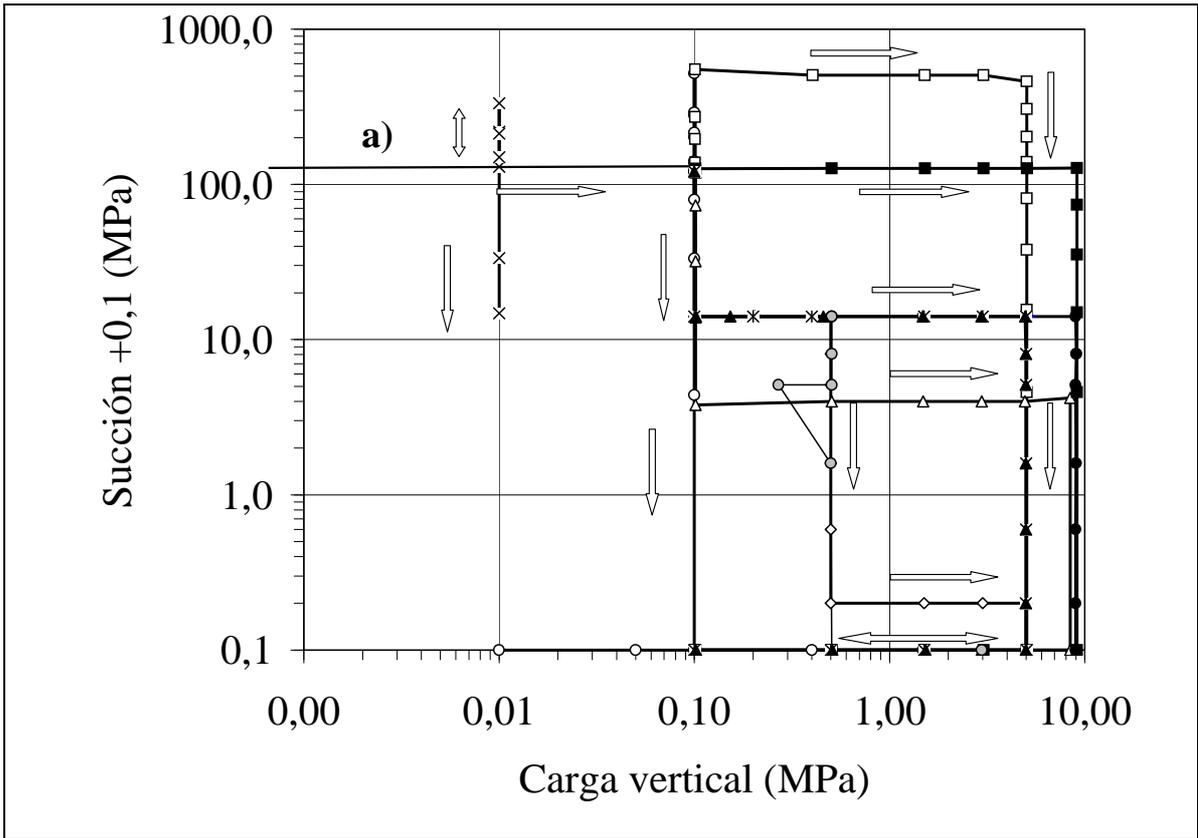


Figura 53: Trayectorias seguidas en los ensayos edométricos con control de succión: a) ensayos realizados en CIEMAT, b) ensayos realizados en UPC

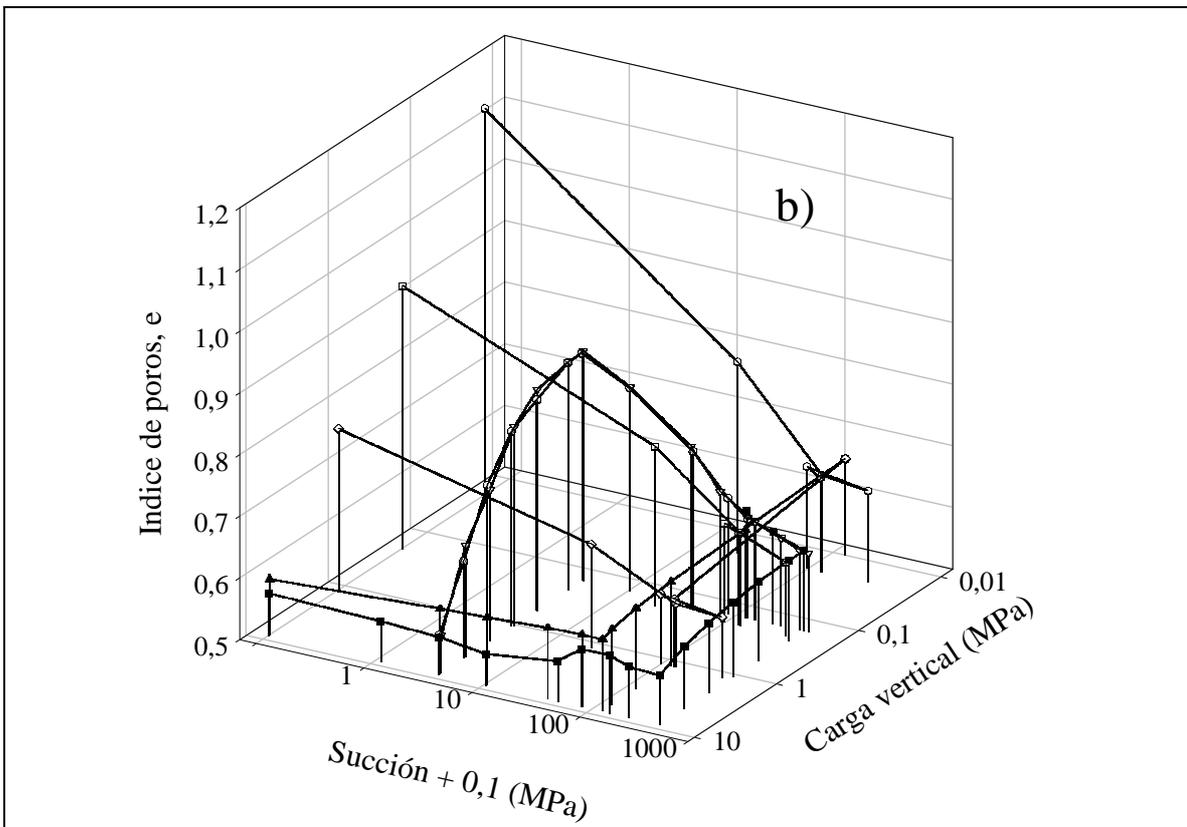
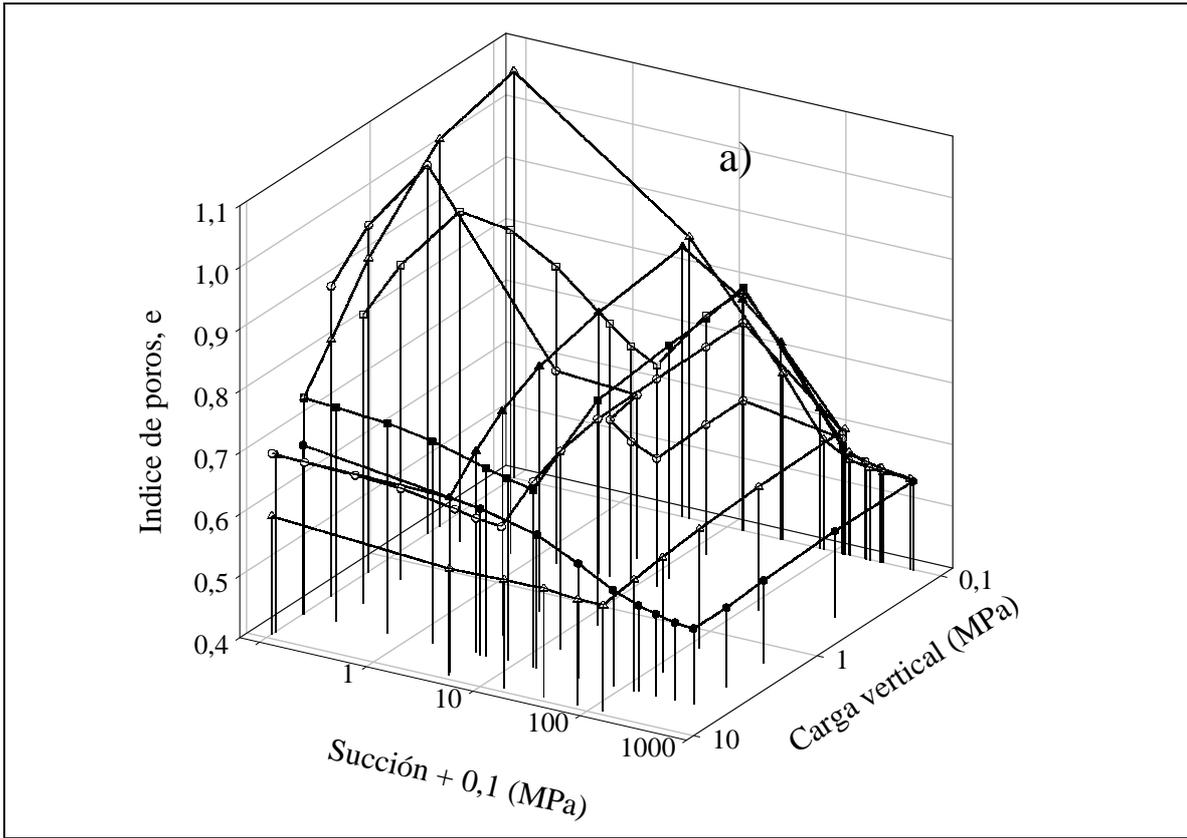


Figura 54: Cambios de volumen medidos en los ensayos edométricos con control de succión: a) ensayos realizados en CIEMAT, b) ensayos realizados en UPC

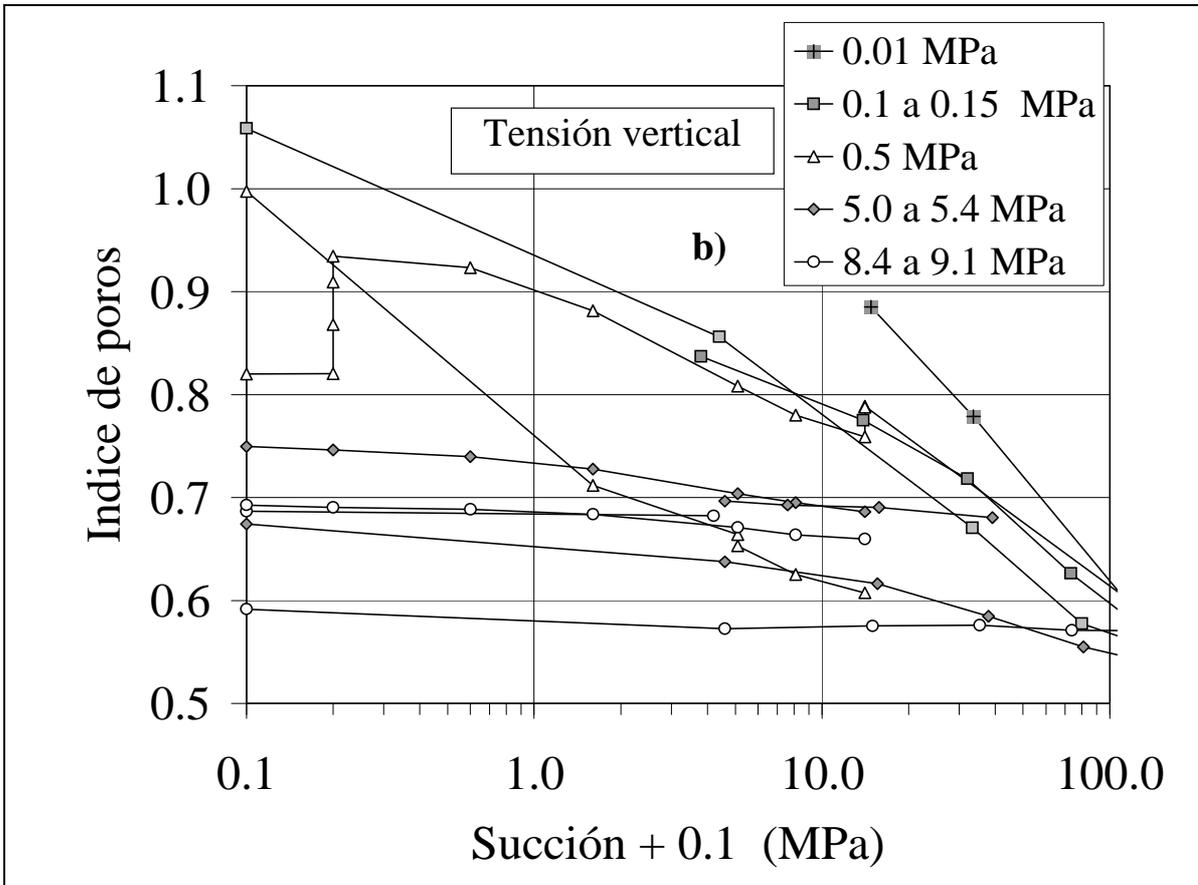
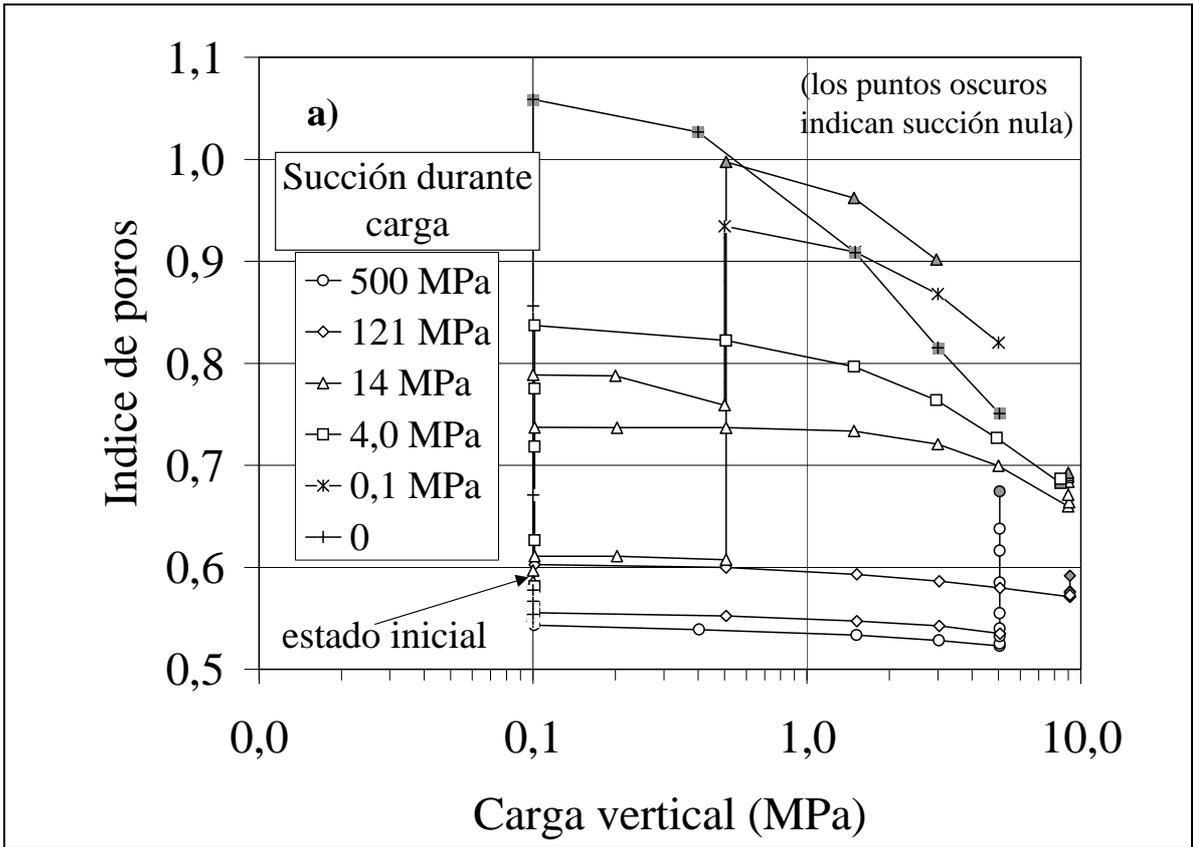


Figura 55: Cambio de volumen al aumentar la carga (a) y reducir la succión (b) en los ensayos realizados en CIEMAT

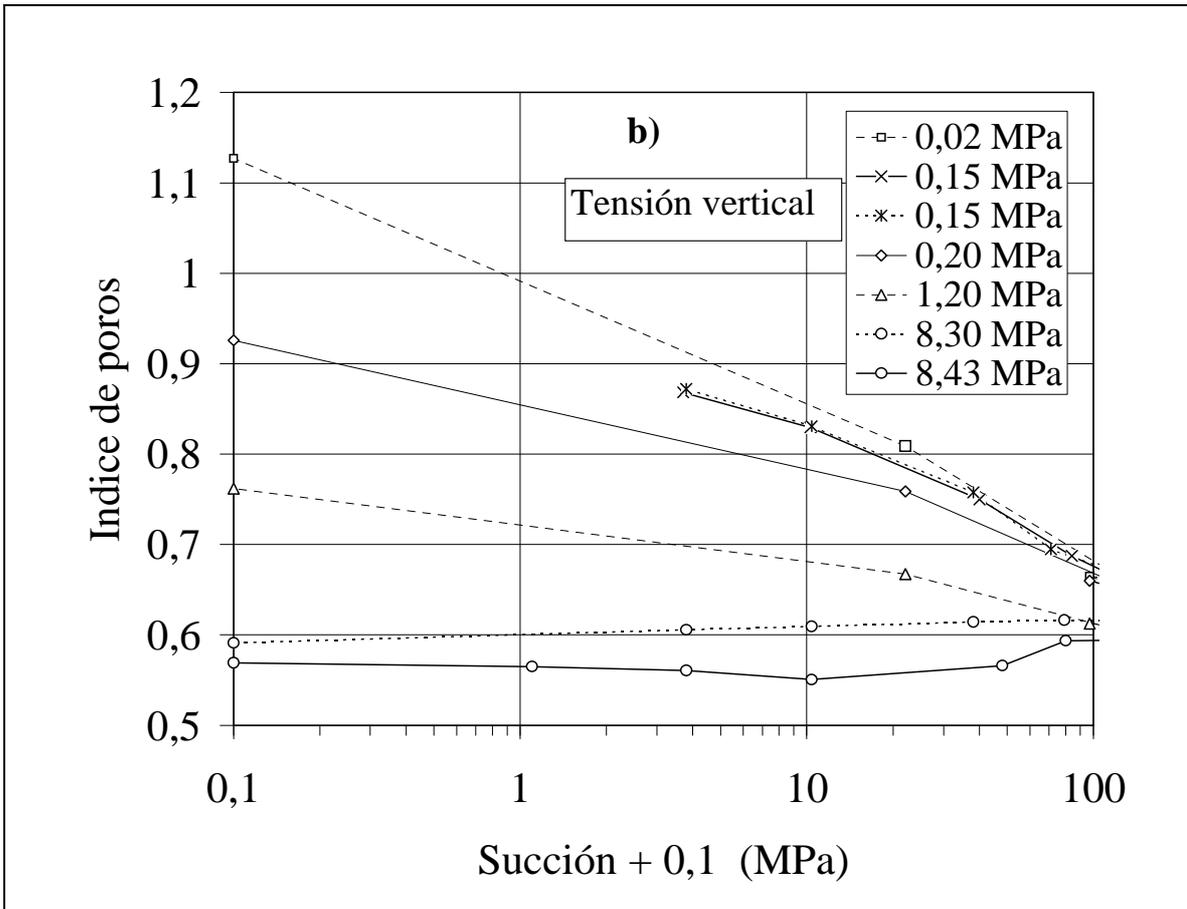
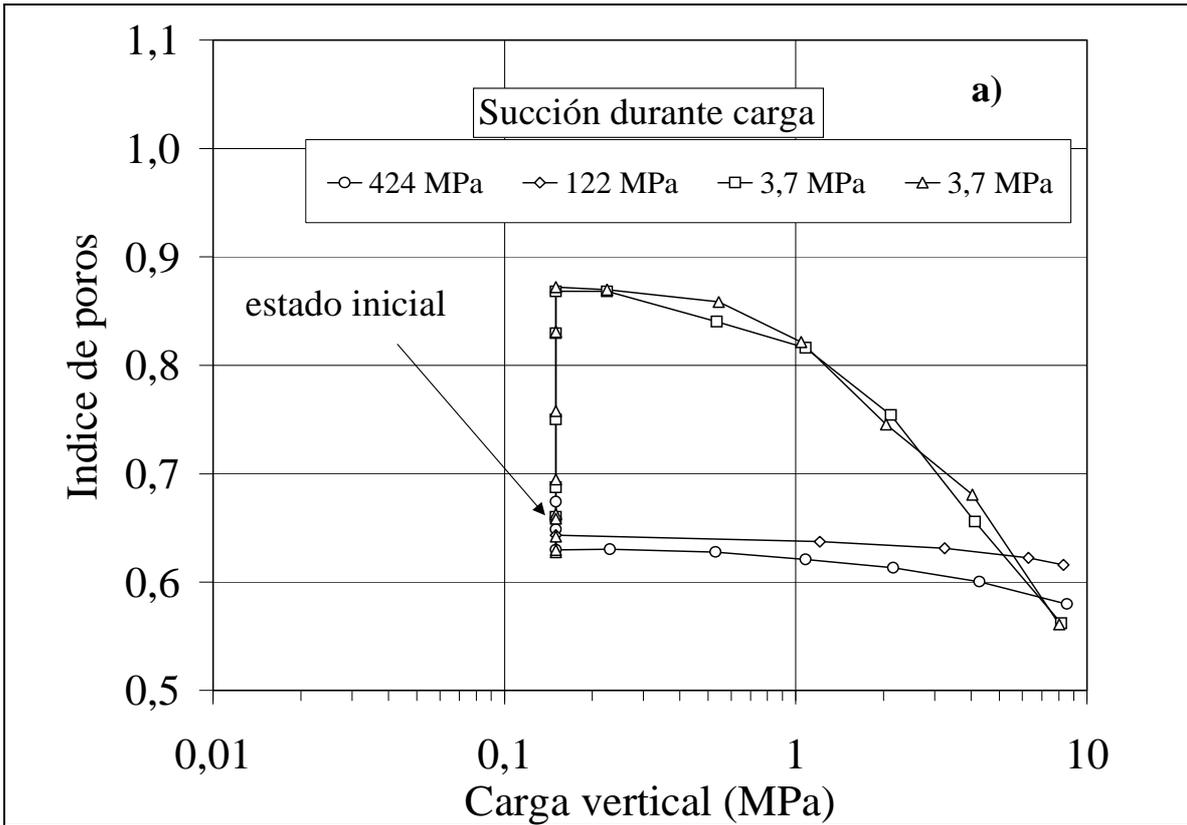


Figura 56: Cambio de volumen al aumentar la carga (a) y reducir la succión (b) en los ensayos realizados en UPC

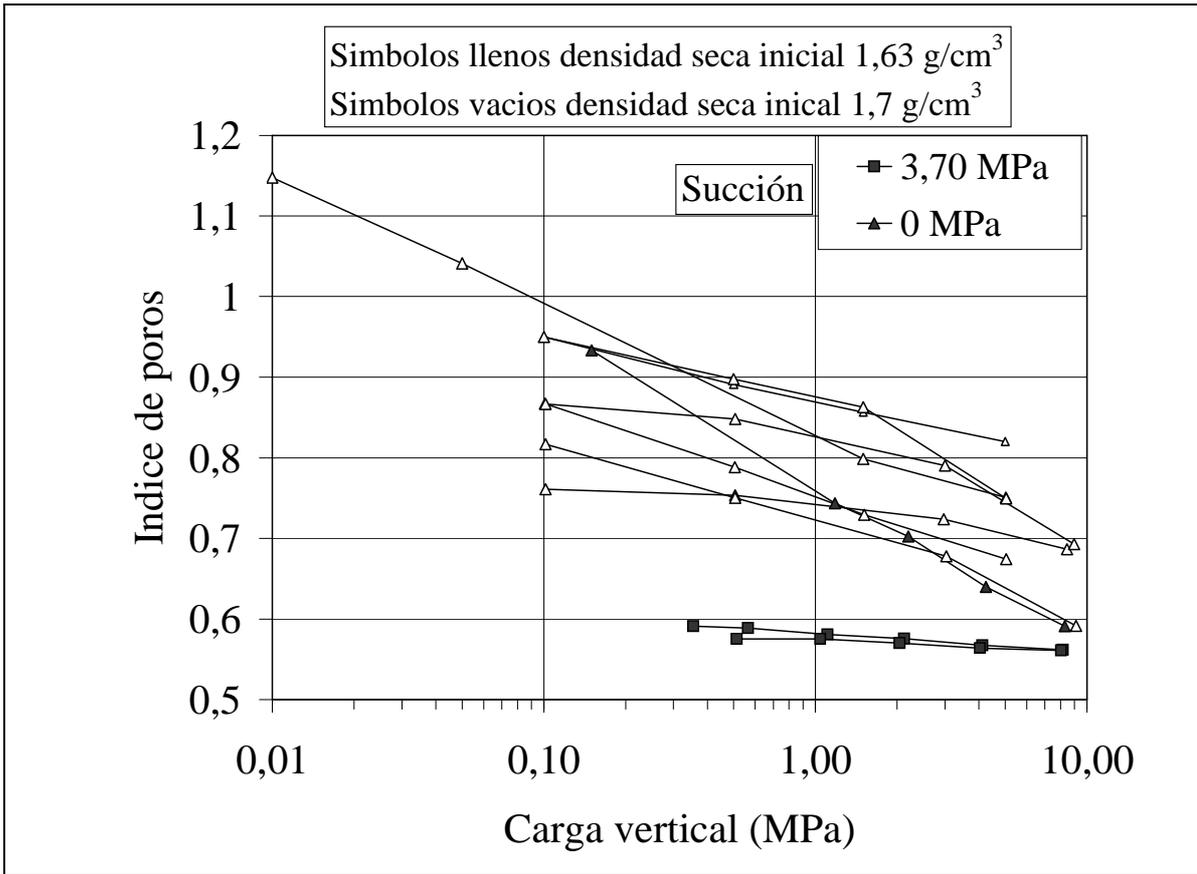


Figura 57: Cambios de volumen durante las descargas al finalizar los ensayos edométricos

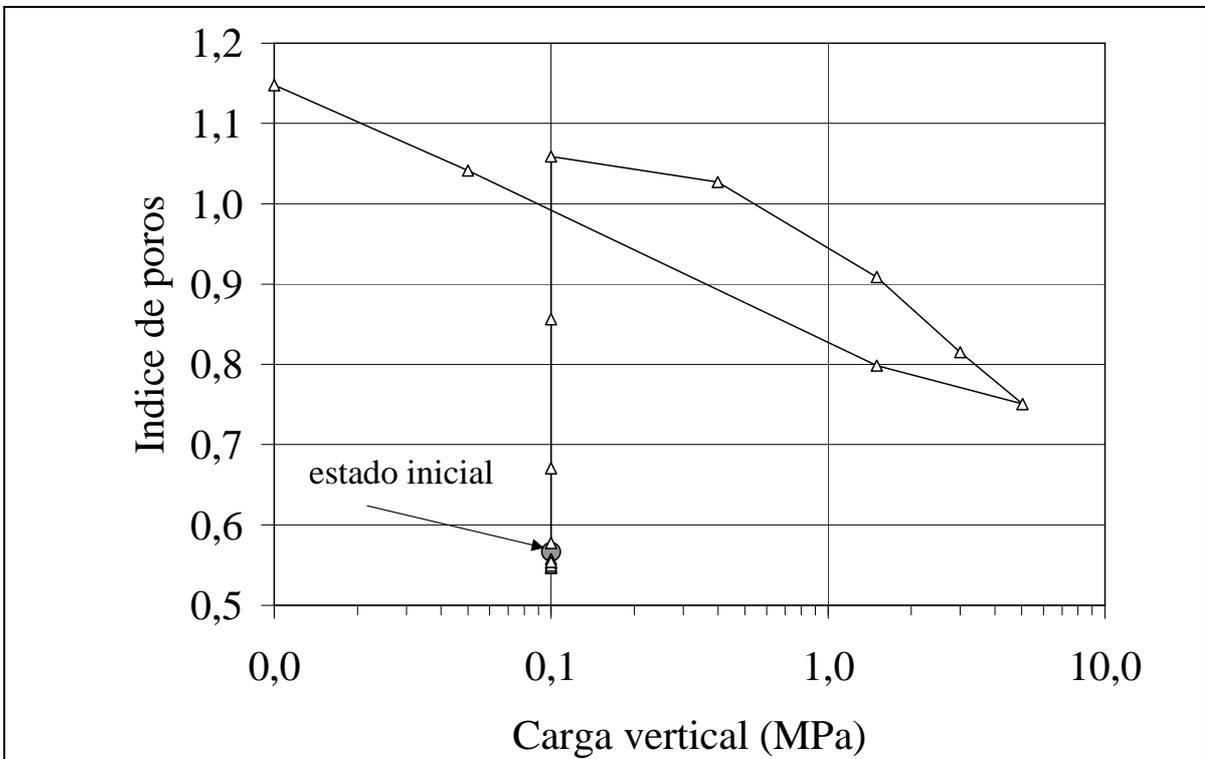


Figura 58: Cambios de volumen experimentados por una muestra con densidad inicial de 1,70 g/cm³, sometida a una trayectoria de saturación bajo una carga de 0,1 MPa y a un posterior ciclo de carga y descarga bajo succión nula

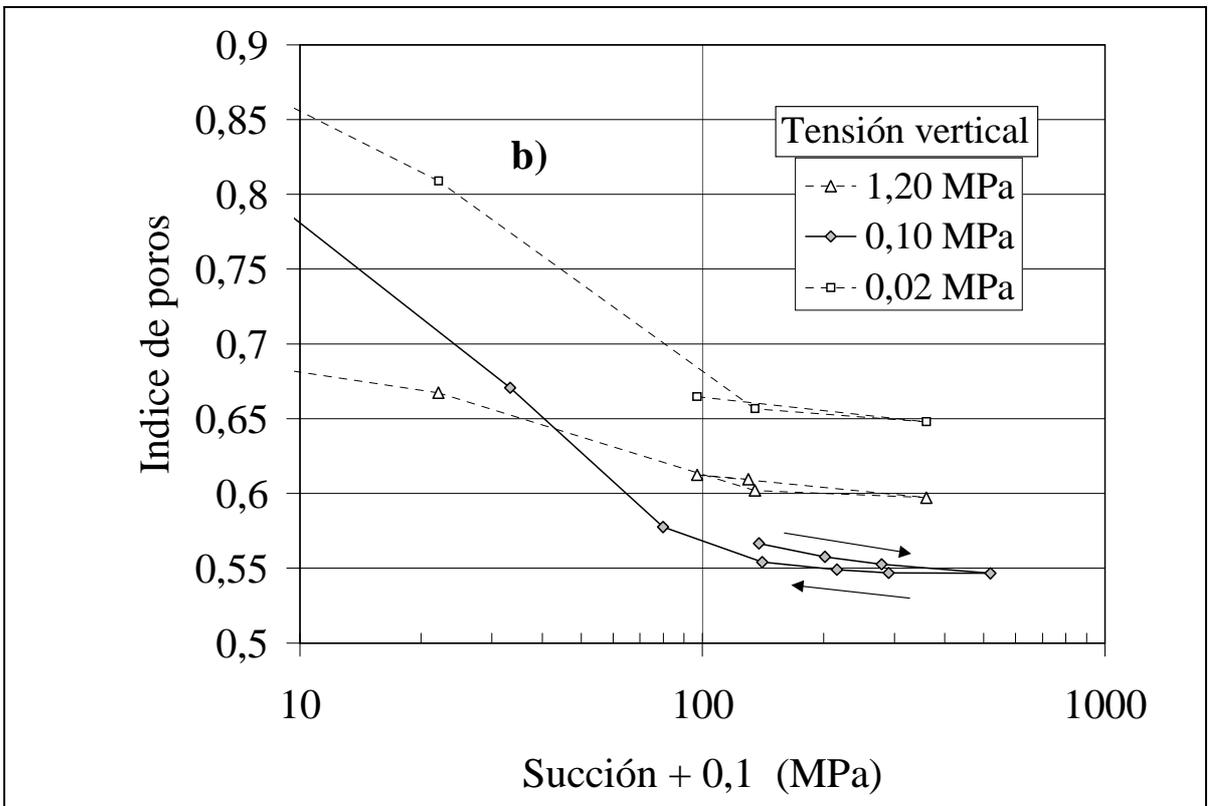
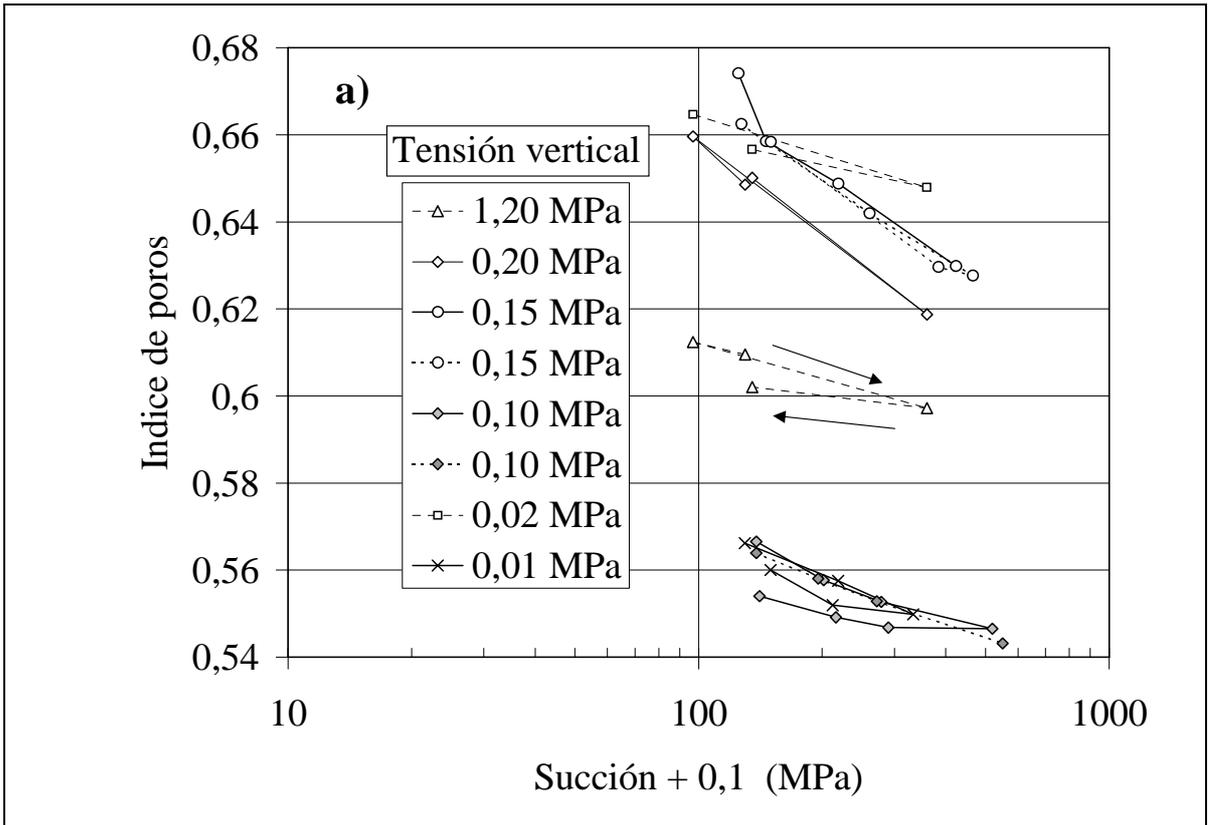


Figura 59: Cambios de volumen en trayectorias de secado / humedecimiento por encima de la succión inicial de las muestras: a) detalle en el rango alto de succión, b) cambio de tendencia al reducir la succión a un valor por debajo del inicial

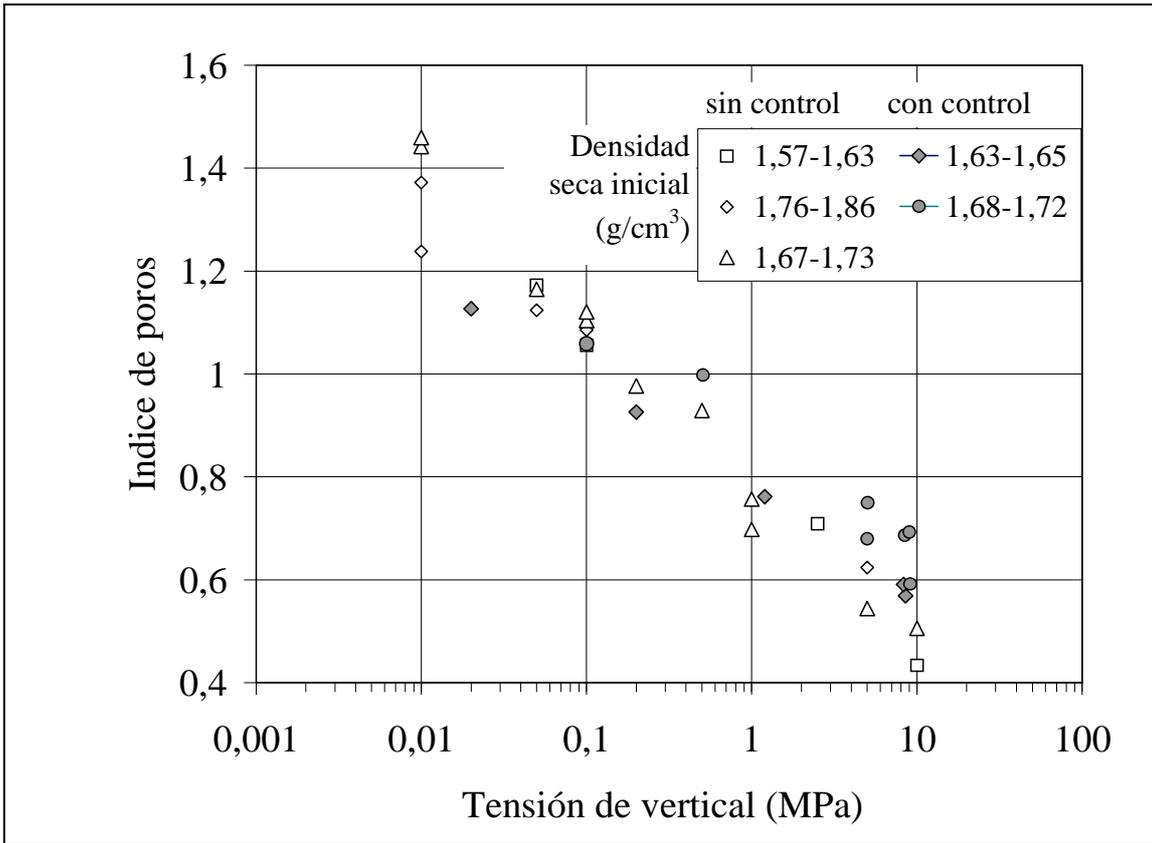


Figura 60: Comparación entre el volumen de poros tras la saturación, en ensayos de inundación bajo carga y en ensayos con trayectorias de succión controlada

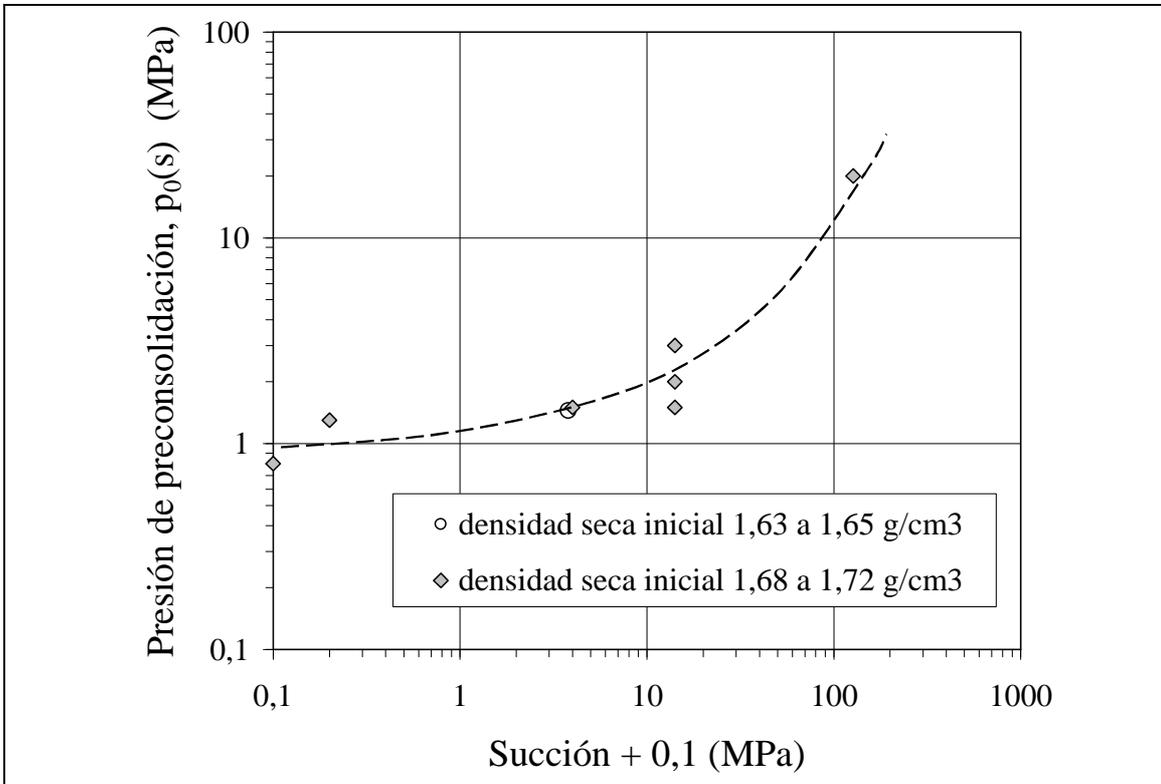


Figura 61: Valor de la presión de preconsolidación obtenida en trayectorias de carga tras humedecimiento a diferentes succiones

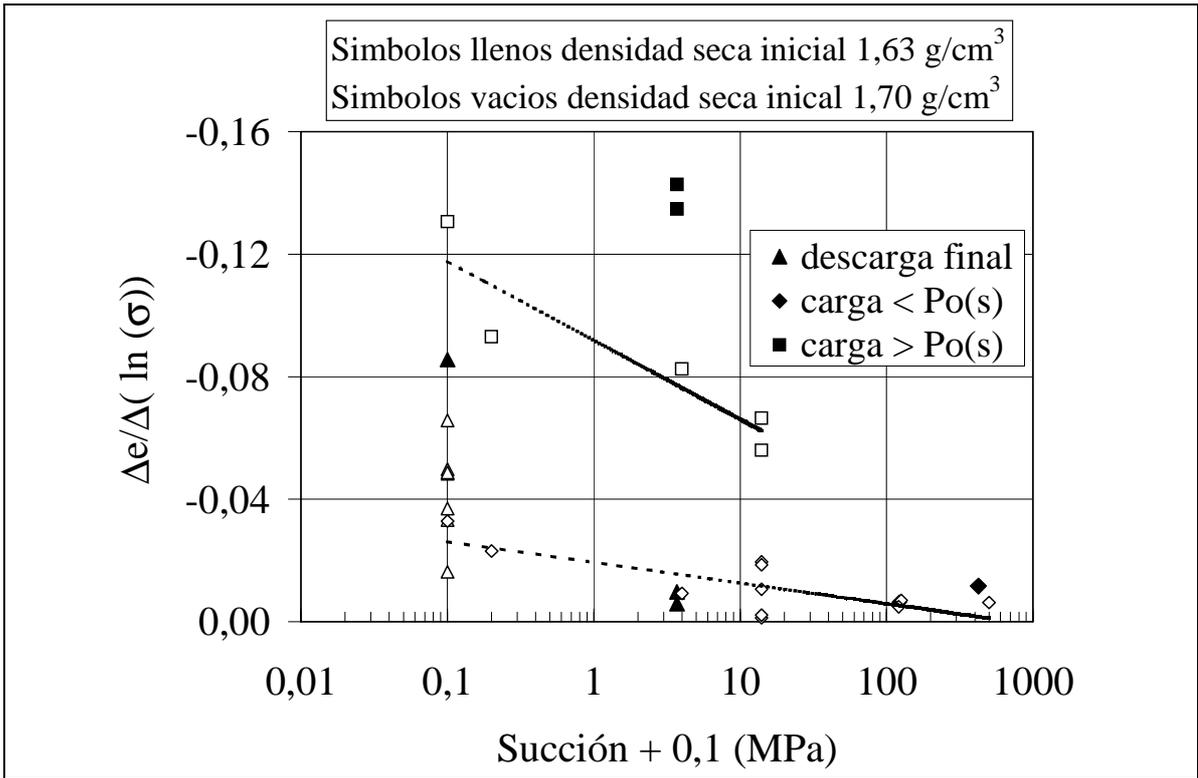


Figura 62: Valores de la compresibilidad de la bentonita cargada o descargada a diferentes valores de la succión

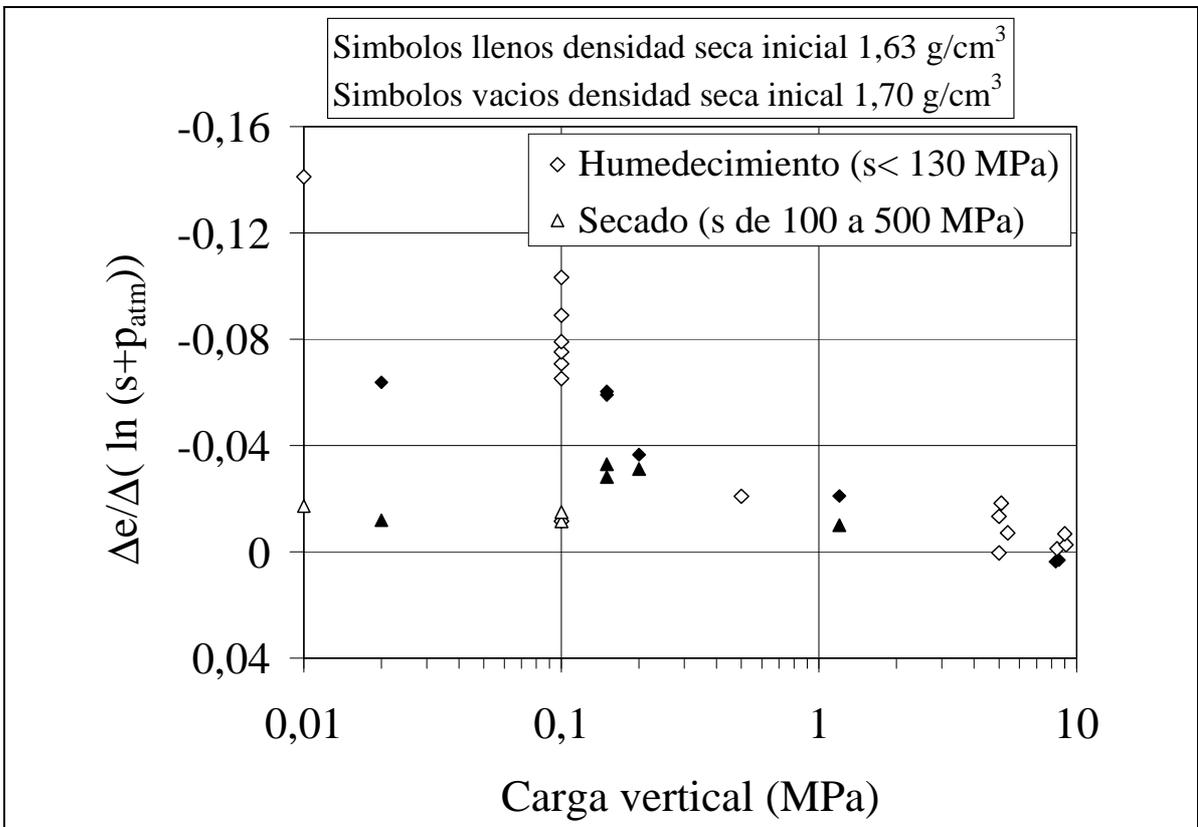


Figura 63: Valores de la variación de volumen frente a cambios de succión para diversos valores de la carga vertical aplicada

4.1.2. Ensayos con control de la deformación máxima

Las trayectorias seguidas en los ensayos de reducción de succión controlando la deformación experimentada por las muestras se recogen en la Figura 64. En algunos casos al inicio del ensayo se ha realizado un proceso de secado de la muestra, aumentando la succión hasta valores del orden de 400 a 500 MPa. En algunos ensayos no ha sido posible alcanzar la saturación con el volumen de poros prefijado dado que, especialmente en las muestras con densidad inicial más alta, la presión de hinchamiento ha alcanzado el valor de la máxima carga que es posible aplicar con los equipos disponibles. Los trazos más gruesos de las trayectorias mostradas en dicha figura indican los tramos de ensayos en los que los valores del volumen de poros se han mantenido prácticamente constantes (variaciones del índice de poros menores de $\pm 0,01$).

En la Figura 65 pueden apreciarse con mejor detalle los cambios de carga que ha sido necesario aplicar para mantener inalterado el volumen de las diversas muestras. Claramente pueden distinguirse dos 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 ($\Delta e/\Delta(\ln \sigma)$, del orden de $-0,01$ según se desprende de la Figura 62) frente a la expansividad del suelo por reducción de la succión ($(\Delta e/\Delta(\ln s+p_{atm}))$, del orden de $-0,06$ (Figura 63)). 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):

$$\Delta(\ln s+p_{atm})/\Delta(\ln \sigma) = [\Delta e/\Delta(\ln \sigma)] / [\Delta e/\Delta(\ln s+p_{atm})] \quad [49]$$

A medida que la carga aumenta, el cambio de volumen debido a cambios de succión se hace más pequeño y la trayectoria a seguir en el plano $(\sigma, s+p_{atm})$ tiende a ser cada vez más vertical. En la Figura 66 se muestra la comparación entre las trayectorias medidas y las obtenidas a partir de la relación entre deformabilidades debidas a cambios de succión y de carga en la zona elástica (Ecuación 45), como puede observarse esta relación explica bien el comportamiento del suelo en esa zona.

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, su rigidez frente a cargas verticales se reduce bruscamente (Figura 62) 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 65b. Los puntos que definen la posición de las superficies de fluencia se muestran en la Figura 67. En esa figura se indican también los puntos asociados a las superficies de fluencia encontrados en las trayectorias de carga bajo succión controlada ($p_0(s)$). 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.

Cuando en las muestras se alcanza la saturación total, es posible relacionar los cambios de volumen en el suelo con los cambios de tensión efectiva ($\sigma' = \sigma - u$), 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° ($\Delta(s+p_{atm}) = \Delta s$). Este fenómeno se observa relativamente bien en la Figura 68.

Las presiones de hinchamiento finales obtenidas en estos ensayos son del mismo orden que las obtenidas en los ensayos sin control de succión. En estos últimos la saturación se realiza mediante flujo de agua, de forma que se alcanza la saturación de forma progresiva en la muestra a medida que el agua se va infiltrando en la misma, por tanto los puntos cercanos al borde por donde entra el agua tenderán a saturarse rápidamente y a comprimir el resto de la muestra. En los ensayos con succión controlada este proceso es más gradual y las deformaciones sufridas por los diferentes puntos de la muestra no coinciden con las que experimentan cuando no hay control de succión. En la Figura 69 puede observarse cómo a pesar de ello, los valores obtenidos en ensayos con control de succión están dentro de la dispersión observada en los resultados obtenidos en los ensayos sin control de succión (Ecuación 34 y Figura 49).

Las deformaciones medidas en los procesos de descarga bajo succión nula, al igual que en los ensayos sin control de la deformación máxima, han sido importantes. En la Figura 70 se muestran los cambios de volumen medidos en las fases de descarga en los diversos ensayos realizados. En la Figura 71 se han recogido los valores de la pendiente de descarga; puede observarse que existe una variación relativamente importante de esta pendiente sin que sea atribuible al tipo de ensayo, densidad seca inicial o trayectoria de succión seguida. En cualquier caso, el 80 % de los casos se sitúan dentro de un rango de valores de $0,05 \pm 0,02$.

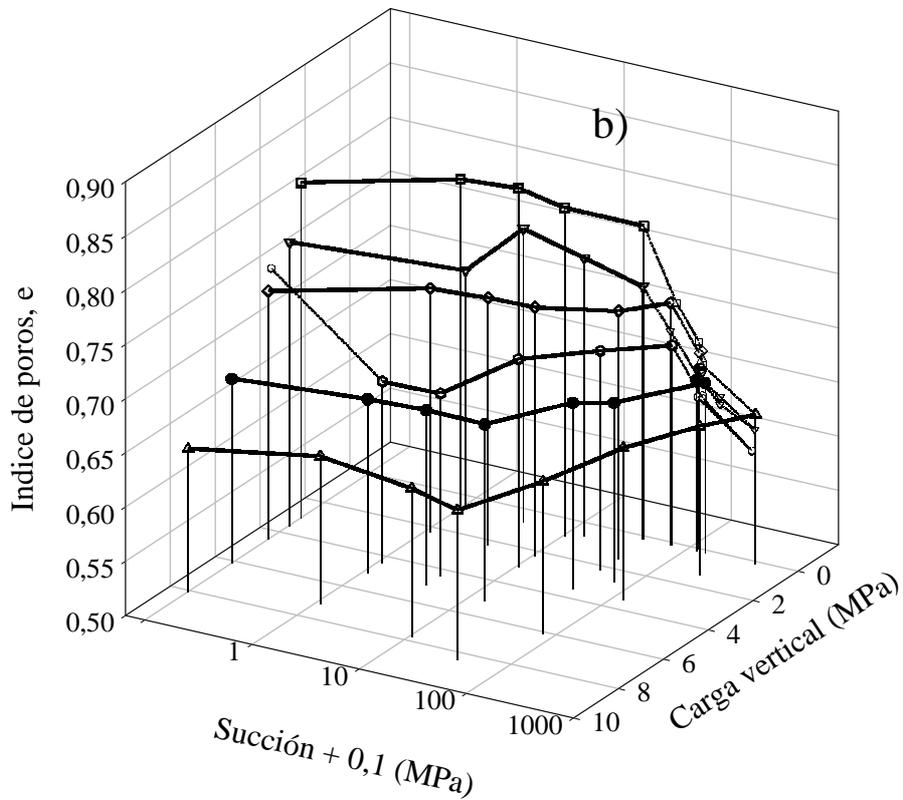
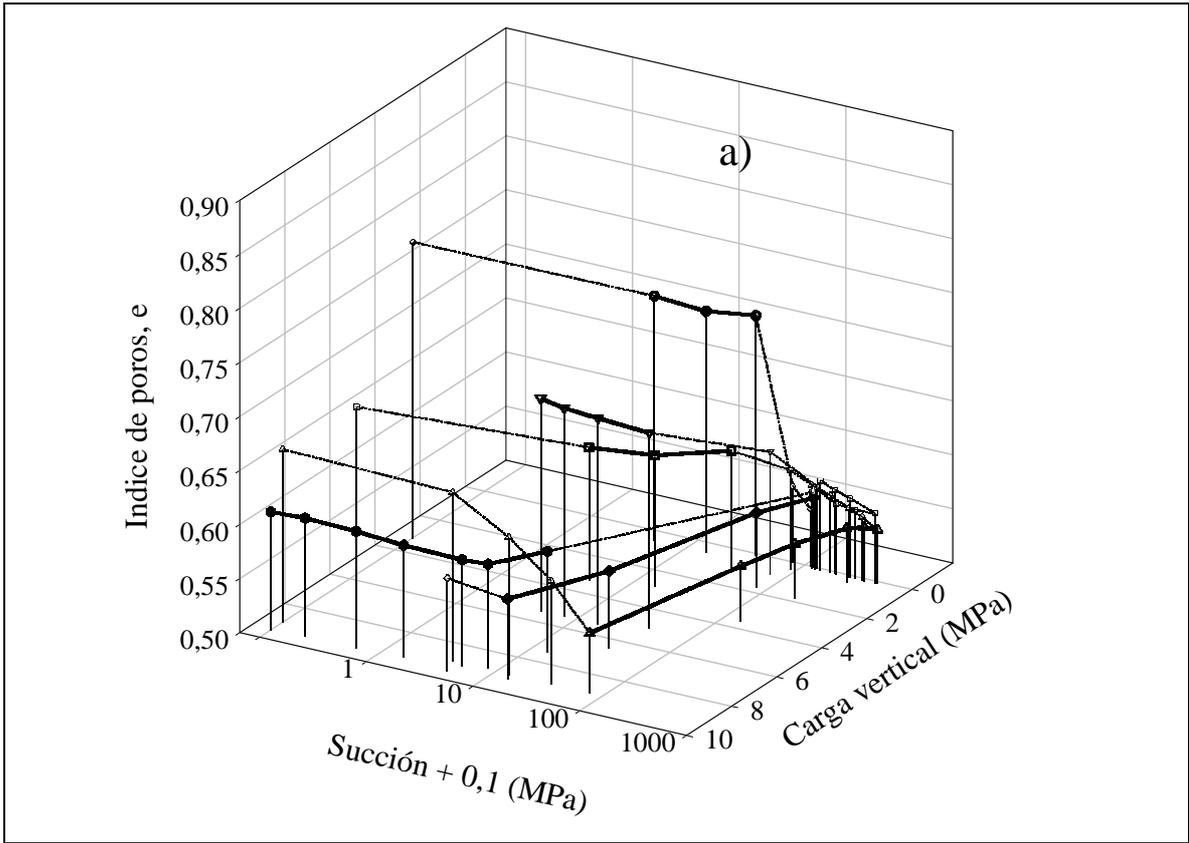


Figura 64: Trayectorias seguidas en ensayos edométricos con deformación vertical limitada: a) ensayos realizados en CIEMAT, b) ensayos realizados en UPC. Las líneas gruesas indican las zonas donde el volumen de la muestra se mantiene constante

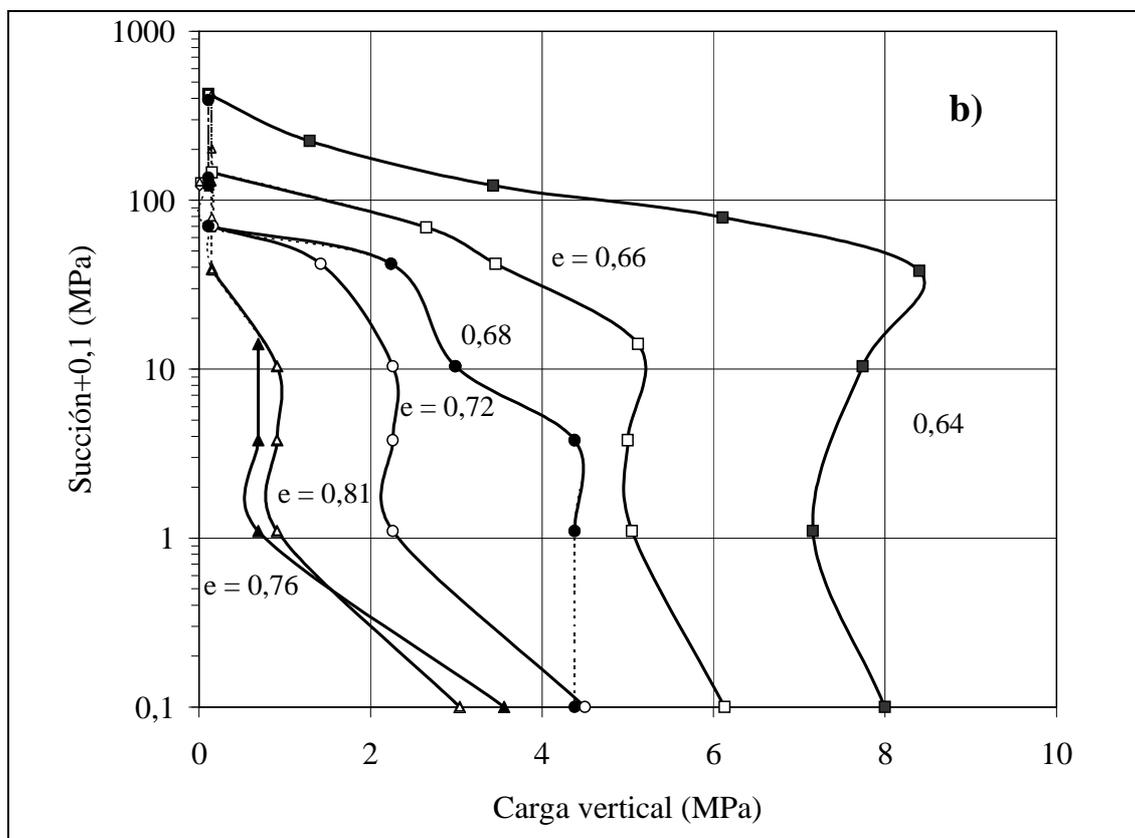
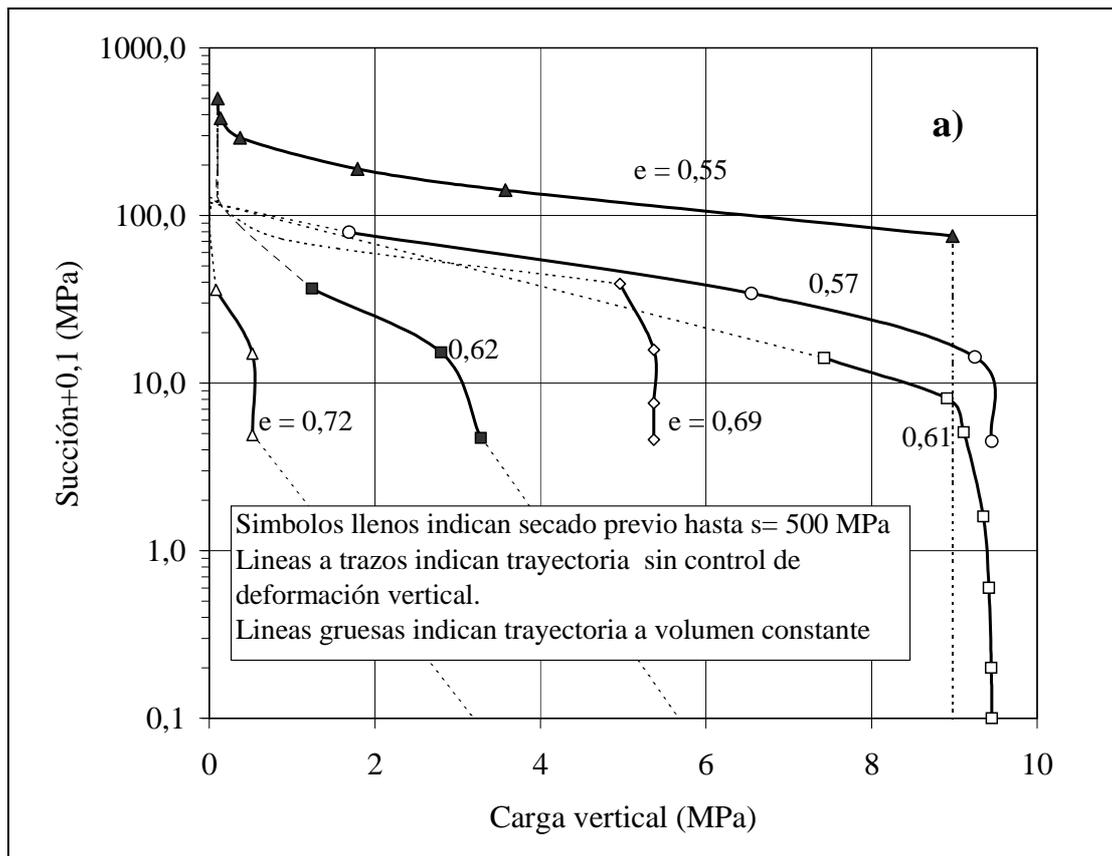


Figura 65: Trayectorias seguidas en los ensayos con control de los cambios de volumen: a) ensayos realizados en CIEMAT, b) ensayos realizados en UPC

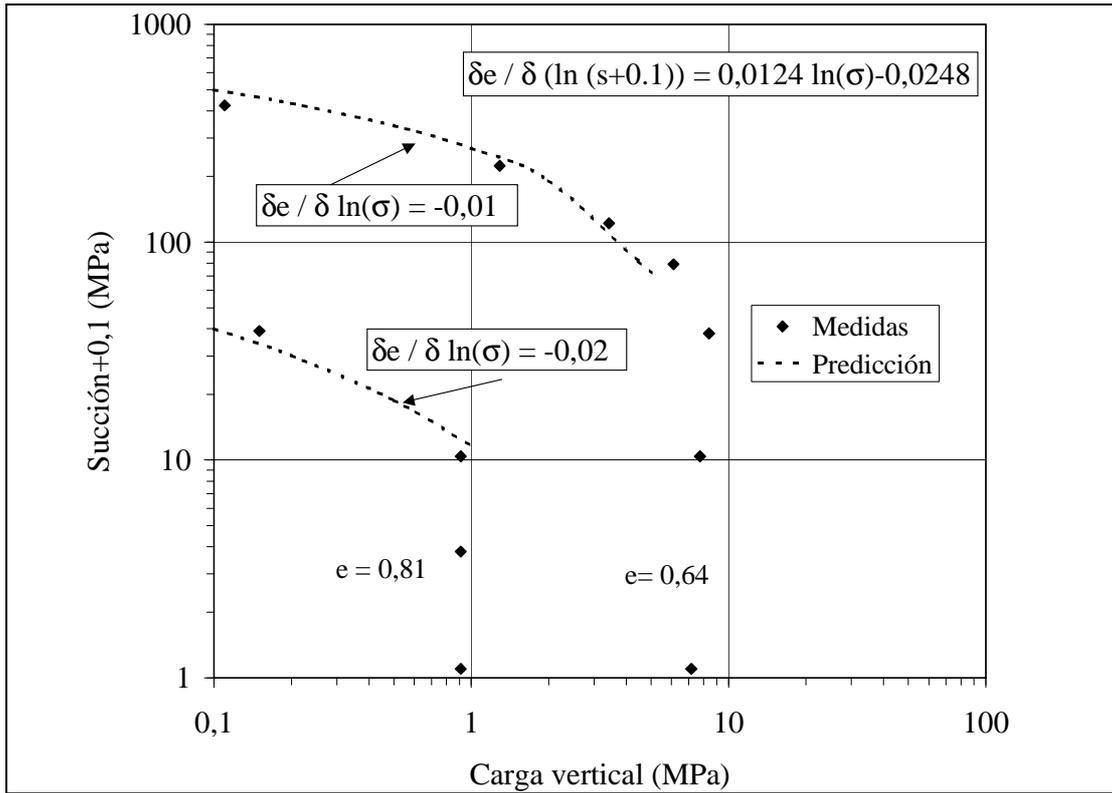


Figura 66: Comparación entre las trayectorias medidas y las calculadas en base a los cambios de volumen al aumentar la carga y reducir la succión

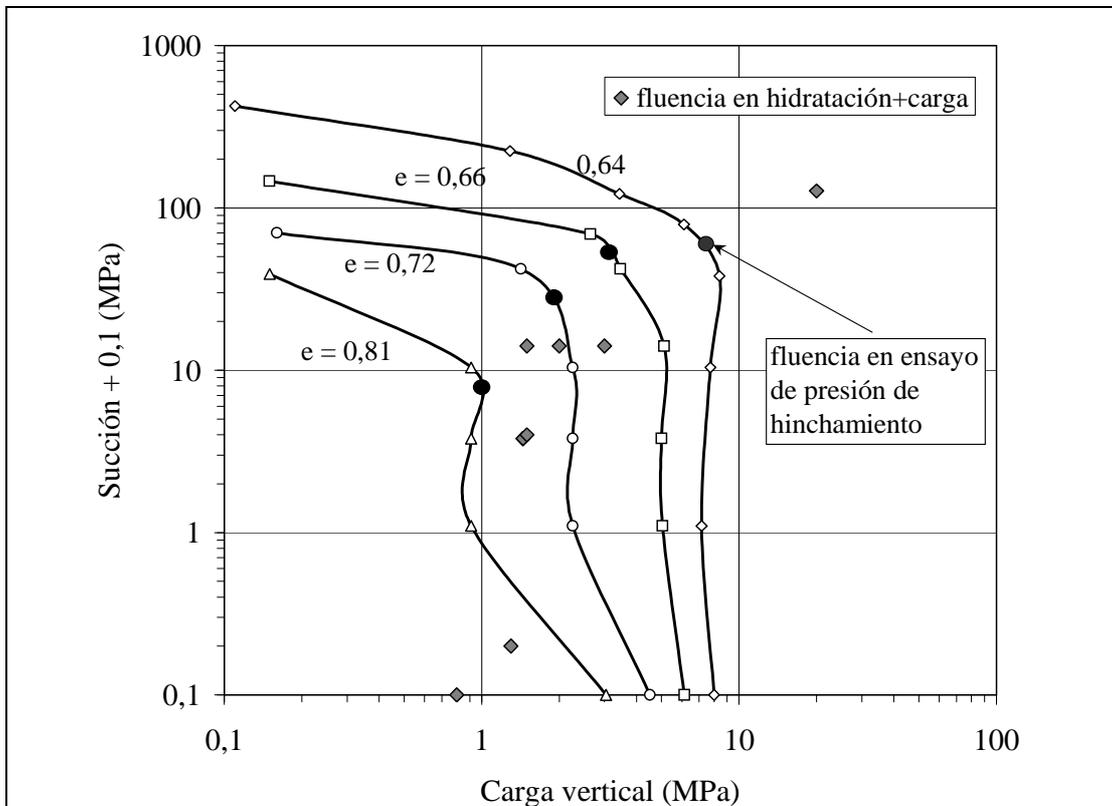


Figura 67: Comparación entre puntos de las superficies de fluencia obtenidos a partir de los ensayos con control de deformación vertical y de carga a succión constante

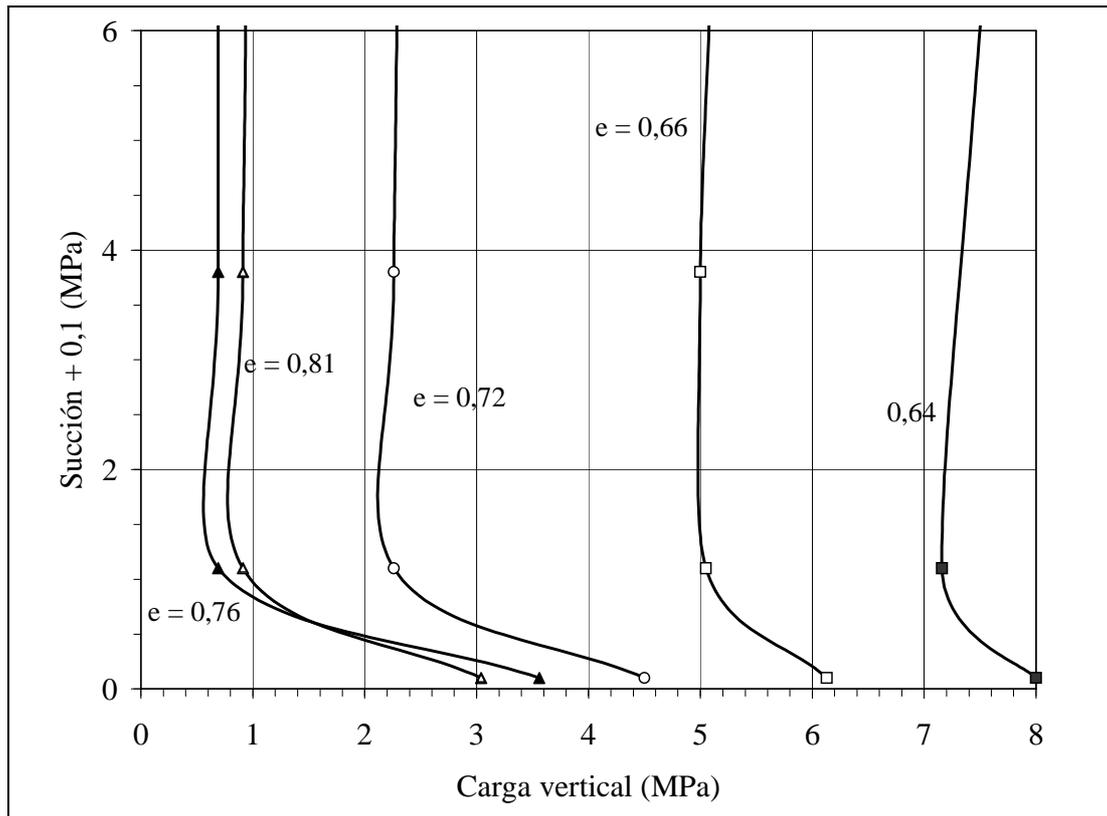


Figura 68: Trayectorias seguidas en los ensayos de presión de hinchamiento en las cercanías de la zona de succión nula

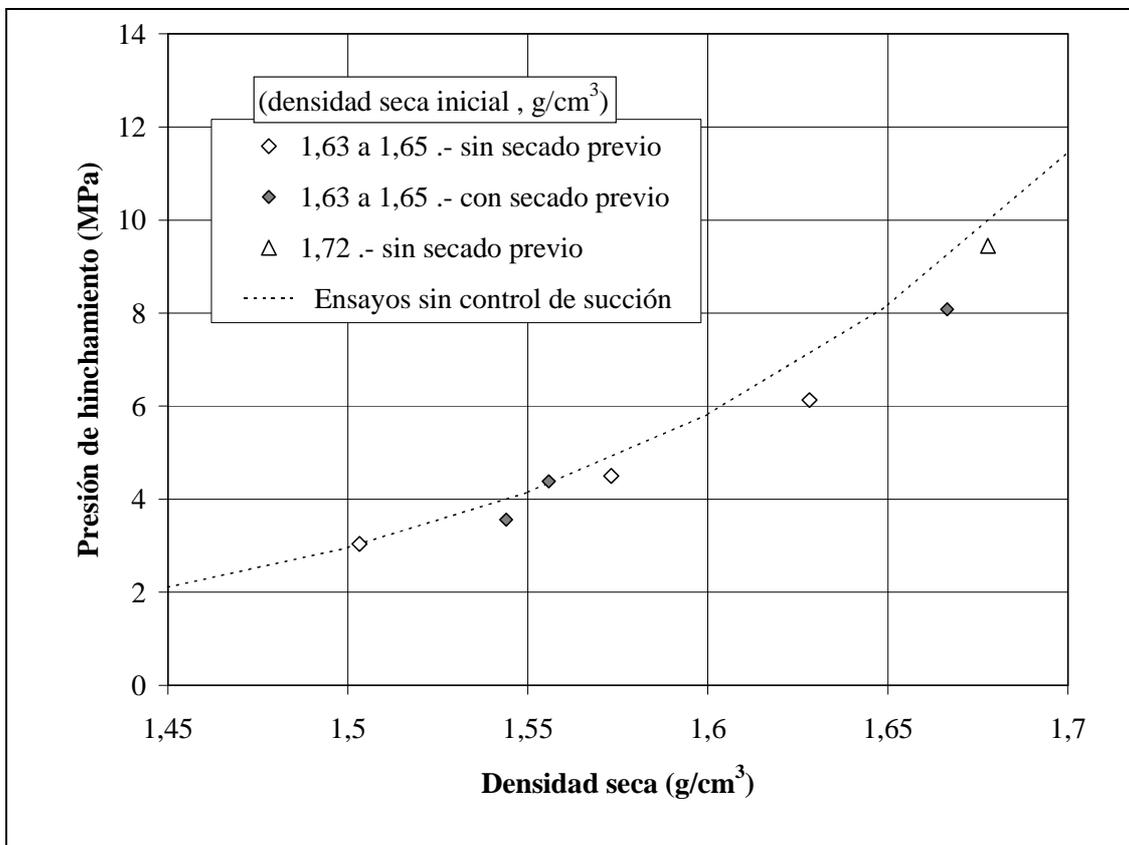


Figura 69: Presiones de hinchamiento obtenidas en ensayos con y sin control de succión

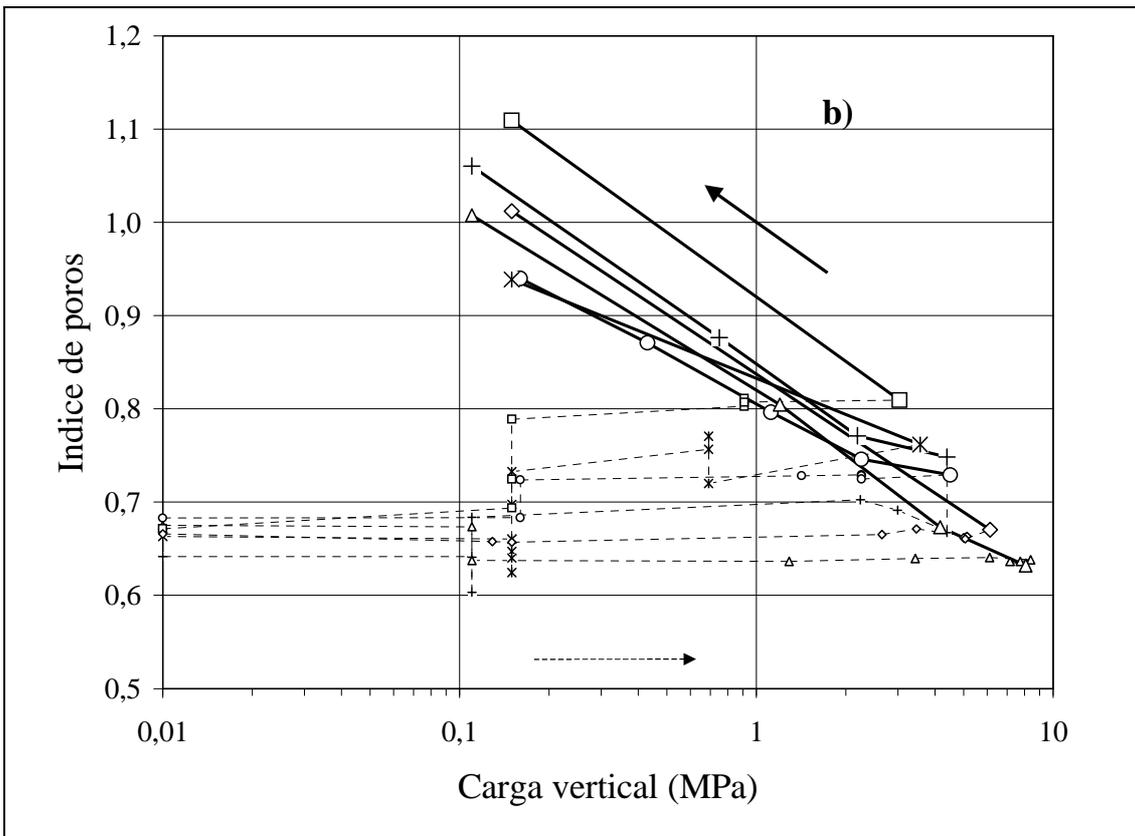
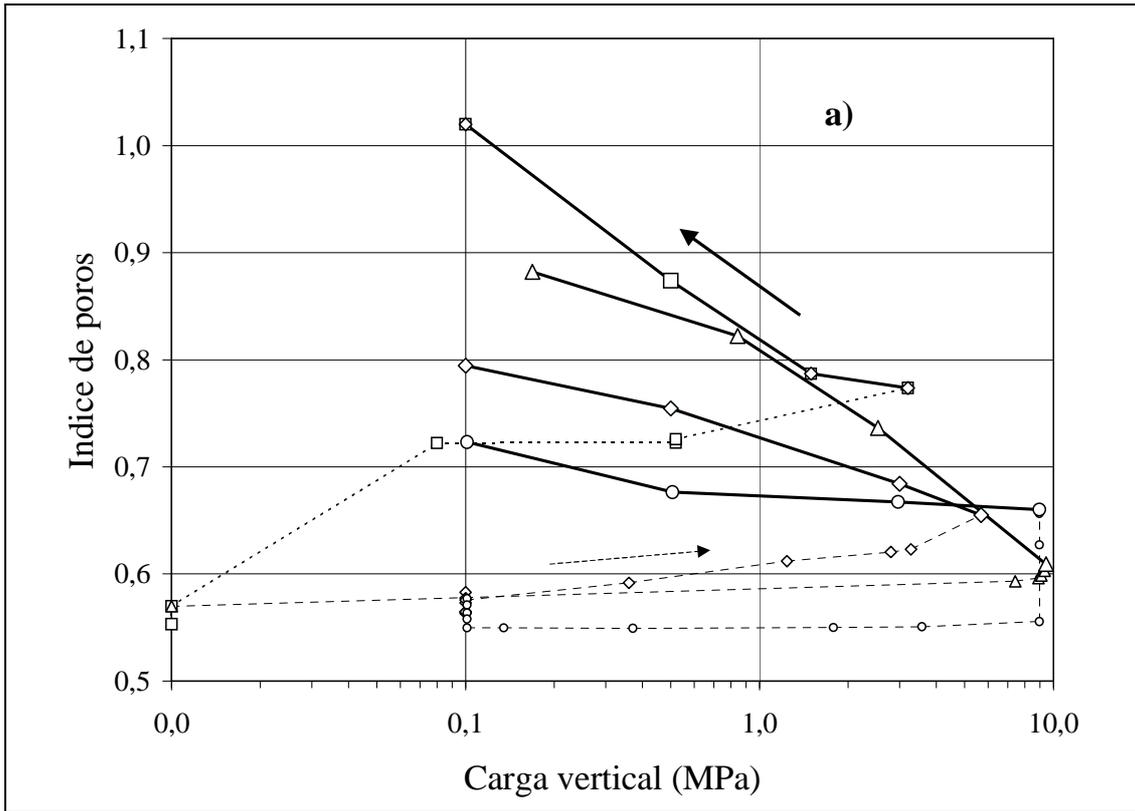


Figura 70: Cambios de volumen medidos en la fase de descarga bajo succión nula en los ensayos con control de la deformación realizados en CIEMAT (a) y en UPC (b)

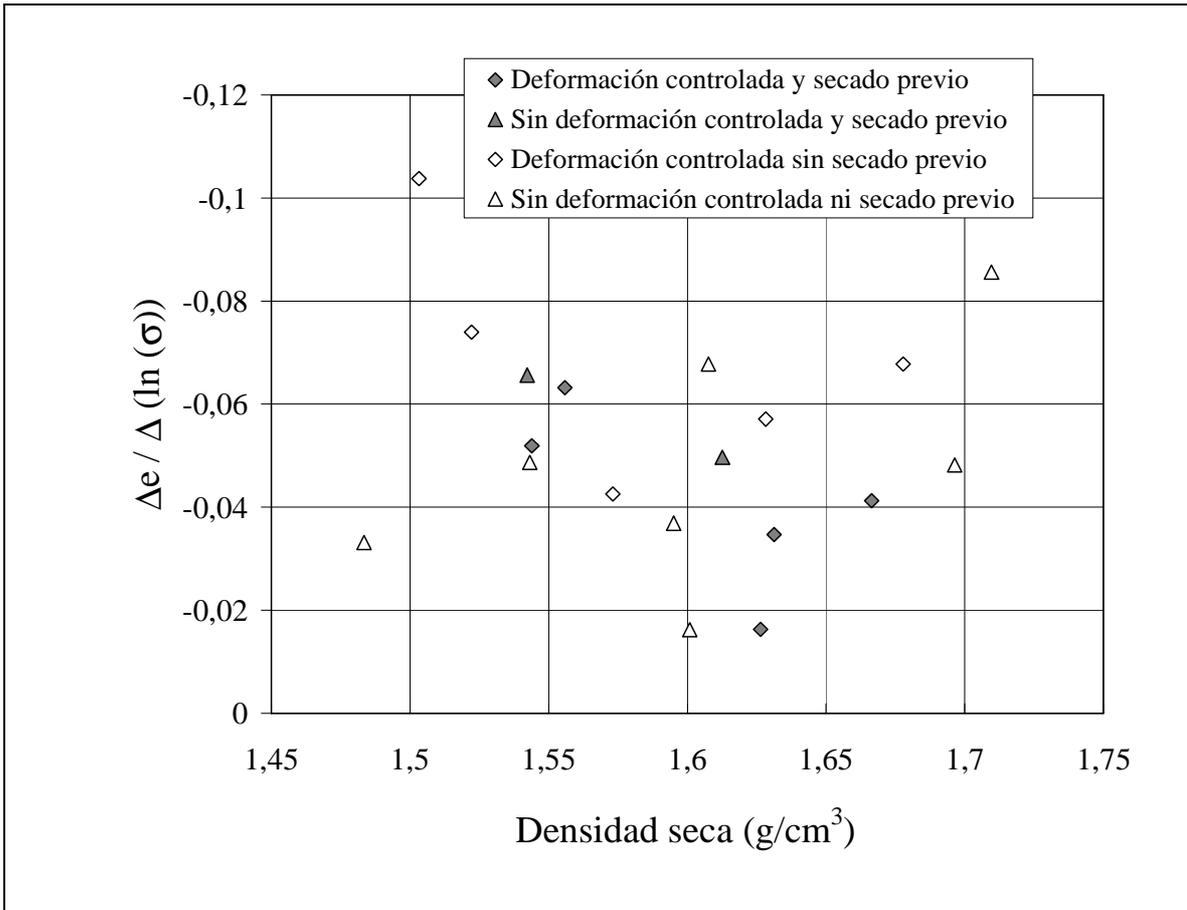


Figura 71: Valores de la deformabilidad en descarga para diferentes ensayos bajo condiciones de saturación

4.2. ENSAYOS EDOMÉTRICOS A ALTAS TEMPERATURAS

En CIEMAT se han realizado dos series de ensayos edométricos con control de succión y temperatura. En la primera serie se ha utilizado la técnica de la traslación de ejes para imponer el valor de la succión (Tabla Anexo I- LI a Tabla Anexo I- LIII) y en la segunda se ha utilizado disoluciones de ácido sulfúrico de diversa concentración. En la Figura 72 se muestran las trayectorias seguidas en cada una de las dos series de ensayos.

En la Figura 73a se pueden observar los cambios de volumen medidos en los ensayos con control de succión mediante la técnica de la traslación de ejes. Tanto el hinchamiento debido a la reducción de la succión como la rigidez frente a la aplicación de cargas han resultado dependientes de la temperatura. En la Figura 74 se muestra claramente cómo a medida que aumenta la temperatura del ensayo la magnitud del hinchamiento por reducción de la succión disminuye. Por otra parte, la temperatura parece aumentar la rigidez del suelo frente a aumentos de carga, aunque en las descargas la deformación es mayor en la muestra ensayada a temperatura más alta. Hay que tener en cuenta que, tras las diferentes deformaciones debidas a la disminución inicial de la succión y a las variaciones de carga, la estructura del suelo ya no es la misma en las tres muestras y el volumen de poros resultante también tendrá influencia en la magnitud de las deformaciones posteriores. En cualquier caso, es manifiesto el efecto de la temperatura en la magnitud del hinchamiento por reducción de succión.

En la Figura 75 se muestran las deformaciones medidas por efecto de la reducción de la succión en los ensayos con control de la succión mediante disoluciones de ácido sulfúrico. En este caso, en los ensayos realizados a 40 °C se ha observado un aumento súbito del volumen de poros que no se ha presentado en los ensayos con control de succión mediante presión de gas. Este comportamiento anómalo podría ser debido a que las disoluciones de ácido sulfúrico calentadas desprendan cantidades apreciables de vapores distintos al del agua que afecten al comportamiento de la bentonita.

Resulta difícil establecer conclusiones definitivas acerca del efecto de la temperatura sobre el comportamiento mecánico de la arcilla en base al limitado número de ensayos realizado. En el futuro será necesario realizar nuevas investigaciones a fin de aumentar el volumen y la fiabilidad de los resultados experimentales.

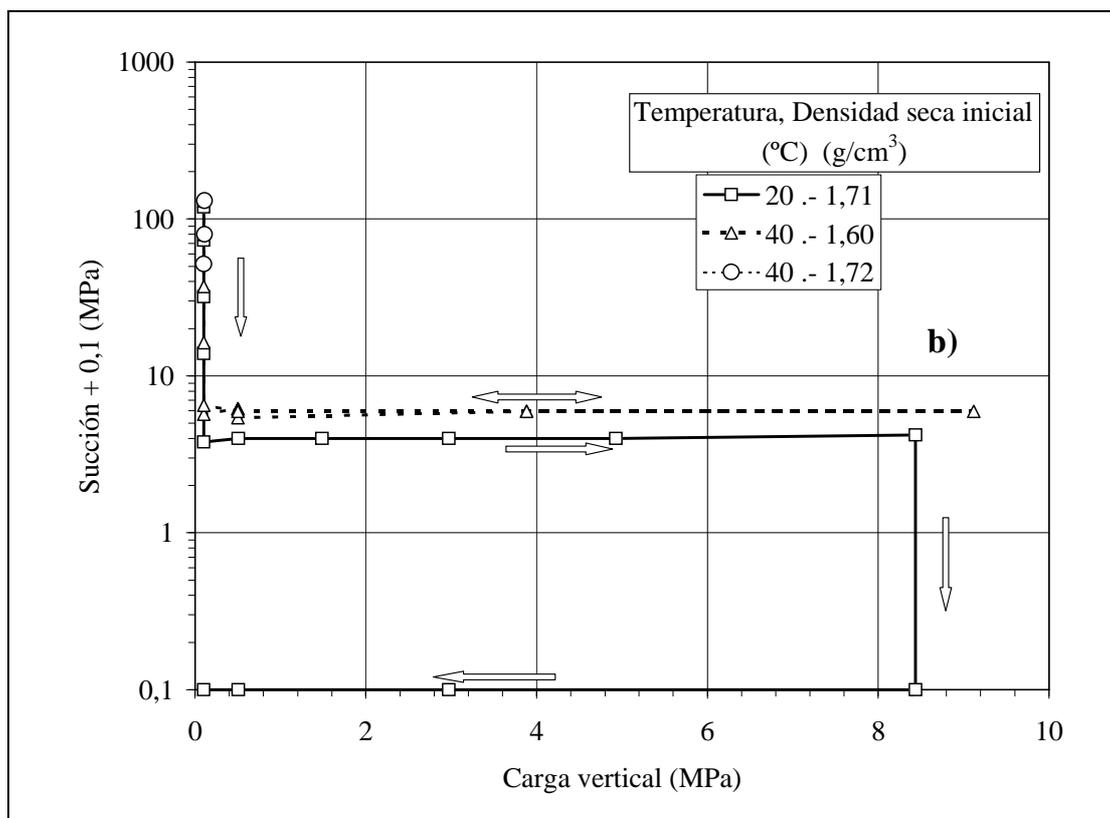
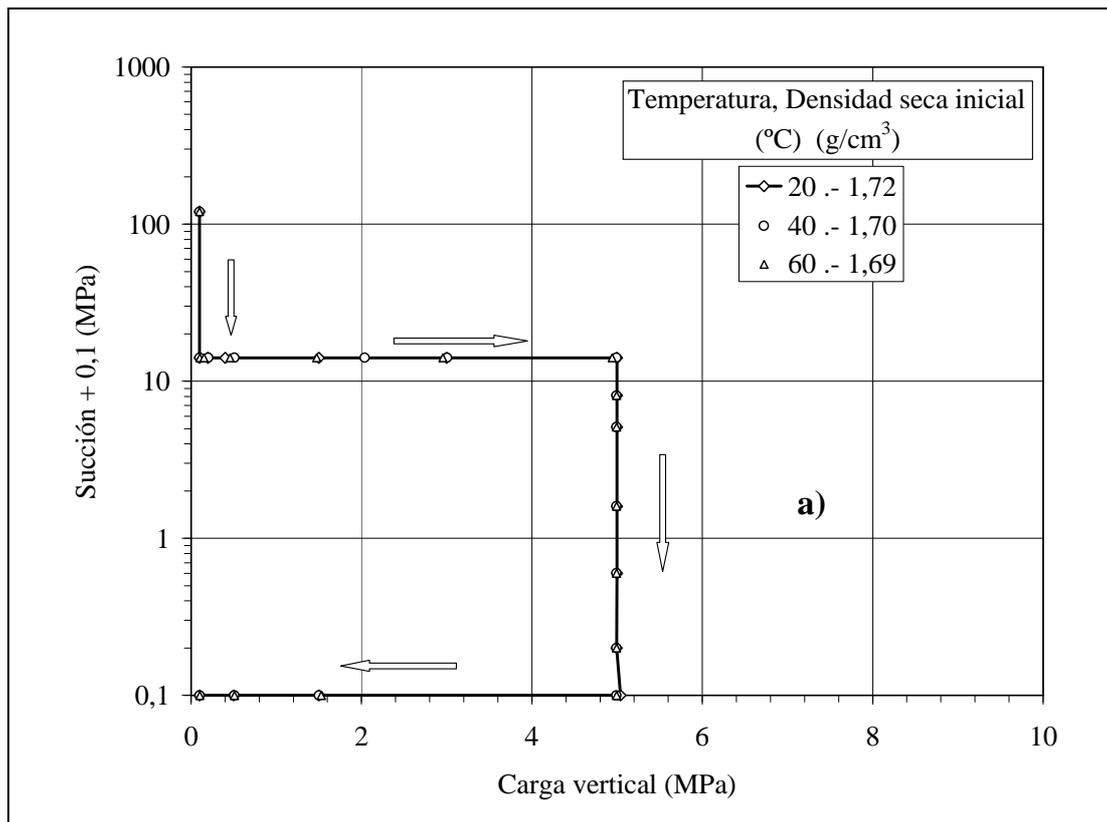


Figura 72: Trayectorias de carga y de succión seguidas en los ensayos edométricos con control de temperatura y de succión: a) succión controlada con presión de gas, b) succión controlada con ácido sulfúrico

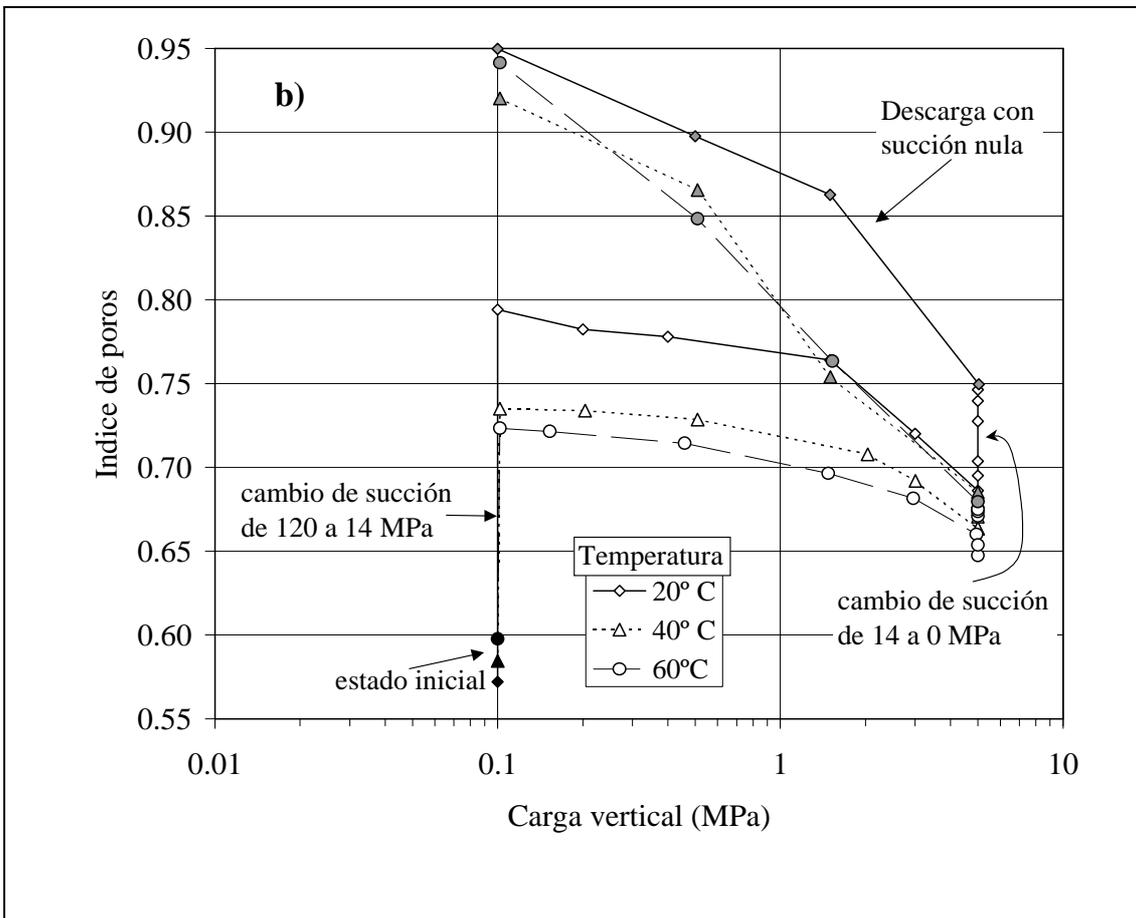
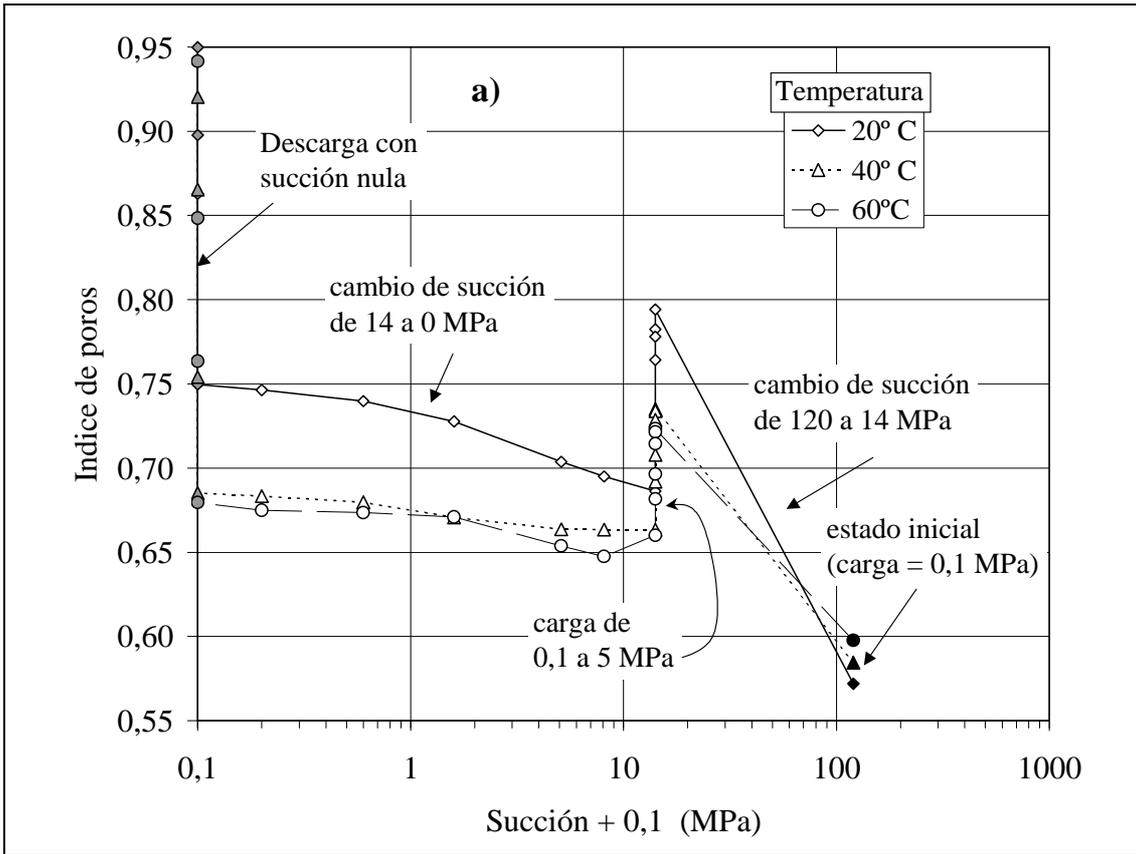


Figura 73: Cambios de volumen en ensayos edométricos con control de succión mediante presión de gas realizados a diversas temperaturas

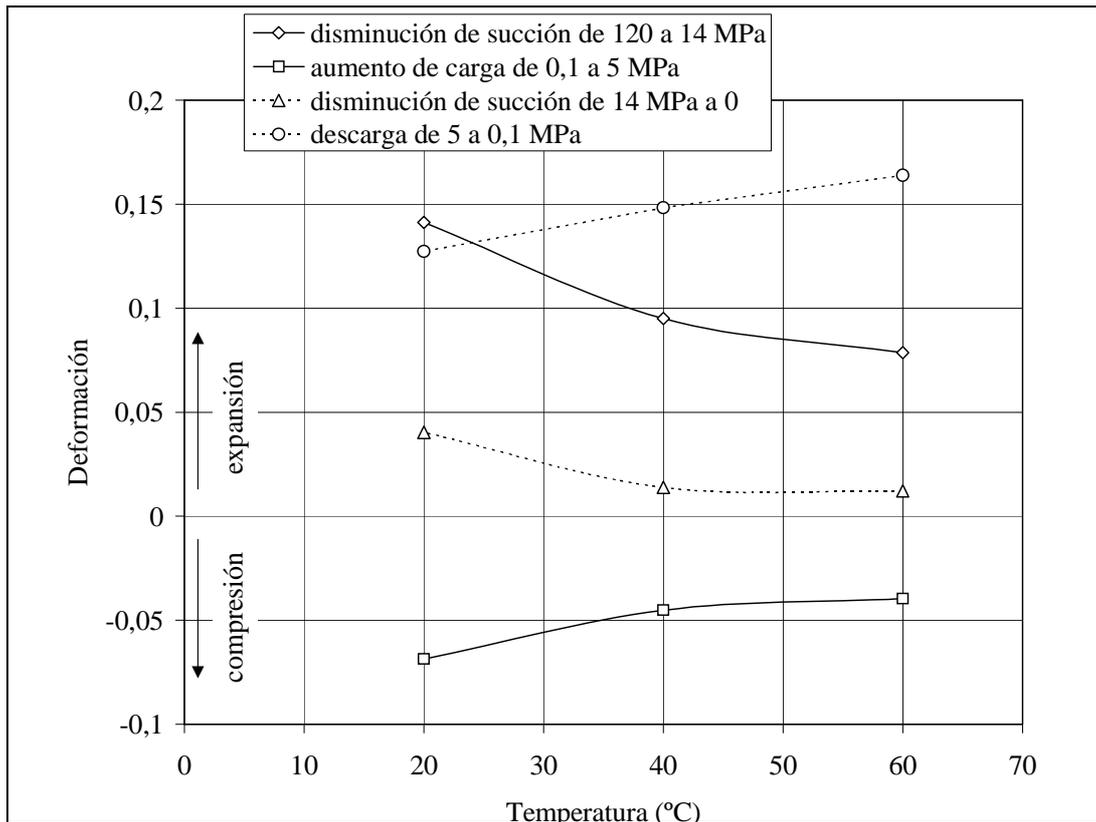


Figura 74: Deformaciones por cambios de succión y de carga a diversas temperaturas en ensayos edométricos con control de succión por presión de gas

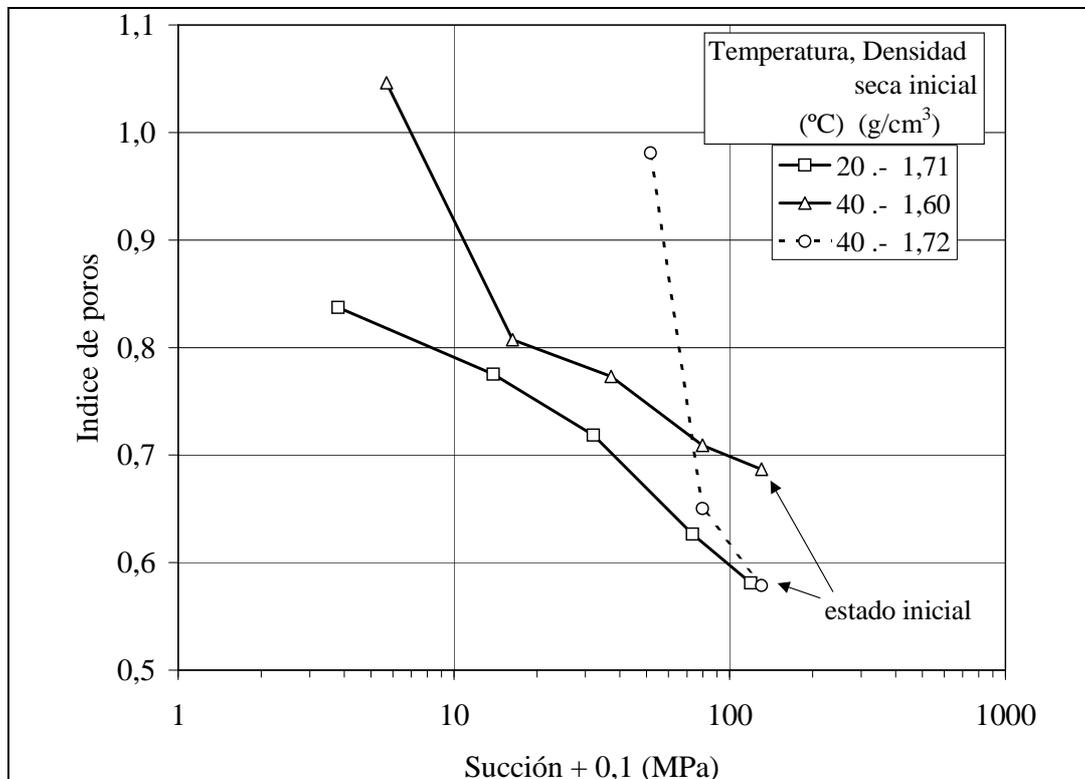


Figura 75: Cambios de volumen por reducción de succión mediante disoluciones de ácido sulfúrico

4.3. ENSAYOS EN JUNTAS

La barrera de ingeniería que se ha utilizado en el Proyecto FEBEX, tanto en el ensayo *in situ* como en el ensayo en maqueta, está constituida por bloques de bentonita compactada de una geometría que permite disponerlos de forma que configuran un anillo en torno al calentador. Este anillo está constituido por dos coronas de bloques más un núcleo en el ensayo en maqueta y por cuatro coronas de bloques más un núcleo en el ensayo *in situ*. Los bloques se han dimensionado para que, teniendo en cuenta la densidad seca que han de tener inicialmente y la humedad a la que se compactan, su peso no sobrepase los 25 kg, con el fin de facilitar su manejabilidad. Esto da lugar a un número importante de bloques por cada corona. En el caso de la maqueta cada sección de la corona externa está compuesta por 12 bloques y las de la corona interna por 6 bloques. Además, rellenar de bloques de altura 12,5 cm los 6 m de longitud del ensayo en maqueta hacen necesario la colocación de 48 secciones.

De todas las consideraciones expuestas se deriva la constatación de que la barrera de ingeniería no es un medio homogéneo en el momento de la instalación, sino que aparecen en ella gran cantidad de “huecos lineales” en dirección tanto tangencial como concéntrica al calentador. Estas juntas suponen un camino preferente para el paso del agua, tanto en fase líquida como vapor, y gases. Es necesario conocer el comportamiento de las juntas frente a la hidratación y desecación, para poder discernir su influencia sobre las propiedades hidráulicas y mecánicas del conjunto de la barrera.

4.3.1. Ensayos de hidratación

En una primera fase, CIEMAT ha diseñado una serie de ensayos encaminados a determinar el comportamiento de estas juntas al ponerse en contacto con el agua, su capacidad de autosellado y la modificación que inducen sobre la velocidad de hidratación y la conductividad hidráulica. Con este objeto se han realizado los siguientes ensayos (Tabla Anexo I- LIV a Tabla Anexo I- LVI):

- Ensayos de sellado de bloques dispuestos con una geometría análoga a la de la barrera e hidratados radialmente.
- Ensayos de velocidad de hidratación y sellado en función de la presión de inyección de agua.
- Ensayos de velocidad y efectividad de sellado.
- Ensayos edométricos en pastillas fisuradas.

Las principales conclusiones alcanzadas a partir de estos ensayos son:

- Cuando se hidrata bajo presión de inyección, aunque sea baja (menor de 0,05 kg/cm²), la existencia de fisuras, su volumen y disposición, condiciona el volumen de agua tomado y su distribución inicial dentro de la arcilla.
- La toma de agua por la arcilla se realiza desde la superficie de hidratación directa y desde las juntas hacia el interior de los bloques. Este aspecto se ilustra en la Figura 76, que muestra la distribución final de humedad en la arcilla tras dos ensayos en los que cuatro muestras seccionadas por la mitad se apilaron e hidrataron desde la parte superior.

- Cuando existen fisuras, el volumen de agua tomado inicialmente depende de la presión de inyección, disminuyendo considerablemente si la hidratación se produce a presiones muy bajas.
- El ritmo de toma de agua posterior, es decir, una vez rellenadas de agua todas las fisuras, parece ser independiente de la presión de inyección, pero no de la densidad seca de la arcilla.
- El tiempo de cierre de una fisura, si hay circulación libre de agua por ella, es mayor cuánto mayor sea la presión de inyección y el volumen de la fisura.
- El sellado de una fisura producido por hidratación durante 24 horas con suficiente cantidad de agua es efectivo frente a presiones hidráulicas de hasta 5,2 MPa.
- Hasta que se produce el cierre de la fisura la deformación por hinchamiento experimentada por cada uno de los bloques es la correspondiente a su densidad seca inicial.

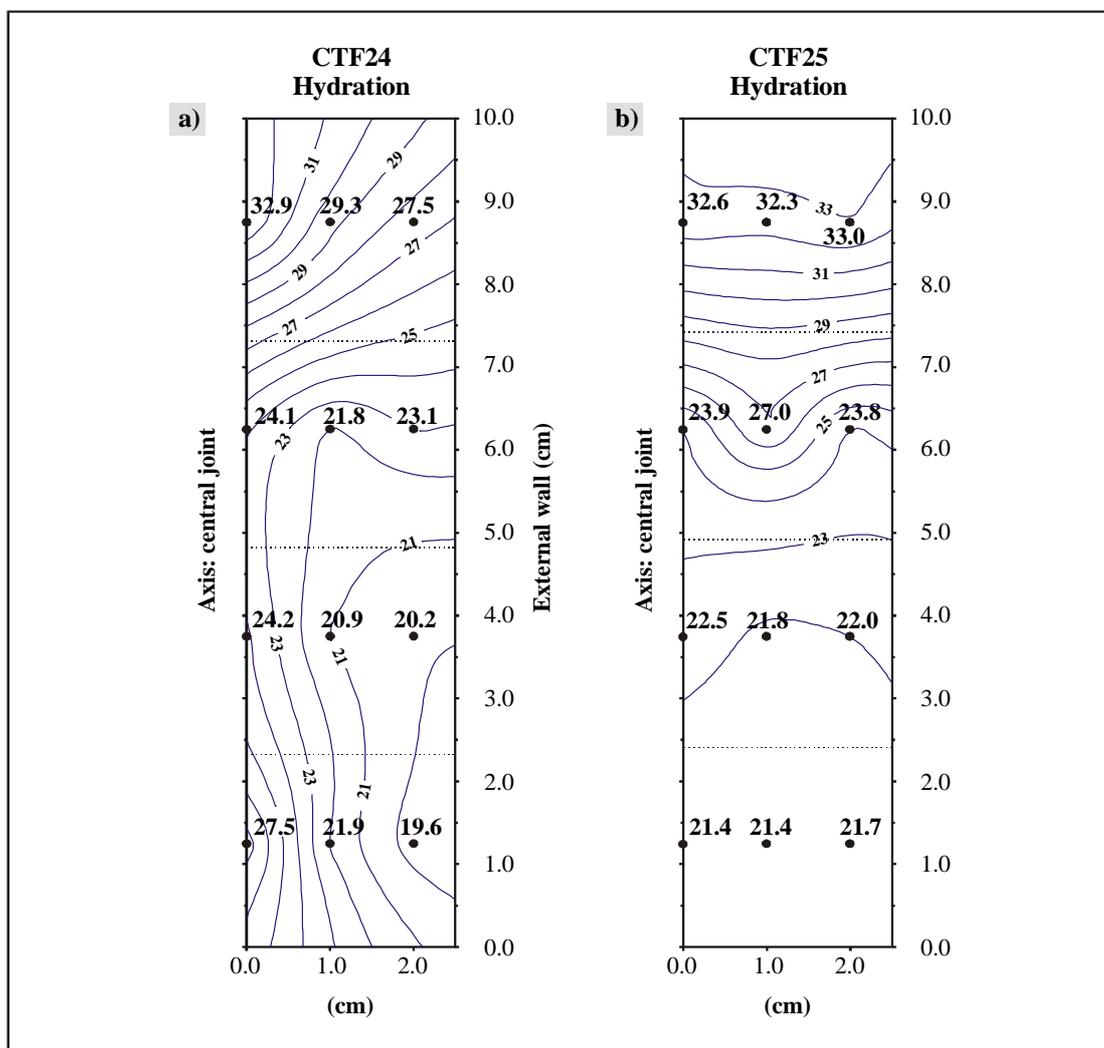


Figura 76: Distribución final de humedad en la arcilla después de dos ensayos de sellado (cuatro pastillas apiladas) realizados bajo una presión de inyección de 0,5 MPa y de duración a) 1 día, b) 7 días (sólo se representa media sección)

4.3.2. Ensayos de compresión

En la UPC se han medido el acercamiento entre los labios de una junta entre bloques cuando está sometida a una carga normal a su plano. Para ello, se han comparado las deformaciones medidas en una probeta de 78 mm de altura, con las medidas en el conjunto de dos pequeñas probetas de 39 mm de altura colocadas una encima de la otra, cuando en ambos casos se aplica un mismo nivel de tensión (Tabla Anexo II- XXIV).

En la Figura 77 se muestran las medias realizadas con muestras compactadas a una densidad seca nominal de $1,63 \text{ g/cm}^3$ con tres grados de saturación diferentes. Puede observarse que, a medida que la muestra está más seca, la rigidez de la junta es más baja. Este resultado es coherente con los resultados de la medida de los módulos de deformación al corte realizados con la columna resonante sobre muestras compactadas a diversos grados de saturación (Figura 24).

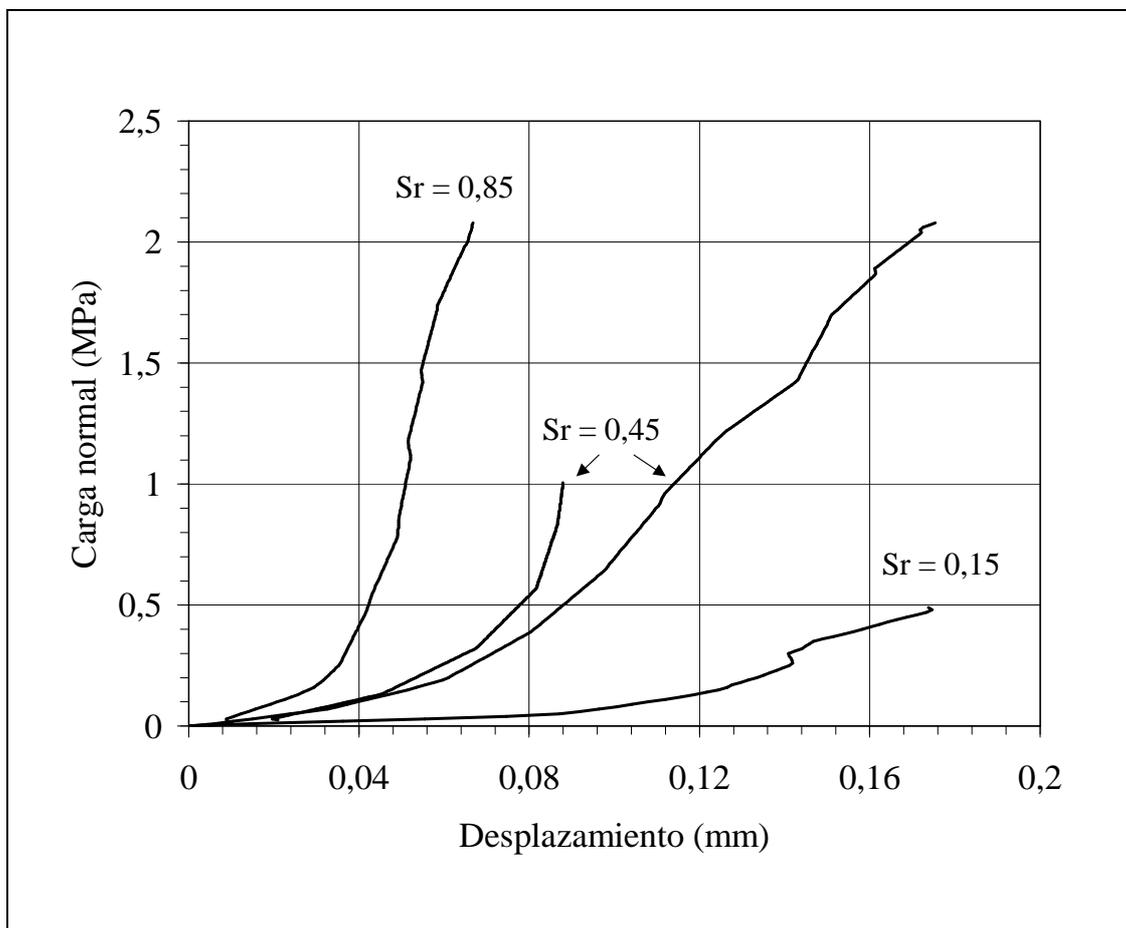


Figura 77: Relación entre la carga y el desplazamiento entre los labios de una junta entre bloques, para diversos grados de saturación

5. RESUMEN Y CONCLUSIONES

En este documento se han presentado los resultados de los ensayos de laboratorio realizados por CIEMAT y UPC en el contexto del proyecto FEBEX I de acuerdo con las directrices recogidas en las especificaciones del mismo (Lloret *et al.* 1997). Estos resultados, que pretenden caracterizar el comportamiento termo-hidro-mecánico de la arcilla FEBEX, serán de gran utilidad para la modelación numérica de dicho comportamiento y representan un avance importante en el conocimiento del comportamiento de este tipo de materiales altamente expansivos. Hay que resaltar la dificultad que entraña ensayar este tipo de arcillas tanto por su alta expansividad como por su baja permeabilidad. Adicionalmente, la limitada experiencia en este tipo de ensayos ha hecho necesaria la puesta a punto numerosos procedimientos de ensayo innovadores. Los resultados más relevantes de los ensayos realizados son los siguientes:

- El límite líquido de la bentonita es $w_L = 102$, el límite plástico es $w_P = 53$ ($IP = 49$), la densidad de las partículas es $\rho_s = 2,7 \text{ g/cm}^3$ y el 67 % de las partículas son menores de $2 \mu\text{m}$. La humedad higroscópica es de 13,7 % (en equilibrio con una atmósfera con una humedad relativa del orden del 50 %). El valor de la superficie específica externa BET es de unos $32 \text{ m}^2/\text{g}$. Puede estimarse que el volumen de los poros del interior de los agregados representa más del 70 % del volumen total de poros del suelo cuando la densidad seca es de $1,75 \text{ g/cm}^3$. El agua retenida en los poros del interior de los agregados puede llegar a representar una humedad del orden del 20 %. Se ha comprobado que la densidad del agua adsorbida es mayor a la densidad del agua libre, de forma que en muestras compactadas a una densidad seca de $1,75 \text{ g/cm}^3$ la densidad media del agua resulta ser de unos $1,2 \text{ g/cm}^3$.
- Se ha medido de forma directa el valor de la conductividad térmica de la bentonita para diferentes densidades y grados de saturación, de forma aproximada pueden utilizarse las expresiones [1] y [2] para obtener su valor en función del contenido volumétrico de agua o del grado de saturación respectivamente. El valor del calor específico de las partículas sólidas en función de la temperatura se muestra en la Ecuación 3.
- Se han obtenido las relaciones succión humedad en condiciones no confinadas y manteniendo el volumen constante. En condiciones no confinadas los cambios de volumen al cambiar la humedad de la bentonita pueden llegar a ser muy importantes. En la Ecuación 4 se indica una expresión para la relación entre la succión y la humedad en función de la densidad seca inicial (con la humedad higroscópica) de las muestras. En condiciones de deformación libre el efecto de la histéresis en trayectorias de secado tras humedecimiento es pequeño.
- Para obtener la curva de retención en condiciones de cambio de volumen nulo ha sido necesario poner a punto nuevos procedimientos de ensayo. El efecto de la densidad del material en su curva de retención es muy significativo (Figura 15). El efecto de la histéresis es también acusado en el caso de las curvas de retención a volumen constante. En la Tabla V y en la Tabla VI se recogen los parámetros de las curvas que ajustan los valores medidos experimentalmente en trayectorias de humedecimiento y de secado tras saturación, respectivamente.

- El efecto de la temperatura en las curvas de retención no ha podido ser observado claramente debido a que los ensayos se han realizado sin confinamiento y el efecto del cambio de volumen durante las variaciones de temperatura oscurece la interpretación de los resultados. Este efecto debe ser estudiado con detenimiento en nuevas campañas de ensayo donde se controle el volumen de las muestras.
- La medida de la permeabilidad al agua de numerosas muestras compactadas a distintas densidades ha permitido obtener con una buena fiabilidad la variación de la permeabilidad en función de la densidad seca, índice de poros o de la porosidad (ecuaciones 12 a 18). La diferencia de permeabilidad al usar agua destilada o agua granítica es casi inapreciable. En cambio, cuando se utiliza agua salina (ver composición en Tabla I), el aumento de la permeabilidad es manifiesto. La orientación del flujo respecto a la dirección de la compactación tiene un efecto muy pequeño en el valor de la permeabilidad saturada.
- La medida de la permeabilidad al gas sobre muestras con diferentes densidades y grados de saturación ha permitido obtener una relación entre esta permeabilidad y la porosidad accesible al gas (Ecuación 19). La comparación de los valores de la permeabilidad intrínseca medidos en ensayos de flujo de agua en condiciones saturadas o de flujo de gas en condiciones no saturadas pone de manifiesto un gran cambio en la estructura de la bentonita a medida que cambia su grado de saturación. En condiciones saturadas predominan los poros de pequeño diámetro del interior de los agregados mientras que en ausencia de agua predominan los poros inter-agregado de diámetro mucho mayor. Ello explica la diferencia de unos 8 órdenes de magnitud observada entre las dos medidas de la permeabilidad intrínseca.
- Los resultados de la medida del módulo elástico de corte sobre muestras compactadas con diferentes densidades y grados de saturación han presentado bastante dispersión. Aún así, el efecto del confinamiento y del grado de saturación se ha podido poner de manifiesto. El módulo aumenta a medida que aumenta el grado de saturación hasta alcanzar un máximo para grados de saturación por encima de 0,9.
- El efecto de la temperatura sobre la viscosidad del agua y del volumen de poros sobre la permeabilidad intrínseca ha permitido explicar las diferentes velocidades de infiltración observadas en los ensayos de infiltración realizados en células de teflón a diferentes temperaturas y con diferentes densidades secas.
- La técnica del retroanálisis utilizando las herramientas numéricas desarrolladas para la modelación de los experimentos a gran escala permite obtener, de forma consistente, parámetros del modelo que no pueden ser medidos directamente. Los ensayos de infiltración son particularmente útiles para estudiar la variación de la permeabilidad según el grado de saturación. Por otra parte, el análisis de ensayos de flujo de calor manteniendo constante la humedad global del suelo permite estudiar los parámetros ligados al movimiento del vapor de agua y del flujo de calor.
- El empleo de una ley potencial con un exponente igual a 3 para relacionar la permeabilidad relativa con el grado de saturación permite ajustar de forma

aceptable los resultados de los ensayos de infiltración realizados en CIEMAT y en UPC.

- Los valores de la conductividad térmica de la bentonita obtenidos por retroanálisis de los ensayos de flujo de calor son comparables a los obtenidos por medida directa. En esos ensayos, el parámetro que condiciona la magnitud del flujo de vapor por difusión es la tortuosidad. El análisis de los resultados de los ensayos de flujo de calor indica que distintas combinaciones del valor de la tortuosidad y del exponente en la ley de permeabilidad relativa conducen a ajustes similares con los valores de la humedad medida en la muestra. Ambos parámetros están relacionados ya que un elevado valor del exponente reduce la magnitud del flujo de agua líquida que debe ser compensado con una reducción de la tortuosidad que favorezca el flujo de vapor.
- A partir de los valores de los parámetros obtenidos por medida directa y por retroanálisis de los diversos ensayos se han seleccionado los siguientes parámetros y leyes para definir la permeabilidad intrínseca, la permeabilidad relativa, la tortuosidad y la conductividad térmica de la bentonita:

$$k_i (\text{porosidad}=0,4) = 2 \cdot 10^{-21} \text{ m}^2$$

$$k_r = S_r^3$$

$$\tau = 0,8$$

$$\lambda (\text{W/m K}) = 0,47^{1-S_r} 1,15^{S_r}$$

- Se han medido las deformaciones por cambio de temperatura y se ha comprobado que el coeficiente de dilatación aumenta con la temperatura. En ciclos de calentamiento y enfriamiento se ha constatado la existencia de importantes deformaciones irreversibles. En las ecuaciones [25] a [27] se presentan expresiones para el valor del coeficiente de dilatación para diferentes tipos de trayectoria.
- En los ensayos de flujo de calor manteniendo la humedad constante, los cambios de volumen debidos a la migración del agua en forma de vapor o en forma líquida superan largamente a los cambios de volumen debido a los cambios de temperatura.
- Se han medido las deformaciones de hinchamiento por saturación de muestras compactadas a diferentes densidades secas con la humedad higroscópica. Las deformaciones disminuyen ostensiblemente al aumentar la carga aplicada durante la saturación. Por otra parte, cuanto mayor es la densidad seca inicial, mayor es la magnitud del hinchamiento. El valor de las deformaciones en función de la carga aplicada y la densidad seca inicial se indica en la Ecuación 31. El efecto de la composición del agua (agua granítica o agua salina) en la magnitud de los hinchamientos ha sido pequeño. Tras la saturación, el volumen de poros alcanzado por las muestras depende de la carga aplicada, pero el efecto de la densidad seca inicial no es observable.
- El valor de la presión de hinchamiento es altamente dependiente de la densidad seca de la bentonita, especialmente cuando esta densidad está por encima de $1,6 \text{ g/cm}^3$. En la Ecuación 34 se indica la relación que proporciona el valor de la presión de hinchamiento en función de la densidad seca inicial. Dada la alta

expansividad de la bentonita las presiones de hinchamiento han resultado muy elevadas (del orden de 6 MPa para una densidad seca inicial de $1,60 \text{ g/cm}^3$ y del orden de 12 MPa para una densidad seca de $1,70 \text{ g/cm}^3$). La utilización de agua granítica o de muestras talladas perpendicularmente a la dirección de compactación no altera significativamente el valor de la presión de hinchamiento.

- Las presiones de hinchamiento medidas al saturar las muestras sin permitir su deformación han resultado ser superiores al valor de la carga que hay que aplicar para que al saturar la muestra, con esa carga aplicada, la deformación resulte nula.
- Se han realizado numerosos ensayos edométricos con succión controlada intentando seguir trayectorias análogas a las experimentadas en diferentes puntos de la barrera arcillosa en los repositorios. Se han realizado dos tipos de ensayo en los que se controlaba el valor de la succión aplicada: en el primer tipo se ha impuesto el valor de la carga vertical mientras que en el segundo se ha impuesto el valor de la deformación vertical máxima experimentada por la bentonita.
- En las trayectorias de humedecimiento seguidas en los ensayos edométricos con control de la carga, el incremento de volumen es prácticamente lineal con la reducción del logaritmo de la succión. El valor de la pendiente de esta dependencia es a su vez muy dependiente del logaritmo de la carga aplicada (Figura 63 y ecuaciones 44 y 45).
- Los hinchamientos finales alcanzados en las trayectorias de reducción de la succión hasta valores nulos son comparables a los medidos en los ensayos de saturación por inundación directa de las muestras.
- En trayectorias de carga tras una reducción de la succión se observa un aumento de la deformabilidad de la bentonita. Este aumento es debido en su mayor parte a la reducción de la presión aparente de preconsolidación debida al aumento del volumen de poros experimentado durante la hidratación. La variación de la presión aparente de preconsolidación en trayectorias de carga a succión constante se muestra en la Figura 61.
- El valor de las pendientes de la relación entre el índice de poros y el logaritmo de la carga para niveles de tensión inferiores y superiores a la presión aparente de preconsolidación y para trayectorias de descarga se indica en las ecuaciones [35] a [41]. El efecto de la succión es significativo en la pendiente de las trayectorias de carga por encima de la presión aparente de consolidación. En las trayectorias de descarga o en cargas por debajo de dicha presión el efecto de la succión es pequeño (Figura 62).
- En condiciones saturadas, se han medido deformabilidades en trayectorias de descarga que son mayores a las deformabilidades por aumento de la carga por debajo de la presión aparente de preconsolidación.
- Un aumento inicial de la succión no parece tener una influencia significativa en el valor del hinchamiento final de la muestra en una trayectoria de saturación

bajo carga. Los cambios de volumen producidos por este aumento inicial de la succión son pequeños y prácticamente reversibles.

- En los ensayos con control de la deformación máxima se pueden distinguir dos fases. En una primera etapa la trayectoria del suelo en el plano tensión/succión viene controlada por la relación entre la deformabilidad del suelo frente a cambios de succión y de carga. Cuanto más rígido sea el suelo frente a un aumento de carga, más rápidamente aumenta el valor de la tensión vertical al reducirse la succión. En una segunda fase, cuando la carga se acerca al valor de la presión de preconsolidación aparente correspondiente a cada succión, la rigidez del suelo frente a aumentos de la carga disminuye drásticamente y, a partir de ese momento, la disminución de succión conduce a la reducción o a aumentos pequeños de la presión de hinchamiento. En las cercanías de la succión nula, con el suelo saturado, el principio de tensiones efectivas conduce a que una disminución de succión se vea compensada con un aumento de la misma magnitud en la presión de hinchamiento.
- La presión de hinchamiento está muy influenciada por la deformación permitida en las trayectorias de disminución de succión. Las presiones de hinchamiento obtenidas en los ensayos con control de la succión están en el rango de las obtenidas para el mismo valor de la densidad seca final en los ensayos de saturación por inundación. La influencia del secado inicial hasta succiones del orden de 400 MPa se traduce en un ligero incremento de la presión de hinchamiento debido a la disminución de la densidad ocasionada durante el secado.
- En los procesos de descarga una vez saturada la muestra, los cambios de volumen han sido elevados. La pendiente de la relación entre la magnitud de la carga y el índice de poros del suelo se indica en la Figura 71.
- Resulta difícil establecer conclusiones definitivas acerca del efecto de la temperatura sobre el comportamiento mecánico de la arcilla en base al limitado número de ensayos realizado. De los ensayos edométricos realizados a altas temperaturas puede desprenderse que la expansión debida a la disminución de la succión es mayor cuanto mayor sea la temperatura. El efecto de la temperatura en la rigidez queda enmascarado por los cambios de estructura del suelo durante la fase de reducción de succión previa a la aplicación de carga.
- Se ha estudiado el proceso de cierre de juntas entre bloques de bentonita cuando se inyecta agua a presión. La toma de agua por la arcilla se realiza desde la superficie de hidratación directa y desde las juntas hacia el interior de los bloques (Figura 76). El volumen de agua tomado inicialmente depende de la presión de inyección, disminuyendo considerablemente si la hidratación se produce a presiones muy bajas. El tiempo de cierre de una fisura, si hay circulación libre de agua por ella, es mayor cuánto mayor sea la presión de inyección y el volumen de la fisura.
- Se ha medido la compresibilidad de las juntas entre bloques frente a cargas normales al plano de las juntas. Las curvas desplazamiento/carga para varios grados de saturación se muestran en la Figura 77.

Tras la campaña de ensayos realizada puede decirse que se dispone de una amplia caracterización termo-hidro-mecánica de la bentonita. Sin embargo, en algunos aspectos, pese a los esfuerzos realizados, la información disponible es todavía escasa. Algunos de estos aspectos son los siguientes:

- Es importante conocer el efecto de la temperatura sobre la curva de retención. Para ello es necesaria su determinación a diferentes temperaturas y en condiciones de confinamiento.
- En los aspectos relativos a la permeabilidad, sería necesario completar el conocimiento del efecto de la saturación parcial (mediante el retroanálisis de nuevos ensayos de infiltración), del efecto del cambio de estructura del suelo durante la hidratación en condiciones confinadas, y del estudio de la posible existencia de un gradiente umbral para el flujo cuando los gradientes aplicados sean muy bajos.
- El efecto de la temperatura en el comportamiento mecánico debe ser estudiado. Es especialmente significativa la variación de las deformaciones de hinchamiento y de la presión de hinchamiento cuando cambia la temperatura.
- El efecto del contenido en sales del agua de hidratación sobre el comportamiento de la bentonita es otra área de interés sobre la que el conocimiento disponible es escaso.
- La definición de los parámetros de los modelos elastoplásticos podría mejorarse si se realizaran ensayos en los que pudieran medirse con claridad la magnitud de las deformaciones elásticas e irreversibles. Ello implica la realización de ensayos con trayectorias de carga y de succión con ciclos de carga/descarga y de humedecimiento/secado que, aunque se alejan de las experimentadas en la arcilla de la barrera, permiten una obtención más directa de los parámetros de los modelos mecánicos. El análisis de los ensayos mecánicos también se vería favorecido con el conocimiento completo del estado tensional aplicado sobre el suelo, ya sea mediante la medida de las tensiones laterales en los ensayos edométricos ya sea mediante el empleo de aparatos triaxiales.
- El estudio de la microestructura de la bentonita puede resultar útil para entender tanto los aspectos hidráulicos relacionados con la curva de retención y la permeabilidad de la bentonita, como aspectos relacionados con su comportamiento mecánico.

6. BIBLIOGRAFÍA

- ENRESA (1994): Almacenamiento geológico profundo de residuos radiactivos de alta actividad (AGP). Conceptos preliminares de referencia. Publicación Técnica 07/94. Madrid. 60 pp.
- ENRESA (1998): FEBEX. Bentonite: origin, properties and fabrication of blocks. *Publicación Técnica* 4/98. Madrid. 146 pp.
- ENRESA (2000): Full-scale engineered barriers experiment for a deep geological repository for high level radioactive waste in crystalline host rock (FEBEX Project.). Final Report. *Publicación Técnica* 1/2000. Madrid. 354 pp.
- GENS, A. & ALONSO, E. (1992). A framework for the behaviour of unsaturated expansive clays. *Can. Geotech. J.* 29 : 1013-1032.
- LLORET, A.; VILLAR, M.V. & PINTADO, X.(1997): Plan de trabajo de la experimentación termo-hidro-mecánica durante la etapa operacional del Proyecto FEBEX.
- SING, K.S.W., EVERETT, D.H., HAUL, R.A.W., MOSCOU, L., PIEROTTI, R.A., ROUQUÉROL, J. AND SIEMIENIEWSKA, T.(1984): Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity. *Pure & Appl. Chem.*, 57(4): 603-619. IUPAC.
- TUNCER, E.R.(1988): Pore size distribution characteristics of tropical soils in relation to engineering properties. *2nd Inst. Conf. on Geomechanics in Tropical Soils* 1: 63-70. Singapore.
- UPC (1998): FEBEX. Preoperational thermo-hydro-mechanical modelling of the “mock up” test. Publicación técnica num. 10/98. ENRESA.
- LLORET, A. & PINTADO, X. (1999): Ensayos THM para el proyecto FEBEX realizados por la UPC-DIT. Informe FEBEX 70-UPC-M-0-03.
- VAN GENUCHTEN, M. TH.(1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal* 44: 892-898.
- VILLAR, M.V.(1999): Ensayos THM para el Proyecto FEBEX. versión 0. CIEMAT/DIAE/54111/9/99. Informe FEBEX 70-IMA-L-0-66.
- VILLAR, M.V.(2000): Caracterización termo-hidro-mecánica de una bentonita de Cabo de Gata. *Tesis Doctoral*. Universidad Complutense de Madrid. 396 pp.

ANEXO I: RESULTADOS CIEMAT

Tabla Anexo I- I: Conductividad térmica (λ) de probetas de densidades secas entre 1,49 y 1,55 g/cm³ (densidad seca media 1,53 g/cm³)

ρ_d (g/cm ³)	w (%)	S_r^* (%)	λ paralela (W/m·K)	λ perpend. (W/m·K)	θ
1,53	0,1	0,00	0,48		0,00
1,55	0,9	0,03	0,48		0,01
1,55	0,9	0,03	0,50		0,01
1,53	1,7	0,06	0,50		0,03
1,49	14,2	0,48	0,75		0,24
1,51	15,0	0,51	0,76	0,71	0,26
1,54	18,1	0,64	0,92		0,33
1,52	20,0	0,70	0,91	0,90	0,36
1,52	25,0	0,87	1,09	1,15	0,48

*Grado de saturación calculado considerando la densidad del agua libre

Tabla Anexo I- II: Conductividad térmica (λ) de probetas de densidades secas entre 1,58 y 1,65 g/cm³ (densidad seca media 1,61 g/cm³)

ρ_d (g/cm ³)	w (%)	S _r * (%)	λ paralela (W/m·K)	λ perpend. (W/m·K)	θ
1,58	0,1	0,00	0,48		0,00
1,60	1,0	0,04	0,55		0,02
1,59	1,1	0,04	0,58		0,02
1,60	2,0	0,08	0,57		0,03
1,63	12,6	0,52	0,73		0,23
1,60	13,1	0,51	0,68		0,24
1,60	13,3	0,52	0,61		0,24
1,64	13,8	0,57	0,91		0,26
1,58	15,0	0,57	0,81	0,73	0,27
1,63	15,0	0,62	0,95	0,89	0,28
1,65	15,0	0,64	1,00	0,89	0,28
1,59	15,4	0,60	0,70		0,28
1,59	15,5	0,60	0,70		0,28
1,60	15,5	0,61	0,78		0,29
1,61	18,6	0,74	1,12		0,36
1,59	20,0	0,77	1,12	0,99	0,38
1,65	20,0	0,85	1,18	1,16	0,40
1,60	20,4	0,80	1,22		0,39
1,63	25,3	1,04	1,27		0,52
1,64	25,4	1,06	1,31		0,52
1,62	26,0	1,05	1,27		0,53
1,62	26,2	1,06	1,30		0,54
1,60	26,6	1,04	1,25		0,54
1,61	27,1	1,08	1,28		0,55
1,59	27,4	1,06	1,26		0,56

*Grado de saturación calculado considerando la densidad del agua libre

Tabla Anexo I- III: Conductividad térmica (λ) de probetas de densidades secas entre 1,66 y 1,74 g/cm³ (densidad seca media 1,70 g/cm³)

ρ_d (g/cm ³)	w (%)	S _r * (%)	λ paralela (W/m·K)	λ perpend. (W/m·K)	θ
1,67	0,1	0,00	0,64		0,00
1,72	0,5	0,02	0,63		0,01
1,70	1,2	0,06	0,68		0,02
1,74	1,4	0,07	0,72		0,02
1,66	1,9	0,08	0,62		0,03
1,73	11,9	0,57	0,83		0,23
1,72	12,9	0,61	0,81		0,25
1,70	13,1	0,60	0,79		0,25
1,67	13,4	0,58	1,05		0,25
1,74	13,7	0,67	0,90		0,27
1,70	14,4	0,66	1,03		0,28
1,69	15,0	0,68	0,95	0,95	0,29
1,71	15,0	0,70	0,94		0,29
1,70	16,8	0,77	1,19		0,33
1,71	17,0	0,80	1,23		0,34
1,67	20,0	0,88	1,14	1,17	0,40
1,72	20,0	0,95	1,43	1,39	0,41
1,73	21,6	1,04	1,22		0,45
1,70	21,8	1,00	1,27		0,45
1,69	22,3	1,01	1,25		0,46
1,71	22,6	1,05	1,25		0,47
1,69	22,7	1,03	1,27		0,47

*Grado de saturación calculado considerando la densidad del agua libre

Tabla Anexo I- IV: Conductividad térmica (λ) de probetas de densidad seca 1,75 g/cm³

ρ_d (g/cm ³)	w (%)	S _r * (%)	λ paralela (W/m·K)	θ
1,76	16,2	0,82	1,27	0,33
1,75	20,4	1,01	1,24	0,43
1,76	20,5	1,04	1,23	0,43

*Grado de saturación calculado considerando la densidad del agua libre

Tabla Anexo I- V: Valores de humedad y densidad obtenidos al final de cada escalón en una trayectoria de humectación para pastillas compactadas a densidad seca inicial 1,75 g/cm³ (media de 3 determinaciones)

Succión (MPa)	ρ_d (g/cm ³)	Humedad (%)	S _r (%)
148,2	1,76	13,6	69
79,2	1,66	16,0	69
34,3	1,52	21,3	74
13,3	1,42	24,6	74
6,6	1,35	27,7	74
3,8	1,29	29,9	74
2,0	1,17	35,7	74
1,0	1,13	39,7	77
0,5	1,09	43,5	80
0,1	0,98	50,4	77

Tabla Anexo I- VI: Valores de humedad y densidad obtenidos al final de cada escalón en una trayectoria de secado/humectación para pastillas compactadas (media de 3 determinaciones)

Densidad seca inicial 1,75 g/cm ³				Densidad seca inicial 1,70 g/cm ³			
Succión (MPa)	ρ_d (g/cm ³)	Humedad (%)	S _r (%)	Succión (MPa)	ρ_d (g/cm ³)	Humedad (%)	S _r (%)
140,0	1,76	13,8	70	139,2	1,66	13,3	57
217,0	1,77	12,3	63	196,1	1,67	11,2	49
313,0	1,81	8,9	49	259,8	1,69	9,3	42
223,0	1,77	11,5	59	356,3	1,71	6,4	30
135,0	1,73	13,5	65	516,9	1,72	4,4	21
29,0	1,49	21,1	70	264,2	1,69	7,8	35
13,3	1,42	24,1	72	187,3		10,9	
6,7	1,34	26,6	71	126,4		12,6	
3,9	1,24	28,5	65	74,9	1,56	15,7	59
2,0	1,19	36,1	77	32,9	1,45	20,0	63
1,0	1,12	40,0	77	12,4	1,36	23,5	65
0,5	1,06	43,8	77				
0,1	1,04	56,8	95				

Tabla Anexo I- VII: Valores de humedad y densidad obtenidos al final de cada escalón en una trayectoria de humectación para pastillas talladas en sentido perpendicular y paralelo al esfuerzo de compactación del bloque (media de 3 determinaciones)

Succión (MPa)	TALLADO PERPENDICULAR			TALLADO PARALELO		
	ρ_d (g/cm ³)	Humedad (%)	S _r (%)	ρ_d (g/cm ³)	Humedad (%)	S _r (%)
116,7	1,67	14,1	61	1,67	14,2	62
79,2	1,61	16,0	64	1,62	16,1	65
31,2	1,48	20,7	67	1,47	20,7	67
13,5	1,40	23,4	69	1,39	23,6	68
3,9	1,30	28,5	71	1,25	29,2	68
2,0	1,14	34,1	68	1,21	33,8	74
1,0	1,08	36,5	66	1,06	37,0	65
0,5	1,05	40,3	69	1,06	40,4	71
0,1	0,97	53,9	82	0,97	51,2	78

Tabla Anexo I- VIII: Valores de humedad y densidad obtenidos al final de cada escalón en una trayectoria de secado/humectación para pastillas talladas en sentido perpendicular y paralelo al esfuerzo de compactación del bloque (media de 3 determinaciones)

Succión (MPa)	TALLADO PERPENDICULAR			TALLADO PARALELO		
	ρ_d (g/cm ³)	Humedad (%)	S _r (%)	ρ_d (g/cm ³)	Humedad (%)	S _r (%)
116,7	1,64	14,1	59	1,67	14,3	63
199,4	1,67	11,1	49	1,70	11,3	52
265,7	1,69	9,3	42	1,72	9,4	45
394,4	1,71	6,2	29	1,75	6,4	32
265,7	1,69	8,1	36	1,73	8,2	39
182,2	1,66	10,6	46	1,69	10,8	49
116,7	1,61	13,2	53	1,64	13,2	55
69,7	1,56	16,1	59	1,57	16,2	61
31,2	1,46	20,0	63	1,49	20,2	67
12,9	1,38	22,8	64	1,41	23,1	68
4,0	1,27	28,7	69	1,28	29,2	71
2,0	1,17	33,1	68	1,20	32,0	69
1,0	1,11	37,1	70	1,13	35,7	69
0,5	1,06	39,9	69	1,08	39,2	70
0,1	0,97	49,0	75	0,99	47,4	74

Tabla Anexo I- IX: Resultados de la curva de retención en trayectoria de humectación a densidad seca nominal 1,60 g/cm³ (EDN1_6)

Succión (MPa)	ρ_d (g/cm ³)	w (%)	S_r^*
130,0	1,59	12,8	0,49
14,0	1,58	23,8	0,90
8,0	1,58		
5,0	1,58	27,1	1,03
3,0	1,58	27,9	1,06
1,5	1,58	29,0	1,10
0,5	1,58	29,8	1,13
0,1	1,58	29,2	1,11
0,0	1,58	29,8	1,13

*Grado de saturación calculado considerando la densidad del agua libre

Tabla Anexo I- X: Resultados de la curva de retención en trayectoria de humectación/secado/humectación a densidad seca nominal 1,60 g/cm³ (EDN4_8)

Succión (MPa)	ρ_d (g/cm ³)	W (%)	S_r^*	P_s (MPa)
130,0	1,60	14,4	0,57	0,0
0,0	1,53	27,9	0,99	5,7
0,1	1,53	28,1	1,00	5,7
0,5	1,53	27,6	0,98	5,7
1,5	1,54	26,3	0,94	5,6
3,0	1,54	27,1	0,98	5,6
5,0	1,56	26,0	0,96	5,5
8,0	1,58	24,9	0,95	5,4
14,0	1,62	23,0	0,93	5,1
8,0	1,61	23,3	0,93	5,4
3,0	1,60	23,8	0,94	5,5
1,5	1,59	25,7	0,99	5,5
0,5	1,58	25,6	0,98	5,5
0,1	1,49	32,2	1,08	5,6
0,0	1,49	30,4	1,02	5,6

*Grado de saturación calculado considerando la densidad del agua libre

Tabla Anexo I- XI: Resultados de la curva de retención en trayectoria de humectación/secado/humectación a densidad seca nominal 1,75 g/cm³ (EDN5_7)

Succión (MPa)	ρ_d (g/cm ³)	w (%)	S_r^*	P_s (MPa)
130,0	1,75	13,4	0,67	0,0
0,0	1,65	26,5	1,13	9,4
0,1	1,64	26,1	1,09	9,4
0,5	1,62	26,5	1,08	9,4
1,5	1,63	26,5	1,08	9,3
3,0	1,64	25,6	1,07	9,2
5,0	1,66	25,6	1,11	9,1
8,0	1,67	24,9	1,08	8,9
14,0	1,71	24,3	1,14	8,2
8,0	1,70	24,0	1,09	8,2
5,0	1,68	24,4	1,09	8,4
3,0			1,25	8,5
1,5	1,68	25,1	1,12	8,6
0,5	1,65	25,4	1,08	8,7
0,1	1,68	25,3	1,12	8,7
0,0	1,68	25,9	1,15	8,7

*Grado de saturación calculado considerando la densidad del agua libre

Tabla Anexo I- XII: Resultados de la curva de retención en trayectoria de humectación/secado a densidad seca nominal 1,75 g/cm³ (EDS1_11)

Succión (MPa)	ρ_d (g/cm ³)	W (%)	S_r^*	P_s (MPa)
114	1,75	13,4	0,67	0,4
75	1,74	16,3	0,80	2,4
31	1,74	19,3	0,94	9,6
14	1,72	22,2	1,04	9,6
4	1,69	24,7	1,12	9,6
2	1,69	26,4	1,20	9,6
4	1,69	25,9	1,17	9,6
13	1,69	24,5	1,11	9,6
34	1,72	21,6	1,03	9,6
72	1,75	19,4	0,97	6,4
132	1,77	14,6	0,74	0,1
179	1,77	12,0	0,62	0,1
251	1,77	8,2	0,42	0,1
476	1,79	6,0	0,32	0,1

*Grado de saturación calculado considerando la densidad del agua libre

Tabla Anexo I- XIII: Resultados de la curva de retención en trayectoria de humectación/secado a densidad seca nominal 1,67 g/cm³ (EDS5_6)

Succión (MPa)	ρ_d (g/cm ³)	w (%)	S_r^*	P_s (MPa)
118	1,67	13,0	0,56	0,0
73				0,3
33				3,5
14	1,61	19,3	0,78	4,5
4	1,61	27,7	1,12	5,4
1	1,58	28,5	1,15	5,6
4	1,59	29,3	1,18	5,6
13	1,58	29,0	1,17	5,4
22	1,63	28,8	1,19	5,6
60	1,68	19,6	0,87	1,6
130	1,69	16,3	0,75	1,6

*Grado de saturación calculado considerando la densidad del agua libre

Tabla Anexo I- XIV: Resultados de los ensayos de conductividad hidráulica con agua destilada

ρ_d (g/cm ³)	e	w inicial (%)	w final (%)	S _r * final (%)	k _w (m/s)	k _{iw} (m ²)
1,30	1,084	14,3	41,3	103	1,1·10 ⁻¹²	1,2·10 ⁻¹⁹
1,34	1,019	13,6	38,3	102	7,6·10 ⁻¹³	7,7·10 ⁻²⁰
1,36	0,988	14,4	39,6	108	7,2·10 ⁻¹³	7,3·10 ⁻²⁰
1,39	0,938	13,8	39,0	112	3,5·10 ⁻¹³	3,6·10 ⁻²⁰
1,43	0,894	14,0	34,2	103	2,2·10 ⁻¹³	2,3·10 ⁻²⁰
1,43	0,886	12,4	35,1	107	2,2·10 ⁻¹³	2,2·10 ⁻²⁰
1,44	0,874	14,7	36,5	113	2,0·10 ⁻¹³	2,0·10 ⁻²⁰
1,47	0,841	13,7	31,9	102	1,0·10 ⁻¹³	1,0·10 ⁻²⁰
1,50	0,797	14,4	34,1	116	1,1·10 ⁻¹³	1,1·10 ⁻²⁰
1,50	0,795	13,9	30,6	104	8,2·10 ⁻¹⁴	8,3·10 ⁻²¹
1,54	0,752	14,7	29,4	106	4,1·10 ⁻¹⁴	4,2·10 ⁻²¹
1,58	0,709	14,0	31,3	119	8,3·10 ⁻¹⁴	8,5·10 ⁻²¹
1,59	0,698	14,8	30,5	118	3,1·10 ⁻¹⁴	3,2·10 ⁻²¹
1,59	0,698	12,5	28,5	110	6,4·10 ⁻¹⁴	6,5·10 ⁻²¹
1,60	0,688	15,0	31,1	122	5,9·10 ⁻¹⁴	6,0·10 ⁻²¹
1,60	0,688	13,3	28,9	113	6,0·10 ⁻¹⁴	6,1·10 ⁻²¹
1,61	0,677	11,7	29,8	119	5,9·10 ⁻¹⁴	6,0·10 ⁻²¹
1,64	0,644	14,7	26,2	110	2,8·10 ⁻¹⁴	2,8·10 ⁻²¹
1,67	0,617	14,5	28,5	125	3,7·10 ⁻¹⁴	3,8·10 ⁻²¹
1,69	0,598	11,7	25,5	115	3,2·10 ⁻¹⁴	3,3·10 ⁻²¹
1,70	0,587	14,3	24,9	114	2,2·10 ⁻¹⁴	2,2·10 ⁻²¹
1,70	0,588	14,8	21,3	98	3,8·10 ⁻¹⁴	3,9·10 ⁻²¹
1,70	0,588	15,1	20,7	95	2,9·10 ⁻¹⁴	3,0·10 ⁻²¹
1,70	0,588	13,4	26,3	121	3,8·10 ⁻¹⁴	3,9·10 ⁻²¹
1,70	0,588	11,9	27,3	125	4,1·10 ⁻¹⁴	4,2·10 ⁻²¹
1,73	0,558	14,3	23,3	113	1,8·10 ⁻¹⁴	1,8·10 ⁻²¹
1,74	0,547	13,8	25,1	124	3,0·10 ⁻¹⁴	3,0·10 ⁻²¹
1,75	0,540	15,5	21,9	109	5,8·10 ⁻¹⁵	5,9·10 ⁻²²
1,76	0,536	15,2	22,8	115	1,2·10 ⁻¹⁴	1,2·10 ⁻²¹
1,77	0,524	15,8	21,6	112	9,6·10 ⁻¹⁵	9,8·10 ⁻²²
1,83	0,477	13,0	20,9	118	1,1·10 ⁻¹⁴	1,1·10 ⁻²¹

ρ_d (g/cm ³)	e	w inicial (%)	w final (%)	S _r * final (%)	k _w (m/s)	k _{iw} (m ²)
1,83	0,478	14,4	19,8	112	4,2·10 ⁻¹⁵	4,3·10 ⁻²²
1,84	0,470	14,2	23,0	132	2,6·10 ⁻¹⁴	2,6·10 ⁻²¹

*Grado de saturación calculado considerando la densidad del agua libre

Tabla Anexo I- XV: Resultados de los ensayos de conductividad hidráulica realizados con agua granítica

ρ_d (g/cm ³)	w inicial (%)	w final (%)	S _r * final (%)	k _w (m/s)	k _w destilada (m/s)	Desviación %
1,36	13,9	39,0	107	5,6·10 ⁻¹³	5,5·10 ⁻¹²	2
1,38	15,8	37,7	106	6,1·10 ⁻¹³	4,3·10 ⁻¹³	41
1,41	13,8	36,8	109	2,1·10 ⁻¹³	2,7·10 ⁻¹³	-20
1,48	15,3	32,6	107	1,2·10 ⁻¹³	1,1·10 ⁻¹³	9
1,52	16,0	31,0	107	5,9·10 ⁻¹⁴	8,7·10 ⁻¹⁴	-32
1,60	13,7	26,6	104	2,3·10 ⁻¹⁴	5,1·10 ⁻¹⁴	-55
1,65	14,3	30,2	127	6,4·10 ⁻¹⁴	3,6·10 ⁻¹⁴	78
1,69	14,8	24,3	111	1,4·10 ⁻¹⁴	2,6·10 ⁻¹⁴	-47
1,74	13,8	23,6	116	1,5·10 ⁻¹⁴	1,9·10 ⁻¹⁴	-18
1,80	15,3	21,2	114	8,0·10 ⁻¹⁵	1,3·10 ⁻¹⁴	-39

*Grado de saturación calculado considerando la densidad del agua libre

Tabla Anexo I- XVI: Resultados de los ensayos de conductividad hidráulica realizados con agua salina

ρ_d (g/cm ³)	w inicial (%)	w final (%)	S _r [*] final	k _w (m/s)	k _w destilada (m/s)	Desviación (%)
1,31	15,7	39,4	101	3,6·10 ⁻¹²	1,1·10 ⁻¹²	233
1,33	15,0	41,2	108	9,7·10 ⁻¹²	8,4·10 ⁻¹³	1062
1,39	12,9	35,0	100	1,5·10 ⁻¹²	3,9·10 ⁻¹³	280
1,39	14,8	36,4	104	3,5·10 ⁻¹³	3,7·10 ⁻¹³	-5
1,45	13,5	33,3	104	7,8·10 ⁻¹³	1,7·10 ⁻¹³	370
1,50	14,7	31,6	106	1,7·10 ⁻¹³	1,0·10 ⁻¹³	67
1,58	13,2	28,2	107	1,1·10 ⁻¹³	5,8·10 ⁻¹⁴	91
1,59	14,0	28,5	111	1,8·10 ⁻¹⁴	5,1·10 ⁻¹⁴	-64
1,62	13,7	27,1	110	4,7·10 ⁻¹⁴	4,3·10 ⁻¹⁴	9
1,65	13,6	26,3	112	3,1·10 ⁻¹⁴	3,4·10 ⁻¹⁴	-10
1,66	14,4	26,8	115	8,4·10 ⁻¹⁴	3,2·10 ⁻¹⁴	160
1,68	14,2	25,7	115	1,8·10 ⁻¹⁴	2,8·10 ⁻¹⁴	-36
1,72	13,3	24,1	115	5,4·10 ⁻¹⁴	2,1·10 ⁻¹⁴	154
1,74	14,1	23,9	116	7,1·10 ⁻¹⁴	1,9·10 ⁻¹⁴	270

*Grado de saturación calculado considerando la densidad del agua libre

Tabla Anexo I- XVII: Valores de conductividad hidráulica obtenidos en muestra tallada en sentido perpendicular al esfuerzo de compactación

ρ_d (g/cm ³)	w inicial (%)	w final (%)	S _r [*] final (%)	k _w (m/s)	k _w teórico (m/s)	Desviación (%)
1,39	14,3	36,8	105	2,3·10 ⁻¹³	3,7·10 ⁻¹³	-38
1,54	15,9	33,2	119	6,0·10 ⁻¹⁴	7,4·10 ⁻¹⁴	-19
1,58		30,7	116	6,4·10 ⁻¹⁴	5,8·10 ⁻¹⁴	10
1,58	14,9	31,4	120	5,8·10 ⁻¹⁴	5,6·10 ⁻¹⁴	3
1,59	13,5	27,8	108	3,9·10 ⁻¹⁴	5,3·10 ⁻¹⁴	-26
1,64	15,3	28,1	117	5,0·10 ⁻¹⁴	3,8·10 ⁻¹⁴	30
1,66	13,9	24,7	106	2,7·10 ⁻¹⁴	3,3·10 ⁻¹⁴	-19
1,69	16,3	23,4	105	9,2·10 ⁻¹⁵	2,7·10 ⁻¹⁴	-66

*Grado de saturación calculado considerando la densidad del agua libre

Tabla Anexo I- XVIII: Valores de conductividad hidráulica obtenidos en muestra tallada en sentido paralelo al esfuerzo de compactación

ρ_d (g/cm ³)	w inicial (%)	w final (%)	S _r * final (%)	k _w (m/s)	k _w teórico (m/s)	Desviación %
1,33	15,2	38,9	102	5,9·10 ⁻¹³	8,4·10 ⁻¹³	-30
1,49	14,7	33,5	111	1,3·10 ⁻¹³	1,0·10 ⁻¹³	25
1,49	14,2	34,7	115	1,3·10 ⁻¹³	1,0·10 ⁻¹³	28
1,54		30,1	108	6,4·10 ⁻¹⁴	7,3·10 ⁻¹⁴	-12
1,57	16,2	28,4	107	4,3·10 ⁻¹⁴	6,0·10 ⁻¹⁴	-27
1,67	17,3	25,2	110	1,8·10 ⁻¹⁴	3,1·10 ⁻¹⁴	-41
1,67	13,7	24,1	106	1,5·10 ⁻¹⁴	3,0·10 ⁻¹⁴	-52
1,74	12,4	21,8	107	1,2·10 ⁻¹⁴	1,9·10 ⁻¹⁴	-37

*Grado de saturación calculado considerando la densidad del agua libre

Tabla Anexo I- XIX: Valores de permeabilidad obtenidos con flujo de gas para la arcilla compactada a densidad seca nominal de 1,50 g/cm³

ρ_d (g/cm ³)	w (%)	S _r (%)	k _g (m/s)	k _{ig} ·k _{rg} (m ²)
1,53	11,2	40	6,3·10 ⁻⁸	1,0·10 ⁻¹³
1,50	13,9	47	9,5·10 ⁻⁸	1,5·10 ⁻¹³
1,50	15,0	51	1,0·10 ⁻⁷	1,7·10 ⁻¹³
1,49	15,9	53	1,6·10 ⁻⁷	2,6·10 ⁻¹³
1,54	23,9	86	3,1·10 ⁻¹⁰	5,1·10 ⁻¹⁶

Tabla Anexo I- XX: Valores de permeabilidad obtenidos con flujo de gas para la arcilla compactada a densidad seca nominal de 1,60 g/cm³

ρ_a (g/cm ³)	w (%)	S _r (%)	k _g (m/s)	k _{ig} ·k _{rg} (m ²)
1,57	7,3	27	2,8·10 ⁻⁷	4,6·10 ⁻¹³
1,55	11,3	41	4,9·10 ⁻⁸	8,0·10 ⁻¹⁴
1,56	11,6	43	4,3·10 ⁻⁹	7,0·10 ⁻¹⁵
1,60	11,9	47	7,2·10 ⁻⁸	1,2·10 ⁻¹³
1,61	12,1	48	5,6·10 ⁻⁸	9,2·10 ⁻¹⁴
1,60	12,4	49	9,6·10 ⁻⁸	1,6·10 ⁻¹³
1,58	13,6	52	1,5·10 ⁻⁷	2,4·10 ⁻¹³
1,58	14,2	54	6,5·10 ⁻⁸	1,1·10 ⁻¹³
1,61	14,3	57	7,3·10 ⁻⁸	1,2·10 ⁻¹³
1,59	14,7	57	1,6·10 ⁻⁸	2,6·10 ⁻¹⁴
1,63	16,1	66	1,4·10 ⁻⁹	2,3·10 ⁻¹⁵
1,60	16,2	64	1,7·10 ⁻⁸	2,8·10 ⁻¹⁴
1,60	18,2	71	8,8·10 ⁻¹⁰	1,4·10 ⁻¹⁵
1,61	18,4	73	5,5·10 ⁻⁹	8,9·10 ⁻¹⁵
1,63	22,4	92	2,9·10 ⁻¹²	4,7·10 ⁻¹⁸

Tabla Anexo I- XXI: Valores de permeabilidad obtenidos con flujo de gas para la arcilla compactada a densidad seca nominal de 1,70 g/cm³

ρ_d (g/cm ³)	w (%)	S _r (%)	k _g (m/s)	k _{ig} ·k _{rg} (m ²)
1,75*	5,0	25	5,9·10 ⁻⁹	9,5·10 ⁻¹⁵
1,68	6,1	27	5,3·10 ⁻⁸	8,5·10 ⁻¹⁴
1,66	6,4	28	8,3·10 ⁻⁸	1,4·10 ⁻¹³
1,67	7,2	32	3,9·10 ⁻⁸	6,3·10 ⁻¹⁴
1,70	8,4	39	2,4·10 ⁻⁸	3,8·10 ⁻¹⁴
1,70	10,2	47	1,5·10 ⁻⁸	2,4·10 ⁻¹⁴
1,70	10,7	49	1,7·10 ⁻⁹	2,8·10 ⁻¹⁵
1,68	11,0	49	1,0·10 ⁻⁸	1,6·10 ⁻¹⁴
1,67	12,0	53	1,8·10 ⁻⁸	2,9·10 ⁻¹⁴
1,69	12,0	54	1,5·10 ⁻⁸	2,5·10 ⁻¹⁴
1,68	12,4	55	7,1·10 ⁻⁹	1,1·10 ⁻¹⁴
1,70	12,4	57	1,9·10 ⁻⁸	3,1·10 ⁻¹⁴
1,69	12,8	58	1,6·10 ⁻⁸	2,6·10 ⁻¹⁴
1,70	13,8	63	2,2·10 ⁻⁹	3,5·10 ⁻¹⁵
1,70	14,0	61	5,3·10 ⁻⁹	8,7·10 ⁻¹⁵
1,70	14,0	64	1,0·10 ⁻⁸	1,7·10 ⁻¹⁴
1,64	14,4	60	4,4·10 ⁻¹⁰	7,2·10 ⁻¹⁶

* compactada a densidad seca 1,70 g/cm³ y secada en estufa

Tabla Anexo I- XXII: Valores de permeabilidad obtenidos con flujo de gas para la arcilla compactada a densidad seca nominal de 1,80 y 1,90 g/cm³

ρ_d (g/cm ³)	w (%)	S _r (%)	k _g (m/s)	k _{ig} ·k _{rg} (m ²)
1,81*	1,3	7	2,8·10 ⁻⁸	4,5·10 ⁻¹⁴
1,80	12,7	69	1,8·10 ⁻⁹	2,8·10 ⁻¹⁵
1,80	12,4	67	1,3·10 ⁻⁹	2,2·10 ⁻¹⁵
1,86*	0,9	5	1,4·10 ⁻⁸	2,3·10 ⁻¹⁴
1,90	12,4	80	1,1·10 ⁻¹⁰	1,8·10 ⁻¹⁶

* compactada a densidad seca 1,70 g/cm³ y secada en estufa

Tabla Anexo I- XXIII: Ensayos de infiltración en celda de acero

	SAT1	SAT2	SAT3	SAT4	SAT5
ρ_d (g/cm³)	1,65	1,65	1,70	1,70	1,65
w inicial (%)	14,2	14,2	13,9	14,1	14,4
Duración (días)	29	15	10	10	59
Posición (cm)	w (%)				
0,25	33,2	30,9	28,4	28,3	30,1
0,75	28,5	24,8	24	23	26,5
1,25	27,9	24,7	23,5	23,1	25,7
1,75	27,9	24,1	23,1	22,8	25,6
2,25	28,2	24,5	22,5	22,7	25,6
media	29,1	25,8	24,3	24,0	26,7

Tabla Anexo I- XXIV: Ensayos de infiltración isoterms realizados en celda de teflón

	Temperatura ambiente		60 °C	
Duración (días)	$\rho_d=1,60$ g/cm³	$\rho_d=1,75$ g/cm³	$\rho_d=1,60$ g/cm³	$\rho_d=1,75$ g/cm³
5	FB5	IB5	FA5	IA5
10	FB10	IB10		IA10
20	FB20	IB20		IA20
45	FB45	IB45		IA45
60		IB60		IA60

Tabla Anexo I- XXV: Humedad y densidad finales en función de la distancia a la superficie de hidratación en los ensayos realizados a temperatura ambiente con densidad seca inicial 1,60 g/cm³

	Distancia (cm)	0,63	1,25	2,50	3,75	5,00	6,25	7,50	8,75	Media
FB5	Humedad (%)	41,4	31,3	25,0	23,1	21,7	21,6	21,3	21,2	25,8
FB10	Humedad (%)	41,4	34,2	29,5	25,8	23,4	22,0	21,4	21,0	27,3
	ρ_d (g/cm ³)	1,27	1,39	1,40	1,44	1,44	1,44	1,46	1,48	1,42
FB20	Humedad (%)	39,2	35,6	30,1	26,1	24,5	23,6	22,5	22,0	28,0
	ρ_d (g/cm ³)	1,32	1,40	1,42	1,43	1,44	1,43	1,40	1,46	1,41
FB45	Humedad (%)	46,0	40,1	37,2	35,1	31,5	27,6	25,6	24,6	33,5
	ρ_d (g/cm ³)	1,21	1,31	1,35	1,39	1,41	1,43	1,43	1,45	1,37

Tabla Anexo I- XXVI: Humedad y densidad finales en función de la distancia a la superficie de hidratación en el ensayo realizado a 60 °C con densidad seca inicial 1,60 g/cm³ (FA5)

Distancia (cm)	0,63	1,25	2,50	3,75	5,00	6,25	7,50	8,75	Media
Humedad (%)	39,6	34,1	31,4	28,2	24,2	22,8	22,0	22,6	28,1
ρ_d (g/cm ³)	1,30	1,39	1,42	1,42	1,45	1,46	1,47	1,47	1,42

Tabla Anexo I- XXVII: Humedad y densidad finales en función de la distancia a la superficie de hidratación en los ensayos realizados a temperatura ambiente con densidad seca inicial 1,75 g/cm³

	Distancia (cm)	0,63	1,25	2,50	3,75	5,00	6,25	7,50	8,75	Media
IB5	Humedad (%)	31,9	22,9	21,1	20,6	19,5	18,8	19,4	18,4	21,6
	ρ_d (g/cm ³)	1,38	1,57	1,55	1,58	1,59	1,60	1,58	1,62	1,56
IB10	Humedad (%)	30,3	24,3	21,8	21,1	20,3	19,5	19,5	19,4	22,0
	ρ_d (g/cm ³)	1,44	1,53	1,54	1,54	1,49	1,57	1,58	1,56	1,53
IB20	Humedad (%)	40,9	32,4	27,1	24,6	22,6	20,7	21,1	20,5	26,2
	ρ_d (g/cm ³)	1,28	1,42	1,46	1,51	1,52	1,58	1,51	1,56	1,48
IB45	Humedad (%)	36,9	29,6	25,8	24,8	24,3	23,3	21,7	20,7	25,9
	ρ_d (g/cm ³)	1,33	1,43		1,60	1,43	1,47	1,54	1,57	1,48
IB60	Humedad (%)	38,1	34,3	30,7	27,6	25,6	24,8	24,2	23,4	28,6
	ρ_d (g/cm ³)	1,31	1,41	1,44	1,45	1,50	1,52	1,51	1,52	1,46

Tabla Anexo I- XXVIII: Humedad y densidad finales en función de la distancia a la superficie de hidratación en los ensayos realizados a 60 °C con densidad seca inicial 1,75 g/cm³

	Distancia (cm)	0,63	1,25	2,50	3,75	5,00	6,25	7,50	8,75	Media
IA5	Humedad (%)	38,3	29,9	27,2	21,9	20,3	19,2	19,8	18,6	24,4
	ρ_d (g/cm ³)	1,31	1,46		1,54	1,51	1,57	1,52	1,57	1,50
IA10	Humedad (%)	38,3	32,3	28,5	25,5	24,0	23,5	21,9	20,5	26,8
	ρ_d (g/cm ³)	1,32	1,43	1,44	1,47	1,49	1,48	1,52	1,57	1,47
IA20	Humedad (%)	38,3	32,4	30,7	27,4	25,1	24,7	23,3	22,8	28,1
	ρ_d (g/cm ³)	1,32	1,41	1,43	1,49	1,48	1,50	1,52	1,56	1,46
IA45	Humedad (%)	36,4	31,0	30,5	29,1	27,9	26,8	25,6	24,9	29,0
	ρ_d (g/cm ³)	1,34	1,44	1,46	1,48	1,46	1,48	1,50	1,52	1,46
IA60	Humedad (%)	36,5	32,4	31,0	30,5	30,2	28,9	27,1	26,7	30,4
	ρ_d (g/cm ³)	1,35	1,43	1,45	1,46	1,46	1,48	1,51	1,54	1,46

Tabla Anexo I- XXIX: Resultados de los ensayos de hinchamiento bajo carga con agua destilada

Presión (MPa)	ρ_d inicial (g/cm³)	w inicial (%)	Deformación (%)	Duración (días)	w final (%)	ρ_d final (g/cm³)
5,0	1,62	12,8	-17,2	15	39,1	1,39
5,0	1,62	13,0	-17,8	14	38,3	1,37
5,0	1,62	13,3	-12,1	14	38,4	1,44
5,0	1,60	14,6	-17,2	21	40,1	1,37
5,0	1,62	13,2	-17,8	15	39,3	1,37
9,0	1,59	15,0	-13,4	20	37,2	1,40
9,0	1,61	13,7	-14,7	19	36,6	1,40
9,0	1,61	14,2	-15,8	20	36,7	1,39

Tabla Anexo I- XXX: Resultados de los ensayos de hinchamiento bajo carga con agua granítica

Presión (MPa)	ρ_d inicial (g/cm³)	w inicial (%)	Deformación (%)	Duración (días)	w final (%)	ρ_d final (g/cm³)
0,1	1,72	14,0	-28,6	7	35,1	1,34
0,5	1,72	13,9	-20,6	7	32,5	1,43
1,0	1,72	13,1	-18,3	21	32,1	1,46
3,0	1,72	13,0	-10,6	13	28,8	1,55
0,1	1,62	13,1	-25,1	7	41,0	1,29
0,1	1,61	13,1	-24,5	15	38,7	1,29
0,5	1,62	13,4	-14,3	7	38,3	1,41
0,5	1,54	18,4	-13,7	9	39,5	1,35
1,0	1,61	13,6	-10,6	7	36,6	1,46
1,0	1,61	13,0	-8,8	16	34,0	1,48
2,0	1,60	13,7	-3,3	9	32,2	1,54
2,0	1,62	12,5	-6,4	11	29,5	1,52
3,0	1,60	13,3	-1,5	8	30,5	1,57
3,0	1,60	13,3	-1,2	7	30,0	1,58
0,1	1,52	12,7	-22,9	10	46,3	1,23
0,5	1,51	13,5	-12,1	10	40,4	1,34
1,0	1,50	14,2	-8,5	13	34,2	1,38
3,0	1,49	15,0	-1,5	13	32,0	1,46

Tabla Anexo I- XXXI: Resultados de los ensayos de hinchamiento bajo carga con agua salina

Presión (MPa)	ρ_d inicial (g/cm³)	w inicial (%)	Deformación (%)	Duración (días)	w final (%)	ρ_d final (g/cm³)
0,1	1,71	13,0	-28,9	9	43,8	1,33
0,1	1,70	13,4	-33,1	14	43,7	1,28
0,5	1,72	12,7	-18,4	11	35,2	1,45
0,5	1,69	14,2	-23,0	14	39,3	1,38
1,0	1,70	14,1	-18,2	10	36,6	1,44
1,0	1,71	13,0	-16,3	17	31,9	1,47
3,0	1,68	15,0	-9,7	10	31,9	1,53
3,0	1,71	13,0	-9,5	17	28,5	1,56
0,1	1,60	13,6	-25,9	15	43,2	1,27
0,1	1,58	15,4	-25,8	11	36,8	1,25
0,5	1,61	12,9	-16,2	15	33,6	1,39
0,5	1,63	11,6	-15,7	8	40,4	1,41
1,0	1,60	13,4	-9,9	8	35,1	1,46
1,0	1,61	13,3	-10,6	9	37,1	1,45
2,0	1,59	14,5	-7,2	10	29,5	1,48
2,0	1,60	14,1	-5,7	7	34,0	1,51
3,0	1,59	14,6	-6,1	8	29,2	1,50
3,0	1,59	14,1	-5,1	8	29,3	1,52
0,1	1,50	13,3	-21,1	14	45,3	1,24
0,6	1,50	13,3	-11,9	13	39,4	1,34
1,0	1,51	13,1	-8,2	13	33,4	1,39
3,0	1,50	13,9	1,6	11	32,4	1,52

Tabla Anexo I- XXXII: Presión de hinchamiento de pastillas compactadas a diferentes densidades secas saturadas con agua destilada

ρ_d inicial (g/cm ³)	ρ_d final (g/cm ³)	w inicial (%)	P_s (MPa)	w final (%)	Duración (días)	S_r^* final (%)
1,29	1,26	15,0	0,5	48,6	3	116
1,29	1,28	14,9	0,3	49,9	3	121
1,34	1,34	13,2	0,8	40,3	3	107
1,35	1,35	12,5	0,5	40,8	3	110
1,36	1,35	14,0	1,0	39,7	3	106
1,37	1,36	12,6	1,4	38,4	3	105
1,41	1,40	14,5	2,0	34,8	4	102
1,45	1,43	13,0	1,5	36,9	6	111
1,47	1,45	11,7	1,6	35,9	2	113
1,48	1,45	11,6	2,9	33,2	6	104
1,50	1,49	14,1	3,4	33,5	3	112
1,52	1,50	12,5	3,6	32,7	3	111
1,54	1,51	12,0	3,3	33,6	3	115
1,54	1,53	13,1	4,3	32,0	3	113
1,57	1,53	13,9	5,2	29,6	3	104
1,58	1,54	16,3	5,0	29,4	5	105
1,58	1,55	14,8	4,2	32,4	4	118
1,58	1,52	13,4	6,0	30,1	2	104
1,59	1,56	15,6	6,2	27,5	4	101
1,59	1,54	12,3	5,2	29,2	4	104
1,59	1,55	13,0	4,1	32,5	4	119
1,59	1,56	13,8	3,6	29,9	3	111
1,59	1,54	14,0	5,6	29,7	4	107
1,60	1,54	12,9	4,9	30,5	7	110
1,60	1,56	14,1	5,6	28,5	4	105
1,60	1,57	12,5	5,2	28,4	3	107
1,60	1,56	14,2	3,4	31,9	3	118
1,61	1,57	13,5	6,8	28,3	5	107
1,62	1,59	12,9	3,2	29,9	5	116
1,62	1,59	13,0	5,4	31,0	7	119

ρ_d inicial (g/cm ³)	ρ_d final (g/cm ³)	w inicial (%)	P _s (MPa)	w final (%)	Duración (días)	S _r * final (%)
1,62	1,55	13,0	5,6	30,2	7	110
1,63	1,57	12,7	4,8	27,5	3	103
1,64	1,61	12,0	5,2	26,7	3	107
1,66	1,63	14,2	13,6	26,1	4	107
1,67	1,63	12,0	9,9	26,9	6	111
1,68	1,65	12,5	8,9	26,7	5	114
1,69	1,67	11,6	9,2	28,0	7	122
1,69	1,67	16,6	8,4		3	
1,71	1,70	11,7	7,8	28,4	3	131
1,71	1,69	14,4	8,3	28,4	2	127
1,72	1,70	14,3	10,9	28,6	2	131
1,72	1,71	12,7	11,2	27,8	2	129
1,72	1,70	11,6	9,8	27,5	3	126
1,72	1,70	12,1	10,0	28,2	2	130
1,74	1,71	12,7	8,6	29,0	2	136
1,74	1,72	12,8	12,5	27,2	1	128
1,74	1,73	12,8	7,6	28,2	2	135
1,75	1,71	13,7	13,9	25,9	5	121
1,77	1,70	12,2	16,2	24,1	5	111
1,80	1,77	13,0	9,7	26,5	7	136
1,84	1,76	11,7	16,7	25,5	7	129
1,88	1,73	11,7	16,1	25,2	7	122

*Grado de saturación calculado considerando la densidad del agua libre

Tabla Anexo I- XXXIII: Presión de hinchamiento de pastillas compactadas saturadas con agua granítica y valores teóricos para la misma densidad con agua destilada

ρ_d inicial (g/cm ³)	ρ_d final (g/cm ³)	w inicial (%)	w final (%)	Duración (días)	P _s (MPa)	P _s teórica (MPa)	Desviación (%)
1,43	1,41	14,5	36,6	6	1,5	1,6	-8
1,49	1,48	14,8	33,6	6	2,8	2,5	12
1,60	1,58	13,9	28,3	7	7,1	5,0	42
1,72	1,68	13,3	28,0	6	9,2	10,0	-8

Tabla Anexo I- XXXIV: Valores de presión de hinchamiento obtenidos en muestra tallada en sentido perpendicular al esfuerzo de compactación

ρ_d inicial (g/cm ³)	ρ_d final (g/cm ³)	w inicial (%)	w final (%)	Duración (días)	P_s (MPa)	P_s teórica (MPa)	Desviación (%)
1,52	1,44	13,4	36,0	3	1,9	1,8	4
1,64	1,60	14,1	31,0	3	6,1	5,5	11
1,65	1,60	13,7	30,8	3	5,8	5,6	5
1,64	1,63	14,7	30,0	4	6,1	6,7	-8
1,67	1,65	13,5	28,5	4	9,0	7,3	18
1,68	1,65	13,5	28,9	4	8,6	7,2	25
1,66	1,66	13,8	29,5	4	7,0	7,5	-6
1,69	1,67	15,8	28,6	2	8,5	8,3	2

Tabla Anexo I- XXXV: Valores de presión de hinchamiento obtenidos en muestra tallada en sentido paralelo al esfuerzo de compactación

ρ_d inicial (g/cm ³)	ρ_d final (g/cm ³)	w inicial (%)	w final (%)	Duración (días)	P_s (MPa)	P_s teórica (MPa)	Desviación (%)
1,50	1,48	16,0	36,0	13	2,0	2,5	-20
1,56	1,52	14,4	32,7	3	5,3	3,3	26
1,56	1,51	15,2	31,4	3	4,1	3,2	65
1,65	1,60	16,1	29,4	6	8,3	5,9	42
1,65	1,61	15,7	29,6	6	8,3	6,4	30
1,79	1,72	13,5	28,6	2	10,0	13,5	-26
1,82	1,74	12,3	27,2	2	11,4	14,6	-22

Tabla Anexo I- XXXVI: Resultados del edómetro con succión controlada con succión de sulfúrico a 20 °C EDS1_10 (trayectoria E5)

Altura inicial (cm): 1,2 w inicial (%): 13,7 w final (%): 35,0
 Sección (cm²): 11,40 ρ_d inicial (g/cm³): 1,68 ρ_d final (g/cm³): 1,49
 ρ_d f medida: 1,45 S_r inicial: 61 S_r final: 116

ESCALÓN	ρ _d i (g/cm ³)	Succión (MPa)	Presión (MPa)	ρ _d f (g/cm ³)	e final	Días
1	1,68	126,3	0,1	1,68	0,603	7
2	1,68	126,7	0,5	1,69	0,600	21
3	1,69	126,7	1,5	1,70	0,593	13
4	1,70	126,7	3,0	1,70	0,586	20
5	1,70	126,7	5,1	1,71	0,580	22
6	1,71	127,1	9,1	1,72	0,571	19
7	1,72	73,7	9,1	1,72	0,571	21
8	1,72	35,2	9,1	1,71	0,576	21
9	1,71	14,9	9,1	1,71	0,575	15
10	1,71	4,5	9,1	1,72	0,573	27
11	1,72	1,3	9,1	1,70	0,592	28
12	1,70	1,3	3,0	1,61	0,678	2
13	1,61	1,3	0,5	1,54	0,750	1
14	1,54	1,3	0,1	1,49	0,817	1

Tabla Anexo I- XXXVII: Resultados del edómetro con succión controlada con succión de sulfúrico a 20 °C EDS2_8 (trayectoria E4)

Altura inicial (cm): 1,2 w inicial (%): 12,6 w final (%): 23,8
 Sección (cm²): 11,40 ρ_d inicial (g/cm³): 1,73 ρ_d final (g/cm³): 1,70
 ρ_d f medida: 1,67 S_r inicial: 60 S_r final: 110

ESCALÓN	ρ _d i (g/cm ³)	Succión (MPa)	Presión (MPa)	ρ _d f (g/cm ³)	e final	Días
1	1,73	119,2	0,0	1,73	0,564	20
2	1,73	79,3	1,7	1,72	0,569	20
3	1,72	34,2	6,5	1,72	0,572	21
4	1,72	14,2	9,2	1,72	0,574	22
5	1,72	4,4	9,5	1,70	0,585	21

Tabla Anexo I- XXXVIII: Resultados del edómetro con succión controlada con succión de sulfúrico a 20 °C EDS2_9 (trayectoria E6)

Altura inicial (cm): 1,2

w inicial (%): 12,9

w final (%): 30,2

Sección (cm²): 11,40

ρ_d inicial (g/cm³): 1,71

ρ_d final (g/cm³): 1,53

ρ_d f medida: 1,53

S_r inicial: 60

S_r final: 107

ESCALÓN	ρ_d i (g/cm ³)	Succión (MPa)	Presión (MPa)	ρ_d f (g/cm ³)	e final	Días
1	1,71	119,2	0,1	1,71	0,581	21
2	1,71	73,2	0,1	1,66	0,626	21
3	1,66	31,9	0,1	1,57	0,718	28
4	1,57	13,8	0,1	1,52	0,775	21
5	1,52	3,7	0,1	1,47	0,837	27
6	1,47	3,9	0,5	1,48	0,822	22
7	1,48	3,9	1,5	1,50	0,797	20
8	1,50	3,9	3,0	1,53	0,764	14
9	1,53	3,9	4,9	1,56	0,727	28
10	1,56	4,1	8,4	1,60	0,682	49
11	1,60	1,3	8,4	1,60	0,687	21
12	1,60	1,3	3,0	1,57	0,724	1
13	1,57	1,3	0,5	1,54	0,753	1
14	1,54	1,3	0,1	1,53	0,761	1

Tabla Anexo I- XXXIX: Resultados del edómetro con succión controlada con succión de sulfúrico a 20 °C EDS3_9 (trayectoria E2)

Altura inicial (cm): 1,2 w inicial (%): 13,0 w final (%): 35,9
 Sección (cm²): 19,24 ρ_d inicial (g/cm³): 1,72 ρ_d final (g/cm³): 1,45
 ρ_d f medida: 1,41 S_r inicial: 62 S_r final: 112

ESCALÓN	ρ _d i (g/cm ³)	Succión (MPa)	Presión (MPa)	ρ _d f (g/cm ³)	e final	Días
1	1,72	138,1	0,1	1,73	0,564	30
2	1,73	195,5	0,1	1,73	0,558	18
3	1,73	271,5	0,1	1,74	0,553	21
4	1,74	550,6	0,1	1,75	0,543	21
5	1,75	505,5	0,4	1,75	0,539	15
6	1,75	505,5	1,5	1,76	0,533	21
7	1,76	505,5	3,0	1,77	0,528	21
8	1,77	460,4	5,1	1,77	0,523	27
9	1,77	306,3	5,1	1,77	0,525	21
10	1,77	202,9	5,1	1,76	0,532	15
11	1,76	138,9	5,1	1,75	0,540	22
12	1,75	81,0	5,1	1,74	0,555	19
13	1,74	37,8	5,1	1,70	0,585	22
14	1,70	15,5	5,1	1,67	0,616	21
15	1,67	4,5	5,1	1,65	0,638	22
16	1,65	1,3	5,1	1,61	0,674	20
17	1,61	1,3	1,5	1,56	0,729	1
18	1,56	1,3	0,5	1,51	0,789	1
19	1,51	1,3	0,1	1,45	0,867	1

Tabla Anexo I- XL: Resultados del edómetro con succión controlada con succión de sulfúrico a 20 °C EDS3_10 (trayectoria E1/2)

Altura inicial (cm): 1,2 w inicial (%): 13,4 w final (%): 26,3
 Sección (cm²): 11,40 ρ_d inicial (g/cm³): 1,71 ρ_d final (g/cm³): 1,57
 ρ_d f medida: **1,51** S_r inicial: 63 S_r final: 98

ESCALÓN	ρ _d i (g/cm ³)	Succión (MPa)	Presión (MPa)	ρ _d f (g/cm ³)	e final	Días
1	1,71	119,9	0,1	1,71	0,577	21
2	1,71	179,5	0,1	1,72	0,571	22
3	1,72	270,0	0,1	1,73	0,564	20
4	1,73	359,4	0,1	1,73	0,558	22
5	1,73	500,0	0,1	1,74	0,550	21
6	1,74	380,0	0,1	1,74	0,550	22
7	1,74	291,0	0,4	1,74	0,549	21
8	1,74	189,6	1,8	1,74	0,550	41
9	1,74	141,6	3,6	1,74	0,551	20
10	1,74	75,4	9,0	1,74	0,556	29
11	1,74	32,6	9,0	1,69	0,596	21
12	1,69	13,0	9,0	1,66	0,627	28
13	1,66	3,8	9,0	1,63	0,657	37
14	1,63	1,3	9,0	1,63	0,660	25
15	1,63	1,3	3,0	1,62	0,667	1
16	1,62	1,3	0,5	1,61	0,676	1
17	1,61	1,3	0,1	1,57	0,723	9

Tabla Anexo I- XLI: Resultados del edómetro con succión controlada con succión de sulfúrico a 20 °C EDS4_6 (trayectoria E1/1)

Altura inicial (cm): 1,2 w inicial (%): 14,2 w final (%): 34,5
 Sección (cm²): 19,24 ρ_d inicial (g/cm³): 1,70 ρ_d final (g/cm³): 1,50
 ρ_d f medida: 1,48 S_r inicial: 66 S_r final: 117

ESCALÓN	ρ _d i (g/cm ³)	Succión (MPa)	Presión (MPa)	ρ _d f (g/cm ³)	e final	Días
1	1,70	144,3	0,1	1,71	0,583	29
2	1,71	198,0	0,1	1,71	0,577	21
3	1,71	273,3	0,1	1,72	0,573	20
4	1,72	474,7	0,1	1,73	0,564	21
5	1,73	304,2	0,1	1,73	0,563	21
6	1,73	202,9	0,1	1,73	0,565	21
7	1,73	127,9	0,1	1,71	0,576	22
8	1,71	87,5	0,4	1,70	0,592	34
9	1,70	36,5	1,2	1,67	0,612	21
10	1,67	15,1	2,8	1,67	0,621	14
11	1,67	4,6	3,3	1,66	0,623	15
12	1,66	1,3	5,7	1,63	0,655	14
13	1,63	1,3	3,0	1,60	0,684	1
14	1,60	1,3	0,5	1,54	0,754	1
15	1,54	1,3	0,1	1,50	0,794	1

Tabla Anexo I- XLII: Resultados del edómetro con succión controlada con succión de sulfúrico a 20 °C EDS4_8 (trayectoria E3)

Altura inicial (cm): 1,20 w inicial (%): 12,8 w final (%): 32,2
 Sección (cm²): 19,24 ρ_d inicial (g/cm³): 1,71 ρ_d final (g/cm³): 1,32
 ρ_d f medida: 1,32 S_r inicial: 59 S_r final: 84

ESCALÓN	ρ _d i (g/cm ³)	Succión (MPa)	Presión (MPa)	ρ _d f (g/cm ³)	e final	Días
1	1,71	118	0,1	1,70	0,587	26
2	1,70	171	0,1	1,71	0,580	22
3	1,71	263	0,1	1,72	0,573	21
4	1,72	371	0,1	1,73	0,565	27
5	1,73	523	0,1	1,73	0,557	28
6	1,73	401	0,1	1,74	0,556	22
7	1,74	291	0,1	1,73	0,556	21
8	1,73	191	0,1	1,72	0,571	27
9	1,72	140	0,1	1,71	0,581	23
10	1,71	77	0,1	1,66	0,626	57
11	1,66	36	0,1	1,57	0,724	54
12	1,57	15	0,1	1,48	0,826	63
13	1,48	4	0,1	1,40	0,923	92
14	1,40	1,4	0,1	1,32	1,040	176

Tabla Anexo I- XLIII: Resultados del edómetro con succión controlada con succión de sulfúrico a 20 °C EDS5_5 (trayectoria E3)

Altura inicial (cm): 1,2 w inicial (%): 13,2 w final (%): 45,3
 Sección (cm²): 19,24 ρ_d inicial (g/cm³): 1,72 ρ_d final (g/cm³): 1,26
 ρ_d f medida: 1,26 S_r inicial: 62 S_r final: 107

ESCALÓN	ρ _d i (g/cm ³)	Succión MPa	Presión (MPa)	ρ _d f (g/cm ³)	e final	Días
1	1,72	138,1	0,1	1,72	0,567	30
2	1,72	201,7	0,1	1,73	0,558	18
3	1,73	278,7	0,1	1,74	0,553	21
4	1,74	519,5	0,1	1,75	0,546	21
5	1,75	290,1	0,1	1,75	0,547	15
6	1,75	216,0	0,1	1,74	0,549	20
7	1,74	140,7	0,1	1,74	0,554	21
8	1,74	79,8	0,1	1,71	0,578	22
9	1,71	33,2	0,1	1,62	0,671	35
10	1,62	4,3	0,1	1,45	0,856	42
11	1,45	1,3	0,1	1,31	1,059	21
12	1,31	1,3	0,4	1,33	1,027	1
13	1,33	1,3	1,5	1,41	0,908	1
14	1,41	1,3	3,0	1,49	0,815	18
15	1,49	1,3	5,0	1,54	0,751	22
16	1,54	1,3	1,5	1,50	0,798	10
17	1,50	1,3	0,05	1,32	1,041	2
18	1,32	1,3	0,01	1,26	1,148	1

Tabla Anexo I- XLIV: Resultados del edómetro con succión controlada por presión de nitrógeno a 20 °C EDN1_5 (trayectoria E2)

Altura inicial (cm): 1,2 w inicial (%): 13,6 w final (%): 36,4
 Sección (cm²): 19,24 ρ_d inicial (g/cm³): 1,72 ρ_d final (g/cm³): 1,38
 ρ_d f medida (g/cm³): 1,39 S_r inicial: 64 S_r final: 103

ESCALÓN	ρ _d i (g/cm ³)	Succión (MPa)	Presión (MPa)	ρ _d f (g/cm ³)	e final	Días
1	1,72	14,0	0,1	1,50	0,794	27
2	1,50	14,0	0,2	1,51	0,782	22
3	1,51	14,0	0,4	1,52	0,778	20
4	1,52	14,0	1,5	1,53	0,764	20
5	1,53	14,0	3,0	1,57	0,720	21
6	1,57	14,0	5,0	1,60	0,686	21
7	1,60	8,0	5,0	1,59	0,695	21
8	1,59	5,0	5,0	1,58	0,704	21
9	1,58	1,5	5,0	1,56	0,728	21
10	1,56	0,5	5,0	1,55	0,740	21
11	1,55	0,1	5,0	1,55	0,746	21
12	1,55	0,0	5,0	1,54	0,750	22
13	1,54	0,0	1,5	1,45	0,863	15
14	1,45	0,0	0,5	1,42	0,898	1
15	1,42	0,0	0,1	1,38	0,950	1

Tabla Anexo I- XLV: Resultados del edómetro con succión controlada por presión de nitrógeno a 20 °C EDN2_10 (trayectoria E4/1)

Altura inicial (cm): 1,2 w inicial (%): 13,9 w final (%): 27,6
 Sección (cm²): 19,24 ρ_d inicial (g/cm³): 1,71 ρ_d final (g/cm³): 1,63
 ρ_d f medida (g/cm³): 1,56 S_r inicial: 65 S_r final: 113

ESCALÓN	ρ _d i (g/cm ³)	Succión (MPa)	Presión (MPa)	ρ _d f (g/cm ³)	e final	Días
1	1,71	14,0	5,4	1,68	0,608	32
2	1,68	8,0	5,3	1,67	0,612	17
3	1,67	5,0	5,4	1,67	0,618	18
4	1,67	1,5	5,4	1,65	0,637	21
5	1,65	0,5	5,0	1,63	0,654	22
6	1,63	0,1	5,0	1,63	0,658	20

Tabla Anexo I- XLVI: Resultados del edómetro con succión controlada por presión de nitrógeno a 20 °C EDN3_9 (trayectoria E4/2)

Altura inicial (cm): 1,2 w inicial (%): 13,0 w final (%): 34,9
 Sección (cm²): 11,40 ρ_d inicial (g/cm³): 1,72 ρ_d final (g/cm³): 1,43
 ρ_d f medida (g/cm³): 1,42 S_r inicial: 62 S_r final: 107

ESCALÓN	ρ _d i (g/cm ³)	Succión (MPa)	Presión (MPa)	ρ _d f (g/cm ³)	e final	Días
1	1,72	14,0	7,4	1,69	0,593	27
2	1,69	8,0	8,9	1,69	0,596	21
3	1,69	5,0	9,1	1,69	0,598	21
4	1,69	1,5	9,3	1,68	0,603	21
5	1,68	0,5	9,4	1,68	0,608	22
6	1,68	0,1	9,4	1,68	0,609	20
7	1,68	0,0	9,5	1,68	0,609	21
8	1,68	0,0	2,5	1,55	0,736	22
9	1,55	0,0	0,8	1,48	0,822	20
10	1,48	0,0	0,2	1,43	0,882	21

Tabla Anexo I- XLVII: Resultados del edómetro con succión controlada por presión de nitrógeno a 20 °C EDN3_10 (trayectoria E2)

Altura inicial (cm): 1,2 w inicial (%): 14,2 w final (%): 31,5
 Sección: 11,4 ρ_d inicial (g/cm³): 1,69 ρ_d final (g/cm³): 1,45
 ρ_d f medida (g/cm³): 1,50 S_r inicial: 64 S_r final: 98

ESCALÓN	$\rho_{d i}$ (g/cm ³)	Succión (MPa)	Presión (MPa)	$\rho_{d f}$ (g/cm ³)	e final	Días
1	1,69	14	0,1	1,55	0,737	22
2	1,55	14	0,2	1,55	0,737	13
3	1,55	14	0,5	1,55	0,737	7
4	1,55	14	1,5	1,56	0,734	14
5	1,56	14	3,0	1,57	0,721	15
6	1,57	14	5,0	1,59	0,699	20
7	1,59	14	9,0	1,63	0,660	32
8	1,63	8	9,0	1,62	0,664	21
9	1,62	5	9,0	1,62	0,671	21
10	1,62	1,5	9,0	1,60	0,684	21
11	1,60	0,5	9,0	1,60	0,689	21
12	1,60	0,1	9,0	1,60	0,690	22
13	1,60	0	9,0	1,60	0,693	21
14	1,60	0	3,0	1,51	0,790	6
15	1,51	0	0,5	1,46	0,848	1
16	1,46	0	0,1	1,45	0,867	0,3

Tabla Anexo I- XLVIII: Resultados del edómetro con succión controlada por presión de nitrógeno a 20 °C EDN4_6 (trayectoria E4/1)

Altura inicial (cm): 1,2 w inicial (%): 13,3 w final (%): 27,7
 Sección (cm²): 19,24 ρ_d inicial (g/cm³): 1,71 ρ_d final (g/cm³): 1,66
 ρ_d f medida (g/cm³): 1,54 S_r inicial: 62 S_r final: 118

ESCALÓN	ρ _d i (g/cm ³)	Succión (MPa)	Presión (MPa)	ρ _d f (g/cm ³)	e final	Días
1	1,71	14,0	5,0	1,69	0,601	20
2	1,69	8,0	5,3	1,68	0,604	28
3	1,68	5,0	5,7	1,68	0,609	21
4	1,68	2,0	6,0	1,67	0,617	21
5	1,67	0,5	5,8	1,66	0,626	15
6	1,66	0,0	5,8	1,66	0,631	24

Tabla Anexo I- XLIX: Resultados del edómetro con succión controlada por presión de nitrógeno a 20 °C EDN4_7 (trayectoria E3)

Altura inicial (cm): 1,2 w inicial (%): 15,0 w final (%): 38,8
 Sección: 19,24 ρ_d inicial (g/cm³): 1,69 ρ_d final (g/cm³): 1,38
 ρ_d f medida (g/cm³): 1,34 S_r inicial: 68 S_r final: 110

ESCALÓN	ρ_d i (g/cm ³)	Succión (MPa)	Presión (MPa)	ρ_d f (g/cm ³)	e final	Días
1	1,690	14,0	0,1	1,51	0,789	20
2	1,51	14,0	0,2	1,51	0,788	20
3	1,51	14,0	0,5	1,54	0,759	21
4	1,54	8,0	0,5	1,52	0,780	22
5	1,52	5,0	0,5	1,49	0,808	21
6	1,49	1,5	0,5	1,43	0,882	20
7	1,43	0,5	0,5	1,40	0,923	21
8	1,40	0,1	0,5	1,40	0,934	21
9	1,40	0,1	1,5	1,41	0,909	15
10	1,41	0,1	3,0	1,45	0,868	20
11	1,45	0,1	5,0	1,48	0,820	21
12	1,48	0,0	5,0	1,48	0,820	21
13	1,48	0,0	1,5	1,45	0,856	3
14	1,45	0,0	0,5	1,43	0,891	1
15	1,43	0,0	0,1	1,38	0,950	3

Tabla Anexo I- L: Resultados del edómetro con succión controlada por presión de nitrógeno a 20 °C EDN5_6 (trayectoria E2)

Altura inicial (cm): 1,2 w inicial (%): 12,1 w final (%): 35,3
 Sección (cm²): 11,40 ρ_d inicial (g/cm³): 1,72 ρ_d final (g/cm³): 1,42
 ρ_d f medida (g/cm³): 1,42 S_r inicial: 57 S_r final: 106

ESCALÓN	ρ _d i (g/cm ³)	Succión (MPa)	Presión (MPa)	ρ _d f (g/cm ³)	e final	Días
1	1,719	14,0	0,1	1,55	0,743	20
2	1,55	14,0	0,2	1,55	0,744	16
3	1,55	14,0	0,5	1,55	0,746	19
4	1,55	14,0	8,9	1,66	0,623	22
5	1,66	8,0	9,3	1,66	0,624	13
6	1,66	5,0	9,6	1,65	0,634	14
7	1,65	1,5	9,8	1,64	0,648	14
8	1,64	0,5	9,9	1,64	0,651	16
9	1,64	0,1	9,9	1,63	0,653	19
10	1,63	0,0	9,9	1,63	0,653	23
11	1,63	0,0	5,9	1,61	0,676	1
12	1,61	0,0	3,0	1,58	0,712	1
13	1,58	0,0	0,5	1,49	0,808	3
14	1,49	0,0	0,1	1,42	0,900	3

Tabla Anexo I- LI: Resultados del edómetro con succión controlada por presión de nitrógeno a 40 °C EDNC_10 (trayectoria E2/40)

Altura inicial (cm): 1,2 w inicial (%): 13,9 w final (%): 35,6
 Sección (cm²): 19,63 ρ_d inicial (g/cm³): 1,70 ρ_d final (g/cm³): 1,41
 ρ_d f medida (g/cm³): 1,38 S_r inicial: 64 S_r final: 104

ESCALÓN	ρ _d i (g/cm ³)	Succión (MPa)	Presión (MPa)	ρ _d f (g/cm ³)	e final	Días
1	1,70	14,0	0,1	1,56	0,735	28
2	1,56	14,0	0,2	1,56	0,734	21
3	1,56	14,0	0,5	1,56	0,729	20
4	1,56	14,0	2,0	1,58	0,708	21
5	1,58	14,0	3,0	1,60	0,692	28
6	1,60	14,0	5,0	1,62	0,663	23
7	1,62	8,0	5,0	1,62	0,663	19
8	1,62	5,0	5,0	1,62	0,664	22
9	1,62	1,5	5,0	1,62	0,671	20
10	1,62	0,5	5,0	1,61	0,680	22
11	1,61	0,1	5,0	1,60	0,683	20
12	1,60	0,0	5,0	1,60	0,685	24
13	1,60	0,0	1,5	1,54	0,754	1
14	1,54	0,0	0,5	1,45	0,865	3
15	1,45	0,0	0,1	1,41	0,920	1

Tabla Anexo I- LII: Resultados del edómetro con succión controlada por presión de nitrógeno a 60 °C EDNC_11 (trayectoria E2/60)

Altura inicial (cm): 1,20 w inicial (%): 14,7 w final (%): 37,2
 Sección (cm²): 19,63 ρ_d inicial (g/cm³): 1,69 ρ_d final (g/cm³): 1,39
 ρ_d f medida (g/cm³): 1,43 S_r inicial: 66 S_r final: 106

ESCALÓN	ρ _d i (g/cm ³)	Succión (MPa)	Presión (MPa)	ρ _d f (g/cm ³)	e final	Días
1	1,69	14	0,1	1,57	0,723	29
2	1,57	14	0,2	1,57	0,721	27
3	1,57	14	0,5	1,57	0,714	21
4	1,57	14	1,5	1,59	0,696	21
5	1,59	14	3,0	1,61	0,682	21
6	1,61	14	4,9	1,63	0,660	28
7	1,63	8	5,0	1,64	0,647	29
8	1,63	5	5,0	1,63	0,654	22
9	1,63	1,5	5,0	1,62	0,671	34
10	1,61	0,5	5,0	1,61	0,674	21
11	1,61	0,1	5,0	1,61	0,675	22
12	1,61	0	5,0	1,61	0,680	32
13	1,60	0	1,5	1,53	0,763	1
14	1,53	0	0,5	1,46	0,848	1
15	1,46	0	0,1	1,39	0,941	2

Tabla Anexo I- LIII: Resultados del edómetro con succión controlada por presión de nitrógeno a 80 °C EDNC_12 (trayectoria E2/80)

Altura inicial (cm): 1,20 w inicial (%): 15,3 w final (%): 25,6
 Sección (cm²): 19,63 ρ_d inicial (g/cm³): 1,69 ρ_d final (g/cm³): 1,59
 ρ_d f medida (g/cm³): 1,63 S_r inicial: 69 S_r final: 106

ESCALÓN	ρ _d i (g/cm ³)	Succión (MPa)	Presión (MPa)	ρ _d f (g/cm ³)	e final	Días
1	1,69	14,0	0,1	1,55	0,747	29
2	1,55	14,0	0,2	1,55	0,745	26
3	1,55	14,0	0,5	1,57	0,715	56
4	1,57	14,0	1,5	1,59	0,702	63
5	1,59	14,0	3,0	1,60	0,690	52
6	1,60	14,0	5,0	1,62	0,667	81
7	1,62	8,0	5,0	1,61	0,673	15
8	1,61	5,0	5,0	1,61	0,680	21
9	1,61	1,5	5,0	1,59	0,699	48
10	1,59	0,5	5,0	1,59	0,700	22

Tabla Anexo I- LIV: Resumen de las experiencias de sellado realizadas en la celda de teflón (excepto en CTF16, los cortes de las 4 pastillas se alinearon)

Ex #	Presión kg/cm ²	Duración días	w inicial %	ρ_d g/cm ³	Agua tomada g	agua tomada rápidamente *%	w final %	Sellado
CTF17	<0,05	1	14,0	1,70	5	56 (45 s)	15,4	No
CTF18	<0,05	5	14,0	1,70	12	58 (30')	17,4	
CTF19	<0,05	13	14,2	1,67	8	37 (90 s)	16,7	1ª pastilla
CTF16	2	1	14,2	1,71	27	81 (45 s)	22,1	Sólo cortes
CTF15	2	1	14,2	1,71	28	89 (90 s)	22,4	Sí
CTF21	2	1	13,4	1,72	29	86 (45 s)	22,0	
CTF13	2	2	15,2	1,77				Sí
CTF14	2	3	13,8	1,62	40	75 (150 s)	26,3	Sí
CTF20	2	4	13,4	1,72	30	87 (<90 s)	22,8	Sí
CTF22	3	1	12,6	1,74	29	90	22,6	Sí
CTF27	3	7	13,3	1,70	37	76 (30 s)	25,4	Sí
CTF23	4	1	12,6	1,71	34	85 (30 s)	23,5	Sí
CTF26	4	7	13,9	1,72	35	77 (30 s)	24,7	Sí
CTF24	5	1	12,6	1,70	37	86 (30 s)	24,0	Sí
CTF25	5	7	12,6	1,73	38	74 (30 s)	25,3	Sí

(*):agua tomada en los primeros segundos, que están indicados entre paréntesis

Tabla Anexo I- LV: Resumen de los ensayos de sellado en celda de permeabilidad

Referencia	ρ_d g/cm³	w inicial %	w final %	P inicial bar	t₁ (*) s	t₂ (**) min	rotura fisura (***)
FIS6	1,64	13,3	30,6	0,3	27	20	Inm
FIS7	1,64	13,4	30,9	0,4	23	15	Inm
FIS8	1,64	13,4	29,1	0,5	18	25	No
FIS9	1,65	13,2	29,1	0,6	16	15	No
FIS10				0,6	15	30	1'
FIS11				0,7	37	25	No
FIS12	1,64	13,4	29,5	0,7	30	20	No
FIS13	1,64	13,8	29,1	0,7	12	20	No
FIS14	1,63	14,4	30,6	0,8	11	60	No

(*): tiempo de aparición de agua al otro lado de la fisura

(**): tiempo transcurrido hasta el cierre de la fisura

(***): al aplicar presión de 52 kg/cm²

Tabla Anexo I- LVI: Ensayos de hinchamiento bajo carga con fisuras

Referencia	ρ_d inicial (g/cm³)	Presión (MPa)	Deformación final (%)
Sin junta 1	1,70	0,13	34,1
Junta 1	1,63	0,13	29,1
Sin junta 2	1,70	1,5	15,5
Junta 2	1,64	1,5	11,0
Sin junta 3	1,69	1,5	15,0
Junta 3	1,63	1,5	11,0

ANEXO II: RESULTADOS CIMNE

Tabla Anexo II- I: Relación succión/humedad en trayectorias de secado hasta alrededor de 380 MPa y posterior humedecimiento realizadas sobre doce muestras

ESTADO INICIAL				SECADO				ESTADO FINAL			
s (MPa)	w (%)	ρ_d (g/cm ³)	S _r (%)	s (MPa)	w (%)	ρ_d (g/cm ³)	S _r (%)	s (MPa)	w (%)	ρ_d (g/cm ³)	S _r (%)
160	12,6	1,62	49	382	6,9	1,69	30	382	5,7	1,69	24
160	12,4	1,66	51	382	6,8	1,72	31	319	6,2	1,73	28
160	12,2	1,63	48	382	6,7	1,69	29	213	9,4	1,66	39
160	12,2	1,64	49	382	6,7	1,70	29	151	11,1	1,64	45
160	12,3	1,64	49	382	6,7	1,70	29	113	12,8	1,61	49
160	12,4	1,65	50	382	6,6	1,73	30	85	14,3	1,61	55
160	12,1	1,65	49	382	6,7	1,71	30	73	14,9	1,58	54
160	12,5	1,62	48	382	6,9	1,66	28	59	16,4	1,52	55
160	12,4	1,64	49	382	6,7	1,70	29	38	18,3	1,48	58
160	12,4	1,67	52	382	6,8	1,73	31	14	22,4	1,39	62
160	12,4	1,68	52	382	6,9	1,74	32	10	23,1	1,37	63
160	12,3	1,65	50	382	6,8	1,74	31	4	26,1	1,25	59
160	12,1	1,65	49	382	6,5	1,70	28				

Tabla Anexo II- II: Relación succión/humedad en trayectorias de humedecimiento hasta alrededor de 4 MPa y posterior secado (13 muestras)

ESTADO INICIAL				HUMEDECIMIENTO				ESTADO FINAL			
s (MPa)	w (%)	ρ_d (g/cm ³)	S _r (%)	s (MPa)	w (%)	ρ_d (g/cm ³)	S _r (%)	s (MPa)	w (%)	ρ_d (g/cm ³)	S _r (%)
160	13,3	1,56	49	4	25,2	1,29	61	382	6,1	1,56	22
160	13,0	1,62	52	4	24,9	1,32	64	319	6,6	1,68	29
160	12,9	1,62	51	4	24,5	1,32	63	213	10,5	1,57	39
160	12,6	1,62	50	4	24,1	1,33	63	151	12,1	1,56	44
160	12,6	1,62	50	4	24,4	1,32	63	113	14,1	1,53	50
160	13,0	1,62	52	4	24,5	1,33	64	85	16,0	1,50	54
160	13,0	1,62	52	4	24,6	1,33	64	73	16,8	1,49	56
160	12,4	1,62	50	4	24,1	1,33	62	59	17,4	1,47	55
160	13,6	1,60	53	4	25,4	1,31	64	38	19,8	1,42	58
160	13,0	1,61	51	4	24,6	1,32	63	14	22,1	1,36	60
160	12,9	1,62	51	4	24,7	1,32	63	10	23,1	1,38	65
160	12,8	1,67	55	4	24,5	1,36	66	7	24,4	1,36	66
160	12,8	1,66	55	4	25,1	1,34	66	4	28,6	1,26	67
160	12,8	1,66	55	4	24,6	1,35	66				

Tabla Anexo II- III: Resultados de las trayectorias de humedecimiento/secado y secado/humedecimiento realizadas sobre doce muestras. Los resultados correspondientes a las cuatro succiones aplicadas sobre cada muestra se sitúan en el interior de un mismo recuadro de la Tabla

ESTADO INICIAL				SECADO			
s (MPa)	w (%)	ρ_a (g/cm ³)	S _r (%)	s (MPa)	w (%)	ρ_a (g/cm ³)	S _r (%)
160	12,2	1,64	50	160	12,3	1,64	51
319	5,8	1,70	26	38	18,1	1,47	58
151	10,5	1,63	43	59	16,7	1,50	56
151	10,6	1,63	43	74	15,7	1,51	53
160	12,0	1,64	50	160	12,2	1,64	51
151	10,6	1,58	40	14	21,1	1,39	60
319	6,8	1,65	28	38	18,9	1,44	58
386	6,3	1,64	26	59	17,1	1,48	55
160	12,4	1,64	51	160	12,4	1,64	51
113	12,8	1,62	52	14	22,0	1,37	61
151	11,5	1,65	48	14	21,7	1,38	60
319	5,7	1,69	26	38	19,1	1,54	68
160	12,2	1,65	51	160	12,5	1,64	51
85	14,1	1,58	53	7	23,9	1,36	65
113	12,9	1,61	51	10	23,8	1,33	62
151	11,4	1,63	46	14	22,9	1,35	61
160	12,3	1,64	51	160	12,2	1,64	50
74	14,9	1,58	56	10	23,2	1,35	62
85	14,4	1,58	54	14	22,6	1,36	62
113	13,2	1,60	51	14	21,8	1,38	61
160	12,5	1,64	51	160	12,4	1,64	52
59	16,2	1,52	56	3	26,3	1,28	64
74	15,5	1,54	55	7	25,6	1,30	63
85	14,8	1,55	53	10	24,2	1,31	61

**Tabla Anexo II- IV: Valores de la relación succión/humedad a volumen constante.
Trayectoria de humedecimiento/secado**

$\rho_d = 1,59 \text{ g/cm}^3$			$\rho_d = 1,67 \text{ g/cm}^3$		
Succión (MPa)	S_r^* (%) desde humedad higroscópica	S_r^* (%) desde 392 MPa	Succión (MPa)	S_r^* (%) desde humedad higroscópica	S_r^* (%) desde 392 MPa
1	108	105	1	106	108
2	103	102	3	105	108
4	102		4	95	
10	91	93	10	93	99
14	87		14	78	
38	74		38	66	80
73	64		73		
110		54	110		58
297		29	297		29

*Grado de saturación calculado considerando la densidad del agua libre

Tabla Anexo II- V: Relación entre succión y humedad para diferentes temperaturas y densidades

Densidad seca inicial = 1,68 g/cm ³			Densidad seca inicial = 1,63 g/cm ³			Densidad seca inicial = 1,55 g/cm ³			Densidad seca inicial = 1,55 g/cm ³		
T (°C)	s (MPa)	w (%)	T (°C)	s (MPa)	w (%)	T (°C)	s (MPa)	w (%)	T (°C)	s (MPa)	w (%)
22	748	0,7	22	748	0,4	22	701	1,5	40	509	0,0
22	33	3,5	22	331	3,6	22	234	6,5	40	252	6,2
22	267	6,3	22	267	6,8	22	140	10,9	40	158	10,7
22	111	11,6	22	111	11,4	22	89	14,1	40	90	13,9
22	42	15,6	22	42	15,7	22	42	18,2	40	42	17,9
22	15	21,3	22	15	21,1	22	17	23,5	40	17	23,1
72	704	0,6	72	704	0,5	57	581	0,2	72	630	0,7
72	346	3,0	72	346	3,1	57	246	5,9	72	240	5,6
72	244	5,9	72	244	6,2	57	153	12,6	72	153	9,9
72	135	11,1	72	135	10,9	57	87	13,8	72	88	13,4
72	66	15,2	72	66	15,3	57	39	17,7	72	22	17,1
72	22	20,7	72	22	20,2	57	15	22,8	72	17	21,7
27	715	0,3	27	799	0,6	27	641	0,2			
27	352	3,2	27	376	3,3	27	251	6,0			
27	251	6,0	27	310	6,3	27	155	10,5			
27	138	11,3	27	151	11,1	27	89	14,1			
27	65	15,8	27	81	16,0	27	36	18,4			
27	20	21,6	27	54	21,5	27	15	23,3			

Tabla Anexo II- VI: Resumen de resultados obtenidos en los ensayos de columna resonante

ρ_d g/cm ³	w %	S _r %	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	14,7	54	0,757	140	207	245	300	370
1,67	13,6	57	0,668	211	223	270		
1,54	3,3	12	0,802	78	106	174	208	326
1,56	2,8	10	0,777	89	106	138		
1,62	24,6	95	0,717	240	270		331	336
1,66	21,2	87	0,677	252	296	370	429	502
1,65	4,7	19	0,685	74	90	137	190	310
1,72	10,4	47	0,615	200	219	293	381	429
1,68	3,7	16	0,652	61	89	141	200	290
1,62	12,7	49	0,713	122	180	240	299	387

Tabla Anexo II- VII: Resultados de los ensayos de infiltración con muestras de granito y de bentonita compactada tras 27 horas de flujo

Altura mm	Diámetro inicial mm	Diámetro final mm	Altura mm	Humedad %
10,30	50,65	51,97	7,325	27,2
28,65	50,63	50,60	24,15	14,2
38,00	50,63	50,55	38,65	13,2
44,45	50,67	50,56	50,90	12,8
52,65	50,63	50,56	65,50	13,0
61,55	50,65	50,58		

Tabla Anexo II- VIII: Resultados de los ensayos de infiltración con muestras de granito y de bentonita compactada tras 48 horas de flujo

Altura mm	Diámetro inicial mm	Diámetro final mm	Altura mm	Humedad %
10,55	50,28	51,83	6,63	32,5
19,15	50,28	51,24	20,90	17,8
27,05	50,29	50,58	36,63	14,1
35,20	50,32	50,40	53,05	13,6
43,30	50,30	50,30	67,98	13,9
51,50	50,31	50,31		
62,40	50,27	50,29		

Tabla Anexo II- IX: Resultados de los ensayos de infiltración con muestras de granito y de bentonita compactada tras 192 horas de flujo

Altura mm	Diámetro inicial mm	Diámetro final mm	Altura mm	Humedad %
8,65	50,54	52,82	6,70	37,3
16,75	50,52	52,53	20,55	25,7
25,70	50,54	51,75	34,60	17,6
36,05	50,53	51,46	45,25	15,3
44,90	50,52	51,34	59,40	13,9
54,25	50,53	50,76		
64,25	50,55	50,64		

Tabla Anexo II- X: Características de la probetas en los ensayos de flujo de calor

Probeta	ρ_d (g/cm³)	w inicial (%)	S_r inicial (%)	Duración del ensayo (h)	w final (%)
1	1,59	15,76	61	166	13,9
2	1,63	15,3	82	530	15,2
3	1,65	16,3	90	101	16,9
4	1,63	19,5	62	173	16,6
5	1,62	22,5	97	178	19,5
6	1,64	23,4	97	158	20,5
7	1,63	23,6	69	169	21,6

Tabla Anexo II- XI: Características de las probetas utilizadas en los ensayos de medida de la dilatación lineal

Referencia ensayo	ρ_d (g/cm³)	w final (%)	S_r (%)
260898 a	1,57	17,3	64
031198 a	1,58	16,4	63
090996 a	1,69	14,4	62
120996 e	1,72	12,5	56
160998 a	1,60	21,0	82
030698 b	1,61	20,9	83
261198 a	1,62	20,1	81
110297 a	1,60	25,1	97
090698 a	1,60	25,1	98
041296 a	1,66	21,2	95
051098 a	1,67	21,6	91
191098 b	1,68	20,8	92

Tabla Anexo II- XII: Resultados de los ensayos sobre probetas con un grado de saturación en torno al 60 %

260898 a		090996 a		031198 a		120996 e	
T (°C)	ε total						
29,2	0	23,8	0	22,6	0	31,2	0
39,1	0,00116	32,0	0,00152	39,6	0,00294	36,3	0,00075
49,8	0,00397	40,8	0,00433	49,1	0,00612	46,3	0,00336
59,3	0,00822	51,0	0,00708	58,1	0,00750	51,1	0,00458
64,2	0,00983	61,3	0,01147	63,6	0,00849	41,0	0,00392
58,3	0,00670	65,2	0,01372	58,1	0,00652		
49,7	0,00472	60,8	0,01123	49,3	0,00591		
39,3	0,00376	50,4	0,00565	39,6	0,00530		
29,6	0,00294	40,7	0,00397	30,3	0,00504		
49,6	0,00527						
66,0	0,01215						
49,6	0,00681						
30,2	0,00526						

Tabla Anexo II- XIII: Resultados de los ensayos sobre probetas con un grado de saturación en torno al 80 %

030698 b		261198 a		16998 a	
T (°C)	ε total	T (°C)	ε total	T (°C)	ε total
23,0	0	21,3	0	24,3	0
31,3	0,00127	34,4	0,00277	31,6	0,00132
41,5	0,00390	44,3	0,00591	40,5	0,00447
51,4	0,00658	53,8	0,00757	49,6	0,00784
61,5	0,01282	63,9	0,01393	59,0	0,01299
66,4	0,01422	53,7	0,01007	65,1	0,01515
60,8	0,00971	44,4	0,00934	57,7	0,01217
50,7	0,00395	33,7	0,00867	48,7	0,00535
40,6	0,00281			39,1	0,00428
33,6	0,00231			30,2	0,00370
26,0	0,00180			50,4	0,00809
				65,8	0,01383
				48,8	0,00613
				30,2	0,00457
				49,7	0,00755
				65,2	0,01276
				48,7	0,00790
				30,2	0,00626
				50,2	0,00916
				64,9	0,01264
				48,8	0,00926
				30,2	0,00762

Tabla Anexo II- XIV: Resultados de los ensayos sobre probetas con un grado de saturación en torno al 95 % (probeta 110297 a)

T (°C)	ϵ total	T (°C)	ϵ total
27,5	0	43,4	0
33,5	0,00063	33,5	-0,00112
37,9	0,00106	38,4	-0,00054
28,5	0,00033	43,4	0,00019
38,5	0,00089	27,0	-0,00155
43,3	0,00146	33,5	-0,00088
28,5	0,00016	41,3	0,00027
43,3	0,00162	33,5	-0,00065
47,5	0,00215	27,5	-0,00112
28,5	0,00048	38,5	0
38,7	0,00169	42,4	0,00057
33,8	0	32,0	-0,00036
38,4	0,00128	41,4	0,00073
44,4	0,00197	33,5	-0,00004
33,5	0,00076	27,2	-0,00042
38,4	0,00130	33,5	0,00014
29,7	0,00062	38,4	0,00069
38,7	0,00169	43,4	0,00131
43,3	0,00235	27,5	0,00005
28,6	0,00098	43,3	0,00188
38,5	0,00217	33,6	0,00086
28,5	0,00130	38,5	0,00148
43,4	0	43,3	0,00204
		29,4	0,00111
		38,4	0,00421

Tabla Anexo II- XV: Resultados de los ensayos sobre probetas con un grado de saturación en torno al 95 % (continuación)

041296 a		090698 a		051098 a		191098 b	
T (°C)	ϵ total						
28,6	0	23,8	0	24,5	0	24,5	0
38,4	0,00112	32,0	0,00152	40,3	0,00231	40,3	0,00233
28,5	0,00035	40,8	0,00433	49,9	0,00348	49,8	0,00452
38,5	0,00137	51,0	0,00708	58,9	0,00487	58,5	0,00666
33,5	0,00113	61,3	0,01147	64,8	0,00592	64,9	0,00789
28,5	0	65,2	0,01372	57,7	0,00538	57,7	0,00613
38,4	0,00123	60,8	0,01123	48,5	0,00401	48,6	0,00540
46,5	0,00227	50,4	0,00565	38,9	0,00326	38,9	0,00456
28,5	0,00042	40,7	0,00397	30,0	0,00289	29,3	0,00403
				49,9	0,00516	50,0	0,00732
				64,7	0,00674	64,6	0,00971
				48,4	0,00527	49,5	0,00790
				30,3	0,00360	29,3	0,00526
				49,9	0,00573		
				65,1	0,00782		
				52,7	0,00663		
				30,0	0,00525		

Tabla Anexo II- XVI: Resultado de los ensayos edométricos sobre muestras saturadas con agua destilada

ρ_d g/cm ³	e_i	σ_i MPa	σ_f MPa	c_v 10 ⁻³ cm ² /s	E_m MPa	k_w m/s	C_α 10 ⁻³	δ_0 μm	ϵ_r μm
1,15	1,417	0,01	0,1	4,39	4,42	9,9·10 ⁻¹⁰	3,26	597	6,6
1,12	1,473	0,01	0,1	4,47	4,90	9,1·10 ⁻¹⁰	3,37	446	12,0
1,37	1,036	0,20	1,0	0,0415	18,27	2,3·10 ⁻¹²	6,00	273	15,4
1,39	0,999	0,50	1,0	0,032	42,46	7,5·10 ⁻¹³	1,99	43	5,5

Tabla Anexo II- XVII: Propiedades de las muestras ensayadas en las distintas trayectorias de los ensayos edométricos con succión controlada

Trayectoria	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
w inicial (%)	11,7	14,3	14,2	13,2	14,2	14,2	12,4	14,6	12,7	14,6	12,0
w final (%)		17,9	34,8	41,2	40,9	18,5	39,3	40,4	42,6	39,3	40,8
ρ_a inicial (g/cm³)	1,63	1,62	1,62	1,63	1,63	1,62	1,65	1,62	1,64	1,62	1,66

Tabla Anexo II- XVIII: Resultados de los ensayos edométricos (Trayectoria 0)

	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
Succión MPa	Tensión vertical MPa	Indice de poros	Tensión vertical MPa	Indice de poros	Tensión vertical MPa	Indice de poros
130	0,02	0,7038	0,20	0,7049	1,20	0,7070
97	0,02	0,7169	0,20	0,7163	1,20	0,7100
360	0,02	0,6699	0,20	0,6796	1,20	0,6939
135	0,02	0,7155	0,20	0,7129	1,20	0,7052
22	0,02	0,8686	0,20	0,8227	1,20	0,7709
0	0,02	1,1715	0,20	0,9878	1,20	0,8450

Tabla Anexo II- XIX: Resultados de los ensayos edométricos (Trayectorias 1 y 2)

Trayectoria 1			Trayectoria 2		
Succión MPa	Tensión vertical MPa	Indice de poros	Succión MPa	Tensión vertical MPa	Indice de poros
128	0,15	0,660	125	0,15	0,674
84	0,15	0,687	146	0,15	0,659
40	0,15	0,750	219	0,15	0,649
10,3	0,15	0,829	424	0,15	0,630
3,7	0,15	0,868	424	0,23	0,630
3,7	0,22	0,868	424	0,53	0,628
3,7	0,53	0,840	424	1,08	0,621
3,7	1,08	0,816	424	2,16	0,613
3,7	2,12	0,754	424	4,27	0,600
3,7	4,12	0,656	424	8,53	0,580
3,7	8,15	0,562	219	8,53	0,582
3,7	4,12	0,567	146	8,53	0,595
3,7	2,12	0,576	80	8,53	0,594
3,7	1,11	0,581	48	8,53	0,566
3,7	0,56	0,589	10,3	8,53	0,551
3,7	0,35	0,591	3,7	8,53	0,561
			1	8,53	0,565
			0	8,53	0,569

Tabla Anexo II- XX: Resultados de los ensayos edométricos (Trayectorias 3 y 4)

Trayectoria 3			Trayectoria 4		
Succión MPa	Tensión vertical MPa	Indice de poros	Succión MPa	Tensión vertical MPa	Indice de poros
146	0,15	0,657	128	0,15	0,694
69	2,65	0,665	79	0,15	0,724
42	3,46	0,671	39	0,15	0,789
14	5,12	0,663	10,3	0,91	0,803
3,7	5,00	0,662	3,7	0,91	0,811
1	5,00	0,660	1	0,91	0,807
0	6,13	0,670	0	3,04	0,809
0	0,15	1,012	0	0,15	1,109

Tabla Anexo II- XXI: Resultados de los ensayos edométricos (Trayectorias 5 y 6)

Trayectoria 5			Trayectoria 6		
Succión MPa	Tensión vertical MPa	Indice de poros	Succión MPa	Tensión vertical MPa	Indice de poros
127	0,15	0,663	122	0,15	0,643
261	0,15	0,642	122	1,21	0,637
466	0,15	0,628	122	3,24	0,631
384	0,15	0,630	122	6,30	0,623
150	0,15	0,658	122	8,30	0,616
71	0,15	0,695	79	8,30	0,616
38	0,15	0,758	38	8,30	0,614
10,3	0,15	0,831	10,3	8,30	0,609
3,7	0,15	0,872	3,7	8,30	0,606
3,7	0,22	0,870	0	8,30	0,591
3,7	0,54	0,858	0	4,25	0,640
3,7	1,04	0,821	0	2,20	0,703
3,7	2,04	0,745	0	1,18	0,743
3,7	4,04	0,681	0	0,15	0,933
3,7	8,03	0,561			
3,7	4,04	0,564			
3,7	2,04	0,570			
3,7	1,04	0,575			
3,7	0,51	0,575			

Tabla Anexo II- XXII: Resultados de los ensayos edométricos (Trayectorias 7 y 8)

Trayectoria 7			Trayectoria 8		
Succión MPa	Tensión vertical MPa	Indice de poros	Succión MPa	Tensión vertical MPa	Indice de poros
128	0,11	0,674	128	0,15	0,661
424	0,11	0,638	201	0,15	0,647
224	1,29	0,637	424	0,15	0,624
122	3,43	0,640	201	0,15	0,640
79	6,11	0,641	128	0,15	0,660
38	8,40	0,638	69	0,15	0,698
10,3	7,74	0,637	38	0,15	0,733
1	7,16	0,636	14	0,69	0,757
0	8,08	0,632	3,7	0,69	0,771
0	4,16	0,673	1	0,69	0,720
0	1,20	0,805	0	3,56	0,762
0	0,11	1,007	0	0,15	0,939

Tabla Anexo II- XXIII: Resultados de los ensayos edométricos (Trayectorias 9 y 10)

Trayectoria 9			Trayectoria 10		
Succión MPa	Tensión vertical MPa	Indice de poros	Succión MPa	Tensión vertical MPa	Indice de poros
128	0,16	0,683	122	0,11	0,642
70	0,16	0,724	391	0,11	0,603
42	1,42	0,728	136	0,11	0,641
10,3	2,26	0,729	70	0,11	0,684
3,7	2,26	0,728	42	2,24	0,703
1	2,26	0,725	10,3	2,99	0,691
0	4,50	0,729	3,7	4,38	0,669
0	2,26	0,746	1	4,38	0,667
0	1,12	0,796	0	4,38	0,748
0	0,43	0,871	0	2,19	0,771
0	0,16	0,940	0	0,75	0,876
			0	0,11	1,060

Tabla Anexo II- XXIV: Resultados de los ensayos de compresión simple en muestras con juntas y sin juntas

S_r (%)	σ_{rotura} (MPa)	σ_{rotura} (MPa)	E a $\sigma = 0,5 \sigma_{rotura}$ (MPa)
15	0,82	0,49	78
45	2,19	2,18	377
45	2,68	2,23	436
85	4,43	4,76	601