



**Informe CIEMAT/DIAE/54520/8/03**

## **ENRESA 2003**

# **INTEGRACIÓN DE RESULTADOS PARA GTI 4: EVOLUCIÓN THM CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL DE SELLADO**

**PREPARADO POR:** M.V. Villar (CIEMAT)  
A. Lloret (UPC)

**Abril 2003**



# INTEGRACIÓN DE RESULTADOS PARA GTI 4: EVOLUCIÓN THM

## CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL DE SELLADO

### Indice

<b>1.</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>2.</b>	<b>CARACTERIZACIÓN BÁSICA</b> .....	<b>3</b>
2.1.	PESO ESPECÍFICO .....	3
2.2.	LÍMITES DE ATTERBERG, SUPERFICIE ESPECÍFICA Y GRANULOMETRÍA .....	3
2.3.	DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE POROS .....	4
2.4.	DENSIDAD DEL AGUA .....	5
<b>3.</b>	<b>CARACTERIZACIÓN TÉRMICA</b> .....	<b>6</b>
3.1.	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA .....	6
3.2.	CALOR ESPECÍFICO .....	8
3.3.	ENSAYOS DE FLUJO DE CALOR .....	8
3.4.	ENSAYOS DE CALENTAMIENTO A HUMEDAD CONSTANTE: DEFORMACIONES POR EFECTOS TÉRMICOS .....	10
<b>4.</b>	<b>CARACTERIZACIÓN HIDRÁULICA</b> .....	<b>12</b>
4.1.	RELACIÓN SUCCIÓN/HUMEDAD .....	12
4.1.1.	Relación succión/humedad sin confinamiento .....	12
4.1.2.	Relación succión/grado de saturación con confinamiento .....	15
4.1.3.	Efecto de la histéresis .....	19
4.1.4.	Efecto de la temperatura .....	20
4.2.	PERMEABILIDAD SATURADA AL AGUA .....	22
4.3.	PERMEABILIDAD AL GAS .....	24
4.4.	ENSAYOS DE INFILTRACIÓN .....	26
<b>5.</b>	<b>CARACTERIZACIÓN MECÁNICA</b> .....	<b>28</b>
5.1.	MÓDULO ELÁSTICO .....	28
5.2.	DEFORMACIONES POR SATURACIÓN BAJO CARGA .....	28
5.2.1.	Efecto de la densidad .....	29
5.2.2.	Efecto de la salinidad del agua .....	30
5.2.3.	Efecto de la humedad inicial .....	31
5.2.4.	Efecto de la temperatura .....	32
5.3.	PRESIÓN DE HINCHAMIENTO .....	33
5.3.1.	Influencia de la densidad seca .....	33
5.3.2.	Influencia de la temperatura .....	34
5.4.	ENSAYOS EDOMÉTRICOS CON SUCCIÓN CONTROLADA A TEMPERATURA AMBIENTE .....	35
5.4.1.	Ensayos sin control de la deformación máxima .....	35
5.4.2.	Ensayos con control de la deformación máxima .....	38
5.5.	ENSAYOS EDOMÉTRICOS CON SUCCIÓN CONTROLADA A ALTAS TEMPERATURAS .....	39
5.6.	ENSAYOS EN JUNTAS .....	40
<b>6.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>42</b>

## **Índice de figuras**

Figura 1: Curva granulométrica media, con indicación de las desviaciones estándar, para las muestras analizadas	4
Figura 2: Relación entre la conductividad térmica de la bentonita compactada y el contenido volumétrico de aire	7
Figura 3: Relación entre la conductividad térmica de la bentonita compactada con distintas densidades secas y el grado de saturación .....	7
Figura 4: Valores del cociente entre aumento de deformación lineal y temperatura medidos en ensayos con diversos valores de densidad seca y grados de saturación .....	10
Figura 5: Relación succión/humedad en ensayos sin confinamiento.....	13
Figura 6: Relación entre la densidad seca y la succión en ensayos de disminución de succión sin confinamiento	14
Figura 7: Cambio de índice de poros en los ensayos de disminución de succión sin confinamiento .....	14
Figura 8: Relación succión/grado de saturación en ensayos sin confinamiento .....	15
Figura 9: Relación entre succión y humedad en trayectorias de humectación con confinamiento .....	16
Figura 10: Curvas de retención en trayectorias de humectación con confinamiento (entre paréntesis se indica la densidad seca medida en la muestra ensayada).....	17
Figura 11: 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 .....	18
Figura 12: 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.....	20
Figura 13: Curvas de retención en trayectorias de secado/humectación determinadas a diferentes temperaturas para muestras no confinadas de densidad seca inicial $1,65 \text{ g/cm}^3$ .....	21
Figura 14: Curvas de retención a volumen constante y diferente temperatura .....	22
Figura 15: 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 .....	23
Figura 16: Variación de la permeabilidad intrínseca de la bentonita con diferentes porosidades .....	24
Figura 17: Relación entre la permeabilidad al gas y el volumen de poros accesible al gas.....	25
Figura 18: 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 .....	26
Figura 19: 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 IV .....	27
Figura 20: Evolución del módulo de corte con el grado de saturación para distintas presiones de confinamiento	28
Figura 21: Deformación medida y correlaciones obtenidas en los ensayos de hinchamiento bajo carga realizados en UPC y CIEMAT.....	29
Figura 22: Deformación final en muestras de densidad seca $1,50 \text{ g/cm}^3$ saturadas bajo diferentes cargas verticales y con diferentes aguas.....	30
Figura 23: Capacidad de hinchamiento bajo sobrecarga de 0,1 MPa en función de la densidad seca y la humedad inicial .....	32
Figura 24: Deformaciones finales en los ensayos de saturación bajo carga realizados con bentonita compactada a densidad seca inicial $1,60 \text{ g/cm}^3$ a diferentes temperaturas .....	33
Figura 25: Valores de la presión de hinchamiento obtenidos en muestras compactadas con diversas densidades secas y saturadas con agua destilada.....	34
Figura 26: Variación de la presión de hinchamiento con la temperatura.....	35
Figura 27: Valor de la presión de preconsolidación obtenida en trayectorias de carga tras humedecimiento a diferentes succiones .....	36
Figura 28: Valores de la compresibilidad de la bentonita cargada o descargada a diferentes valores de la succión	37
Figura 29: Valores de la deformabilidad en descarga para diferentes ensayos bajo condiciones de saturación....	38
Figura 30: Deformaciones por cambios de succión y de carga a diversas temperaturas en ensayos edométricos con control de succión por presión de gas .....	40
Figura 31: Relación entre la carga y el desplazamiento entre los labios de una junta entre bloques, para diversos grados de saturación.....	41

## **Índice de tablas**

Tabla I: Composición química del agua utilizada en los ensayos .....	2
Tabla II: Distribución granulométrica media de 11 muestras analizadas .....	3
Tabla III: Distribución orientativa de la porosidad total para la bentonita FEBEX con su humedad higroscópica.	5
Tabla IV : Parámetros obtenidos por retroanálisis en diversos ensayos de flujo de calor .....	9
Tabla V: Parámetros de ajuste a las curvas de retención en trayectorias de humectación.....	18
Tabla VI: Parámetros de ajuste a las curvas de retención en trayectorias de humectación y secado tras saturación	19

# 1. INTRODUCCIÓN

En el concepto de referencia español para almacenamiento de residuos radiactivos de alta actividad (RAA) en roca cristalina o arcillosa, 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). 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 este documento se presentan los resultados de los ensayos de laboratorio realizados por CIEMAT y UPC en el contexto de los proyectos FEBEX I y FEBEX II sobre una de las arcillas españolas de referencia como material de sellado, la bentonita FEBEX, que proviene de la región de Cabo de Gata (Almería) y se ha utilizado tanto en el ensayo *in situ* como en el de maqueta del Proyecto FEBEX (ENRESA 1998, 2000). 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.
- LLORET, A.; VILLAR, M.V. & PINTADO, X.(2002): Ensayos THM: Informe de síntesis. Informe CIEMAT/DIAE/54520/1/02. Informe FEBEX 70-UPC-M-0-04. 98 pp.
- VILLAR, M.V.; MARTÍN, P.L.; LLORET, A. & ROMERO, E.(2002): 2<sup>nd</sup> Report on Thermo-hydro-mechanical laboratory tests. Deliverable D-17/2. September 00-March 02. May 2002. 70-IMA-L-0-97. CIEMAT/DIAE/54520/6/02. 53 pp.

Estos resultados, que pretenden caracterizar el comportamiento termo-hidro-mecánico de la arcilla FEBEX, son 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.

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 <sup>-</sup>	0,37	100
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0,15	15
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	2,36	
Mg <sup>2+</sup>	0,39	15
Ca <sup>2+</sup>	1,12	10
Na <sup>+</sup>	0,48	80
K <sup>+</sup>	0,026	
pH	8,3	7

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. CARACTERIZACIÓN BÁSICA

El límite líquido de la bentonita es  $w_L = 102$ , el límite plástico es  $w_P = 53$  ( $I_P = 49$ ), la densidad de las partículas es  $\gamma_s = 2,7 \text{ g/cm}^3$  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  $\text{g/cm}^3$ .

### 2.1. PESO ESPECÍFICO

El peso específico relativo de las partículas sólidas se ha determinado mediante picnómetros, utilizando agua destilada como medio de suspensión. El valor medio de la densidad obtenida es de  $2,70 \pm 0,04 \text{ g/cm}^3$ .

### 2.2. LÍMITES DE ATTERBERG, SUPERFICIE ESPECÍFICA Y GRANULOMETRÍA

Límite líquido: 102±4 %

Límite plástico: 53±3 %

Índice de plasticidad: 49±4

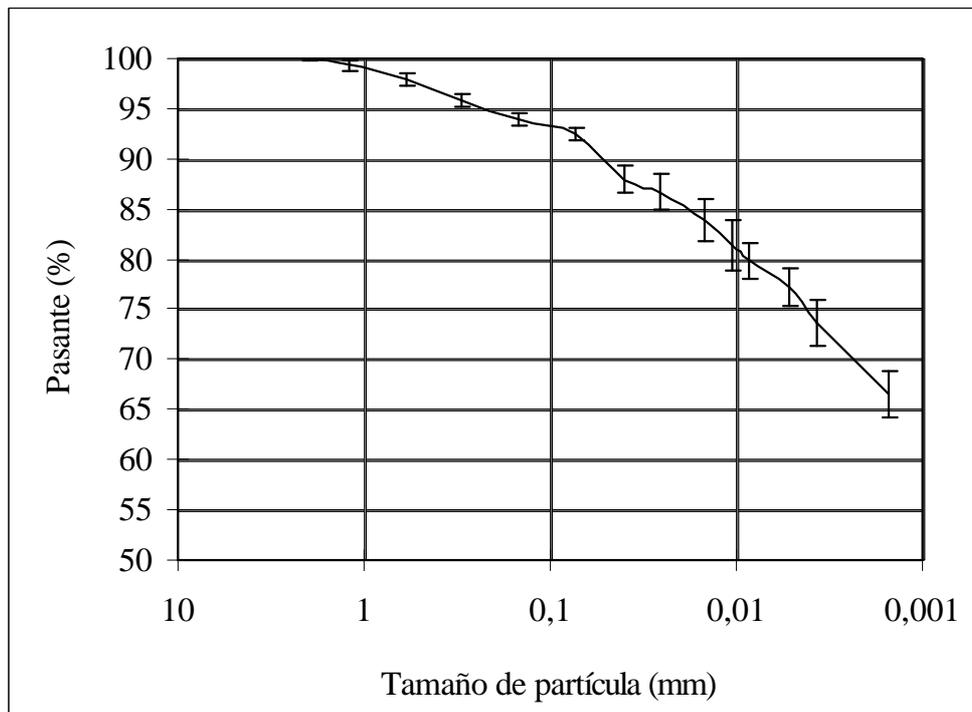
Para la superficie específica externa, determinada mediante el método BET del punto único, se ha obtenido un valor medio de  $32 \pm 3 \text{ m}^2/\text{g}$ .

Los resultados de la granulometría se muestran en la Tabla II y se representan gráficamente en la Figura 1.

**Tabla II: Distribución granulométrica media de 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

Tamaño (mm)	Pasante (media, %)	Pasante (desviación estándar, %)
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**

### 2.3. 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/cm<sup>3</sup> se ha realizado mediante porosimetría de intrusión de mercurio. 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 obtienen los valores medios, sólo orientativos, que se muestran en la Tabla III. 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.

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

<b>Intervalo de tamaño (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Volumen (porcentaje)</b>
> 6	7
6 - 0,2	8
0,2 - 0,006	18
< 0,006	67

#### **2.4. DENSIDAD DEL AGUA**

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. Por ello es posible obtener grados de saturación mayores de 100 % cuando éstos se calculan considerando la densidad del agua como la del agua libre ( $1,00 \text{ g/cm}^3$ ).

Para muestras de bentonita saturadas con densidad seca de entre  $1,2$  y  $1,8 \text{ g/cm}^3$ , el valor medio de la densidad del agua de poro puede estar entre  $1,05$  y  $1,25 \text{ g/cm}^3$ .

### **3. CARACTERIZACIÓN TÉRMICA**

#### **3.1. CONDUCTIVIDAD TÉRMICA**

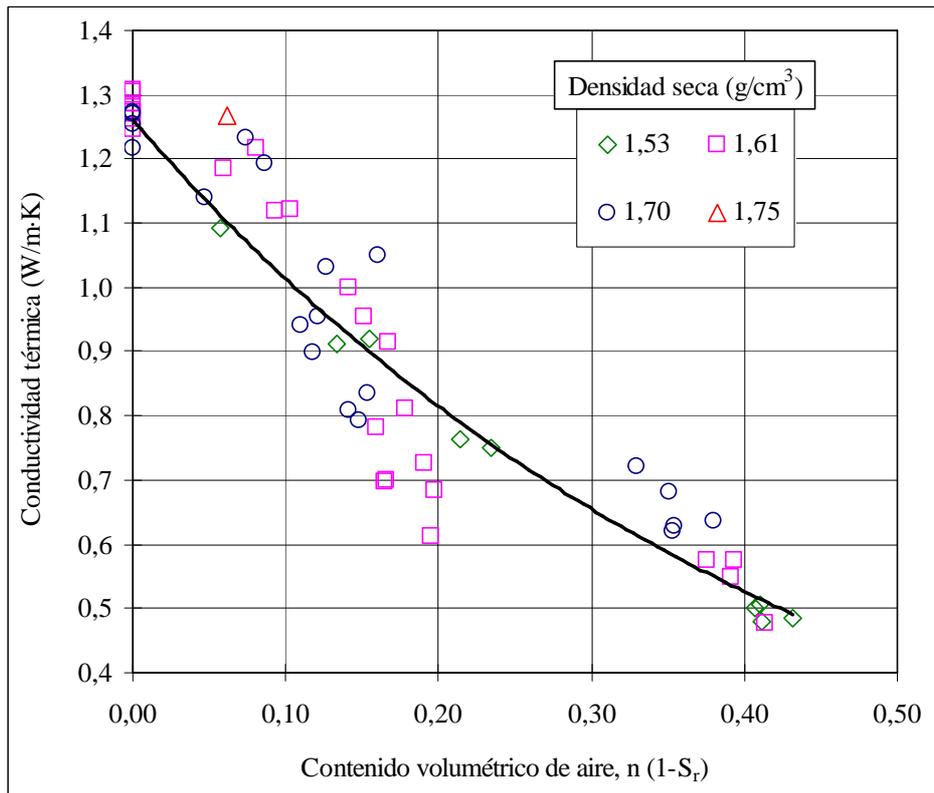
Se han realizado medidas directas de la conductividad térmica de la bentonita compactada con diferentes densidades secas y humedades. Se ha constatado un aumento de la conductividad con la densidad seca y con la humedad de las muestras. En la Figura 2 se muestra cómo la conductividad térmica disminuye al aumentar el contenido volumétrico de aire en las muestras. Puede establecerse una sencilla correlación entre la conductividad térmica ( $\lambda$ , W/mK) y el contenido volumétrico de aire (en el rango de porosidades,  $n$ , entre 0,35 y 0,45):

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

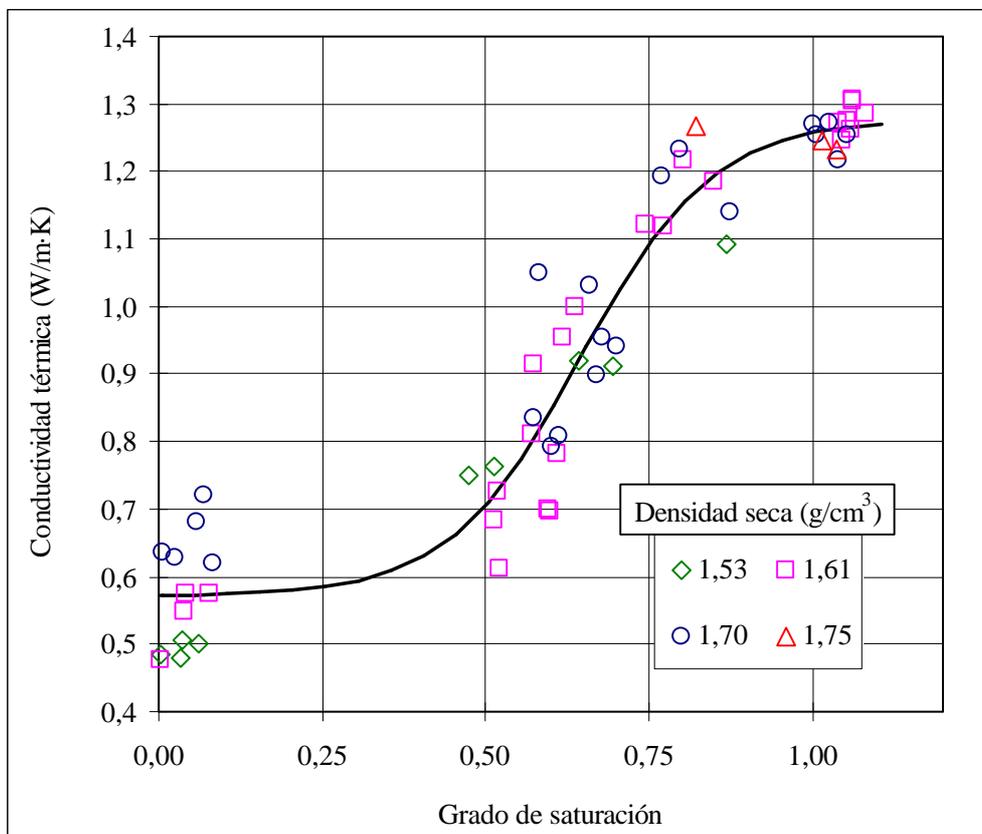
Se puede obtener también la siguiente regresión entre el grado de saturación,  $S_r$ , y la conductividad térmica (Figura 3):

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

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 2: Relación entre la conductividad térmica de la bentonita compactada y el contenido volumétrico de aire**



**Figura 3: Relación entre la conductividad térmica de la bentonita compactada con distintas densidades secas y el grado de saturación**

### 3.2. CALOR ESPECÍFICO

El calor específico ha sido determinado 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):

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

### 3.3. ENSAYOS DE FLUJO DE CALOR

Mediante retroanálisis de la evolución de la temperatura y la humedad en varios puntos de una muestra sometida a flujo de calor ha sido posible obtener algunos valores de la conductividad térmica y del calor específico de la bentonita. Para modelar el cambio de conductividad térmica con el grado de saturación se ha utilizado la siguiente relación:

$$\lambda = (\lambda_w)^{S_r} (\lambda_d)^{(1-S_r)} \quad [4]$$

donde  $\lambda_w$  y  $\lambda_d$  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. Los parámetros que no son objeto de identificación tienen el siguiente valor en los retroanálisis:

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

$$k_r=S_r^3$$

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

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

En la Tabla IV se muestran los resultados obtenidos en los retroanálisis efectuados sobre ensayos realizados con muestras con distintas densidades secas y humedades iniciales.

**Tabla IV : 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	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	w inicial	$S_r$ mínimo	$S_r$ máximo	$c_s$ (J/kg°C)	$\lambda_{\text{medio}}?$ (W/m°C)	$\lambda_w$ (W/m°C)	$\tau$	$\lambda_w$ (W/m°C)	$\tau$	a
1	1,59	15,9	32	84	1570	0,81	1,03	1,75	1,19	0,82	9,72
2	1,63	15,3	47	75	863	0,87	1,20	0,57	1,19	0,56	3,06
3	1,65	16,3	60	86	780	0,98	1,34	0,52	1,31	0,74	1,00
4	1,63	19,5	60	81	1012	0,91	1,19	0,74	1,18	0,90	1,67
5	1,62	22,5	64	89	1146	0,98	1,37	0,44	1,36	0,49	2,37
6	1,64	23,4	81	97	1738	0,93	-	-	0,91	2,10	0,86
7	1,63	23,6	81	99	1126	0,77	0,81	0,96	0,79	0,85	0,46

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.

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. Así, por ejemplo, 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. De forma análoga, para un valor fijo del parámetro "a", 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 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.

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:

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

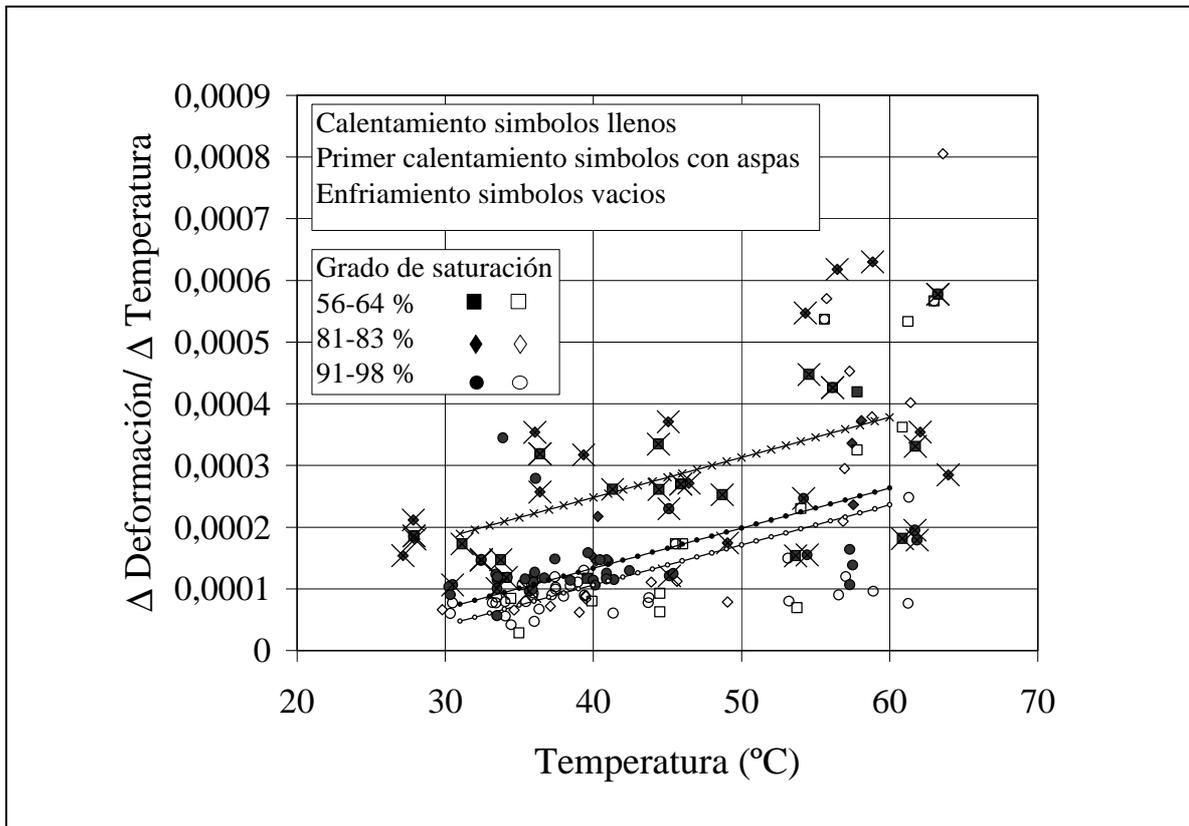
$$k_r = S_r^3$$

$$\tau = 0,8$$

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

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

Se han medido las deformaciones por cambio de temperatura y se ha comprobado que el coeficiente de dilatación aumenta con la temperatura. La pendiente de la relación entre la deformación lineal y el aumento de temperatura se muestra en la Figura 4 para las distintas medidas realizadas.



**Figura 4: Valores del cociente entre aumento de deformación lineal y temperatura medidos en ensayos con diversos valores de densidad seca y grados de saturación**

En ciclos de calentamiento y enfriamiento se ha constatado la existencia de importantes deformaciones irreversibles. En las ecuaciones [5] a [7] se presentan expresiones para el valor del coeficiente de dilatación para diferentes tipos de trayectoria. Los valores de la pendiente de la relación entre los aumentos de deformación lineal ( $\Delta\varepsilon_z$ ) y de temperatura ( $\Delta T$ , °C) pueden aproximarse como:

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

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

$$\Delta\varepsilon_z/\Delta T = -1,54 \cdot 10^{-4} + 6,5 \cdot 10^{-6} T \quad (\text{en enfriamiento}) \quad [7]$$

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):

$$\mathbf{a}_{vol.} = \frac{\Delta \mathbf{e}_{vol.}^{elas.}}{\Delta T} = 6,75 \cdot 10^{-5} + 1,95 \cdot 10^{-5} (T - 25) \quad [8]$$

donde  $\mathbf{e}_{vol.}^{elas.}$  indica el valor de las deformaciones volumétricas elásticas y  $\mathbf{a}_{vol.}$  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:

$$\frac{\Delta \mathbf{e}_{vol.}^{elas.}}{\Delta T} = 4,57 \cdot 10^{-4} \quad [9]$$

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.

Se ha comprobado también que las deformaciones asociadas a cambios de humedad (o de succión) prevalecen sobre las deformaciones irreversibles ocasionadas por ciclos de calentamiento/enfriamiento. Se han obtenido los siguientes valores para el parámetro  $\kappa_s$  (que relaciona los cambios de volumen elásticos con los cambios de succión) y para la diferencia ( $\alpha_{cal} - \alpha_{enfr}$ ) ( $\mathbf{a}_{cal}$ : coeficiente de dilatación lineal en el primer calentamiento,  $\mathbf{a}_{enfr}$ : coeficiente de dilatación lineal en el enfriamiento subsecuente):

$$\kappa_s = 0,063$$

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

## **4. CARACTERIZACIÓN HIDRÁULICA**

### **4.1. RELACIÓN SUCCIÓN/HUMEDAD**

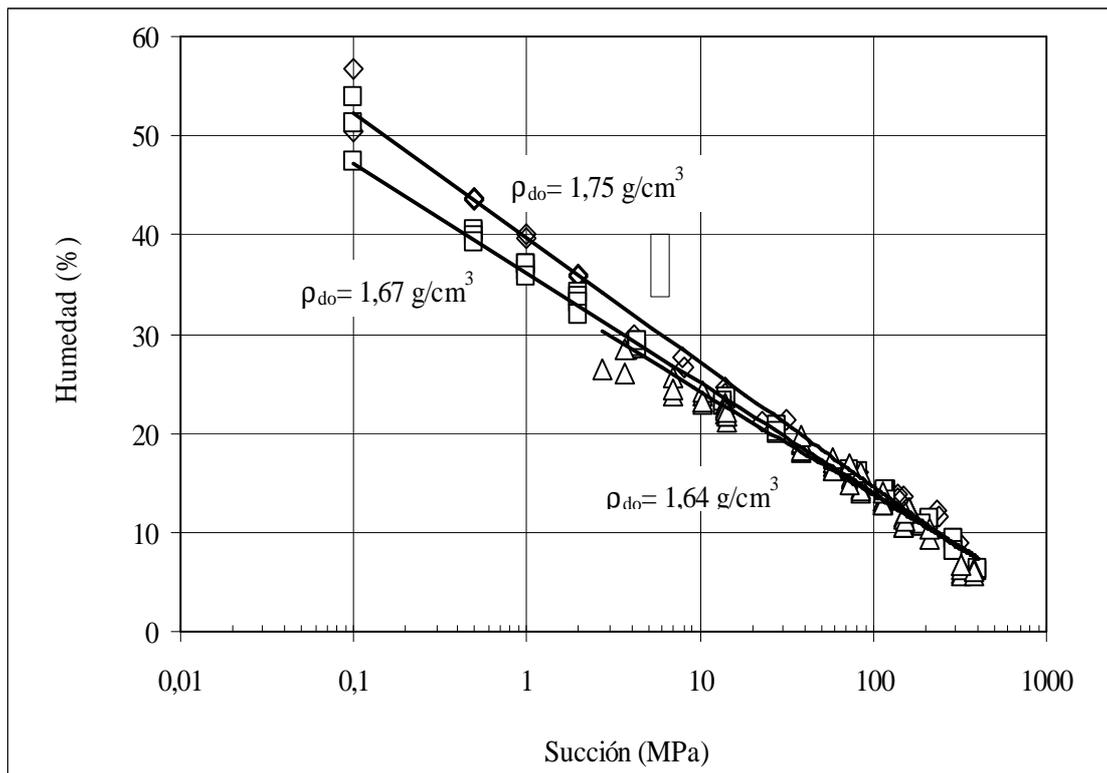
Se han obtenido las relaciones succión humedad en condiciones no confinadas y manteniendo el volumen constante. En condiciones no confinadas los cambios de volumen al cambiar la humedad de la bentonita pueden llegar a ser muy importantes.

#### **4.1.1. 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.

En la Figura 5 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 ( $\rho_{d0}$ , g/cm<sup>3</sup>):

$$w = (45,1 \rho_{d0} - 39,2) - (18,8 \rho_{d0} - 20,3) \log s \quad [10]$$



**Figura 5: Relación succión/humedad en ensayos sin confinamiento**

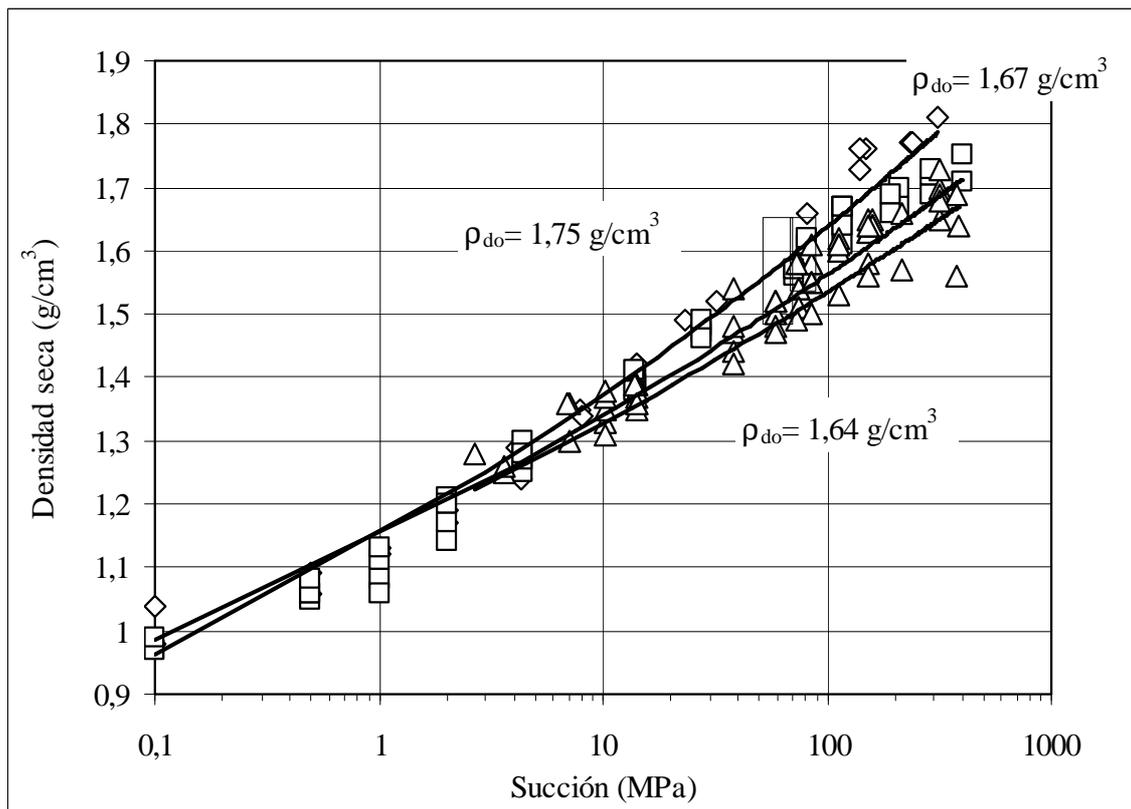
Los cambios de volumen observados al imponer las diversas succiones han sido importantes. En la Figura 6 se muestra la relación entre la densidad seca y el cambio de succión para las distintas muestras ensayadas. Se han agrupado los ensayos según la densidad inicial de las muestras con independencia 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:

$$r_d = 1,15 s^{0,13} r_{d0}^{-0,15} \quad [11]$$

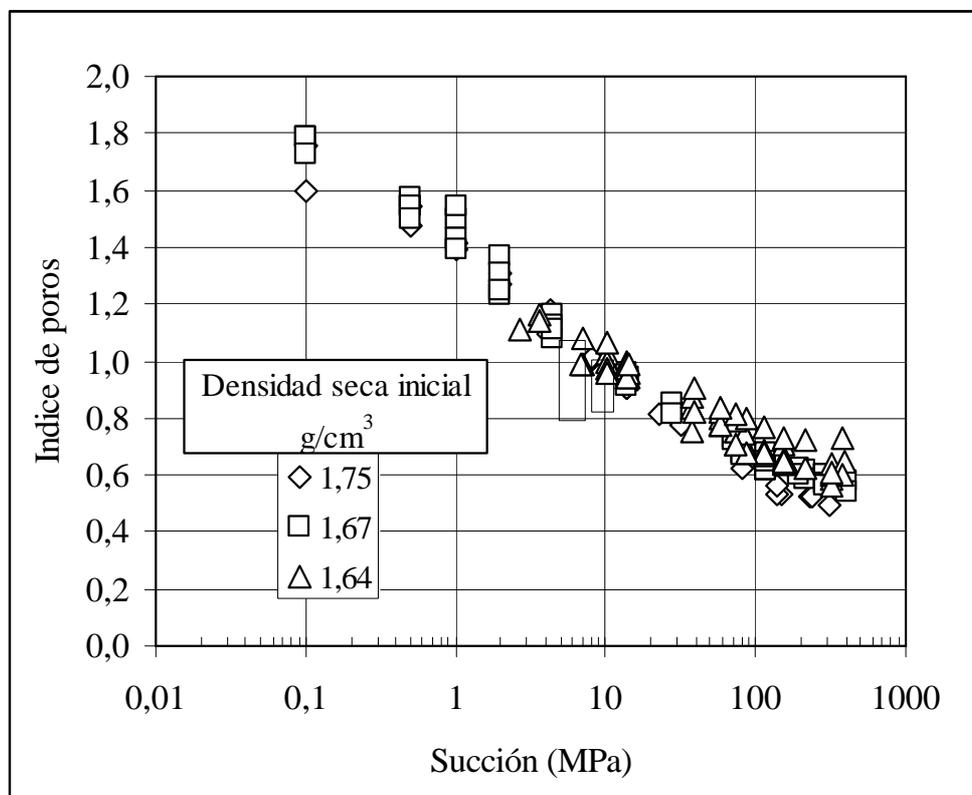
donde  $\rho_{d0}$  es la densidad seca inicial en  $\text{g/cm}^3$  y  $s$  la succión en MPa.

Asimismo, en la Figura 7 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:

$$\frac{-\Delta e}{\Delta \log_{10} s} = 0,388 ; \quad \frac{-\Delta e}{\Delta \ln s} = 0,168 \quad [12]; [13]$$



**Figura 6: Relación entre la densidad seca y la succión en ensayos de disminución de succión sin confinamiento**



**Figura 7: Cambio de índice de poros en los ensayos de disminución de succión sin confinamiento**

En la Figura 8 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 ( $\rho_d$ ) y de humedad ( $w$ ) expuestas anteriormente, puede escribirse una expresión para el grado de saturación,  $S_r$ , en función de la densidad seca inicial y de la succión ( $\rho_{d0}, s$ ):

$$S_r = \frac{r_s \cdot r_d(r_{d0}, s) \cdot w(r_{d0}, s)}{r_w (r_s - r_d(r_{d0}, s))} \quad [14]$$

donde  $\rho_s$  y  $\rho_w$  son, respectivamente, la densidad de las partículas del suelo y la densidad del agua.

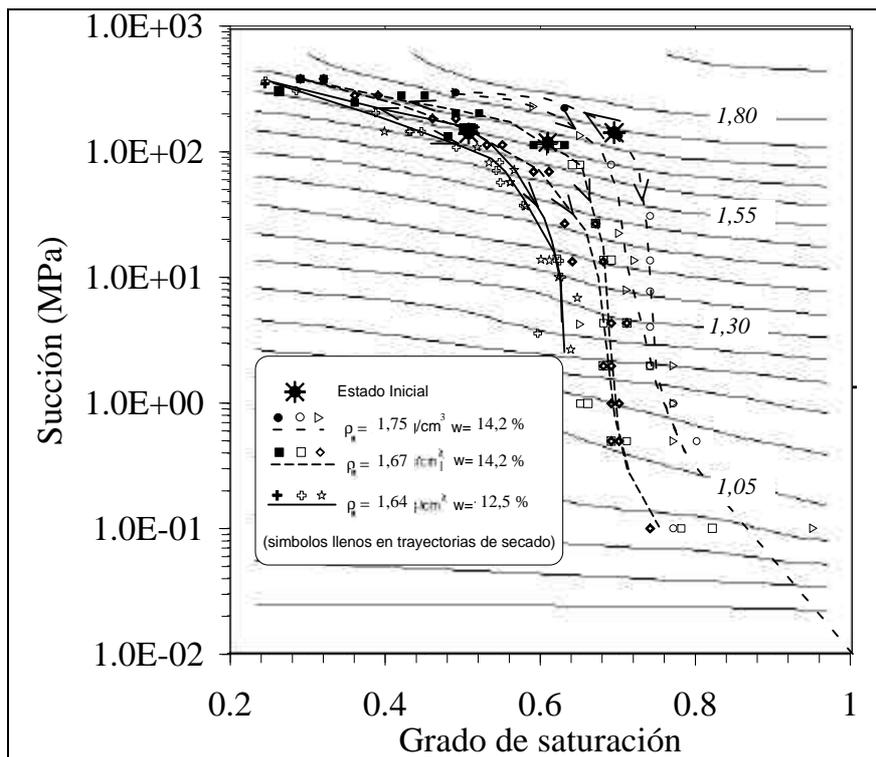


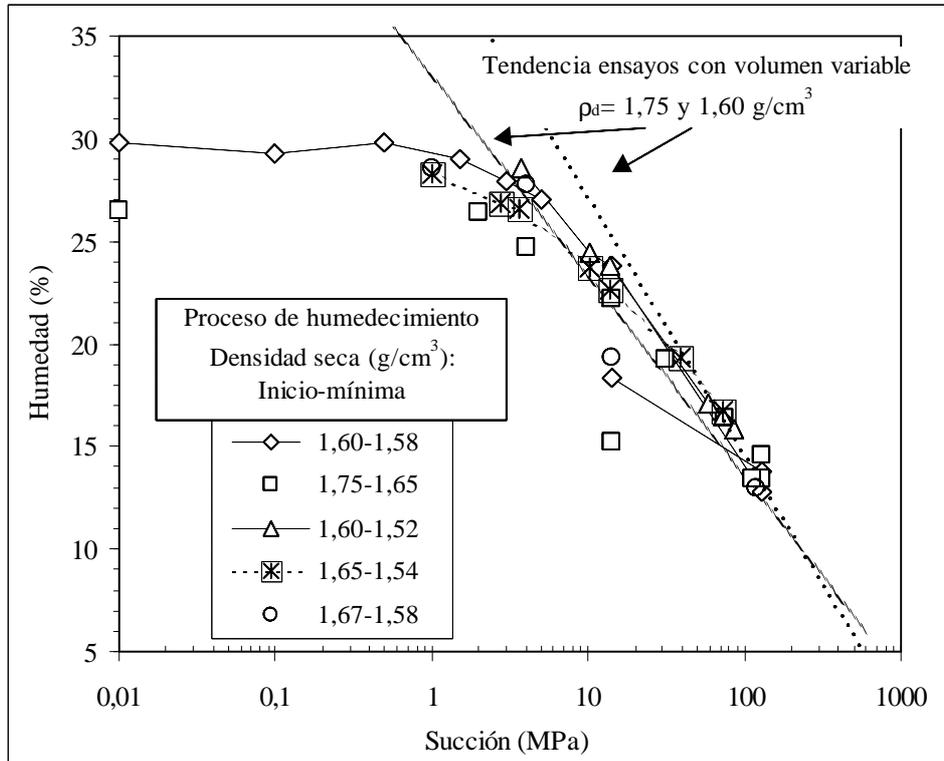
Figura 8: Relación succión/grado de saturación en ensayos sin confinamiento

#### 4.1.2. 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

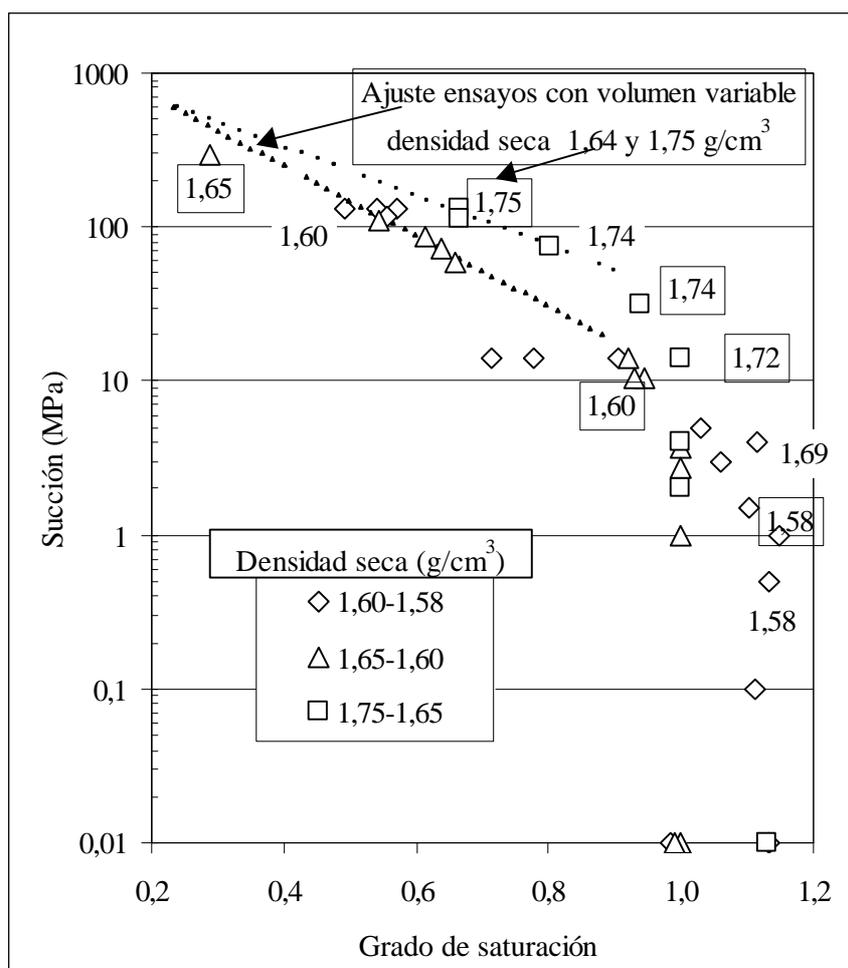
pequeños, por lo que el conocimiento de la relación succión/humedad a densidad constante es esencial. Para obtener la curva de retención en condiciones de cambio de volumen nulo ha sido necesario poner a punto nuevos procedimientos de ensayo.

En la Figura 9 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.



**Figura 9: Relación entre succión y humedad en trayectorias de humectación con confinamiento**

En la Figura 10 se muestran la curva de retención en trayectorias de humectación para densidades secas de 1,59 g/cm<sup>3</sup> y en el rango de 1,75 a 1,70 y de 1,65 a 1,60 g/cm<sup>3</sup>. 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.



**Figura 10: Curvas de retención en trayectorias de humectación con confinamiento (entre paréntesis se indica la densidad seca medida en la muestra ensayada)**

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

$$\frac{S_r - S_{r_0}}{S_{r_{\max}} - S_{r_0}} = \left[ 1 + \left( \frac{s}{P_0} \right)^{\frac{1}{1-I}} \right]^{-I} \quad [15]$$

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:

$$\frac{S_r - S_{r_0}}{S_{r_{\max}} - S_{r_0}} = \left[ 1 + \left( \frac{s}{P_0} \right)^{\frac{1}{1-I}} \right]^{-I} \left[ 1 - \frac{s}{P_s} \right]^{\lambda_s} \quad [16]$$

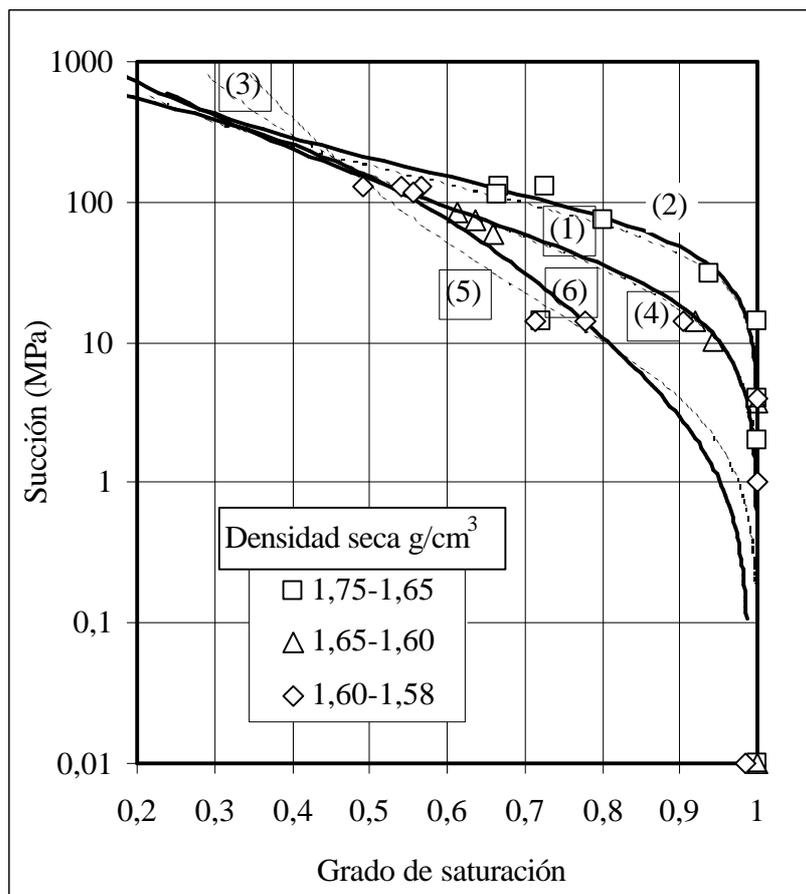
donde  $S_{r_0}$  y  $S_{r_{\max}}$  son los grados de saturación residual y máximo,  $s$  la succión (MPa) y  $P_0$  (MPa),  $P_s$ ,  $\lambda$  y  $\lambda_s$  son parámetros del modelo que dependen del material.

Si se toma para el parámetro  $P_s$  un valor muy elevado, o cero para el parámetro  $\lambda_s$ , 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 11. 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.

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

Intervalo de densidad seca ( $\text{g/cm}^3$ )	Tipo de ecuación (nº en Figura 11)	$P_0$ (MPa)	$l$	$S_{r0}$	$S_{rmax}$	$P_s$ (MPa)	$l_s$
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 11: 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**

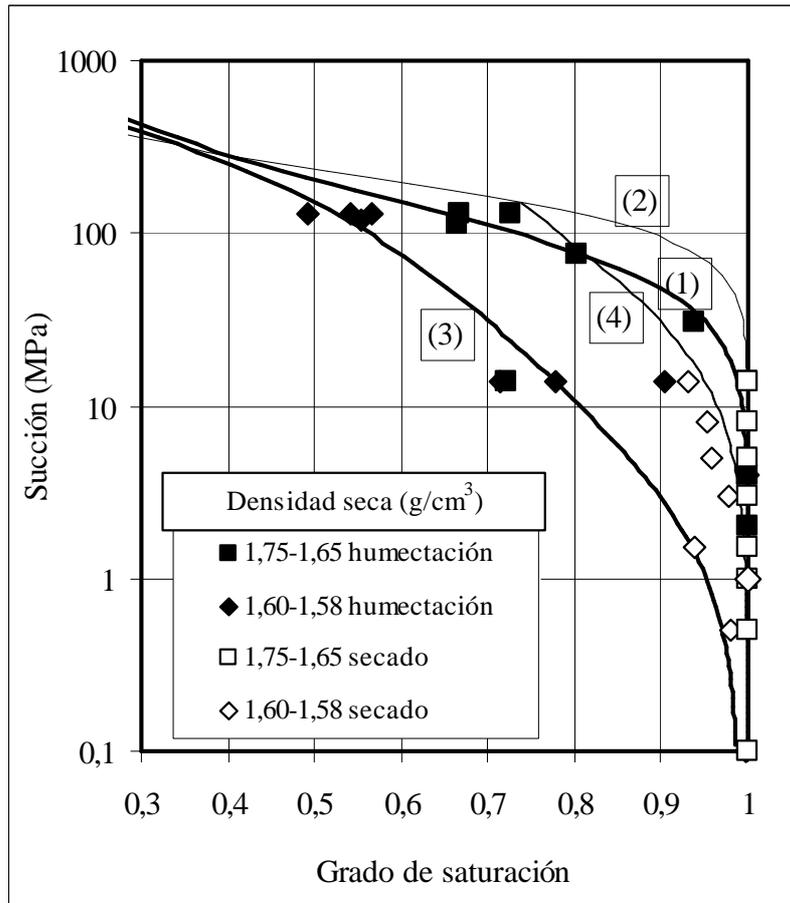
### 4.1.3. Efecto de la histéresis

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. 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. 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/cm<sup>3</sup> y del orden de 80 MPa para densidades secas de 1,75 g/cm<sup>3</sup>. En la Figura 12 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 12.

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

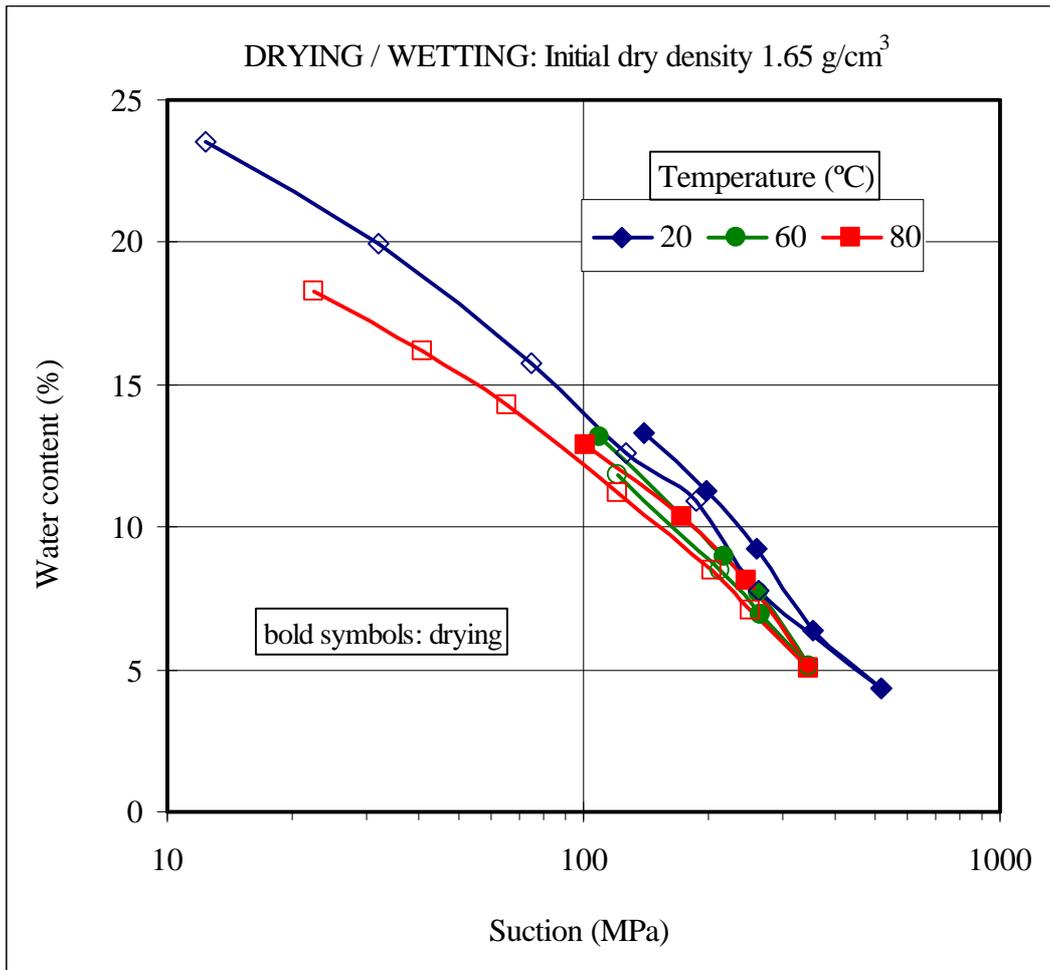
Intervalo de densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	Tipo de ecuación (nº en Figura 12)	$P_0$ (MPa)	$l$	$S_{r0}$	$S_{rmax}$	$P_s$ (MPa)	$l_s$
1,75-1,65 humectación	van Genuchten modificado (1)	100	0,45	0,01	1,00	1500	0,05
1,75-1,65 secado	van Genuchten (2)	180	0,62	0,0	1,00	-	-
1,60-1,58 humectación	van Genuchten 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 12: 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**

#### 4.1.4. Efecto de la temperatura

El efecto de la temperatura sobre las curvas de retención se está investigando tanto en condiciones de volumen libre como confinado. Se están determinando curvas de retención a temperaturas de 40, 60 y 80 °C para densidades secas comprendidas entre 1,60 y 1,70  $\text{g/cm}^3$ . Se han seguido trayectorias de secado/hidratación para las muestras no confinadas (Figura 13), y de hidratación/secado para las muestras mantenidas a volumen constante (Figura 14). La capacidad de retención es en todos los casos mayor para las muestras ensayadas a temperatura ambiente. Las curvas presentan histéresis, siendo las humedades de las trayectorias de humectación más bajas que las obtenidas para succiones semejantes durante el secado.



**Figura 13: Curvas de retención en trayectorias de secado/humectación determinadas a diferentes temperaturas para muestras no confinadas de densidad seca inicial 1,65 g/cm<sup>3</sup>**

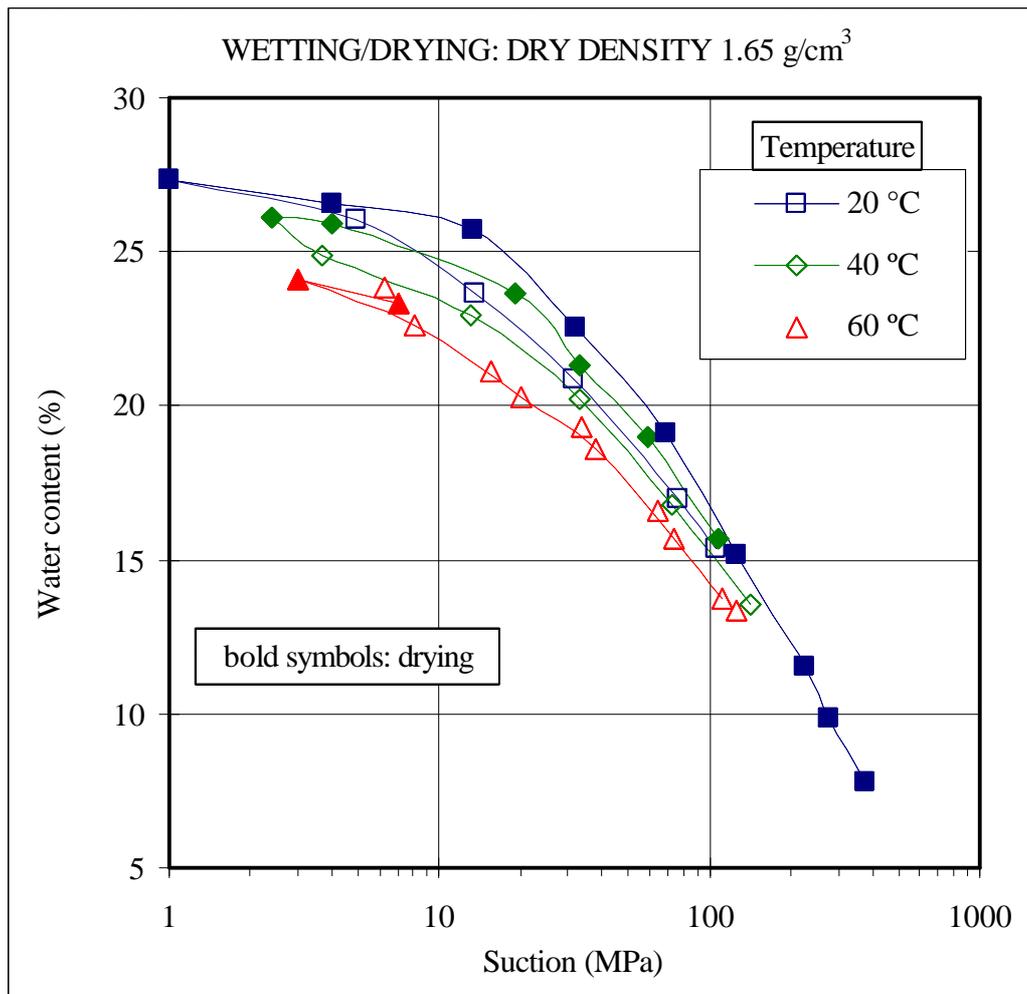
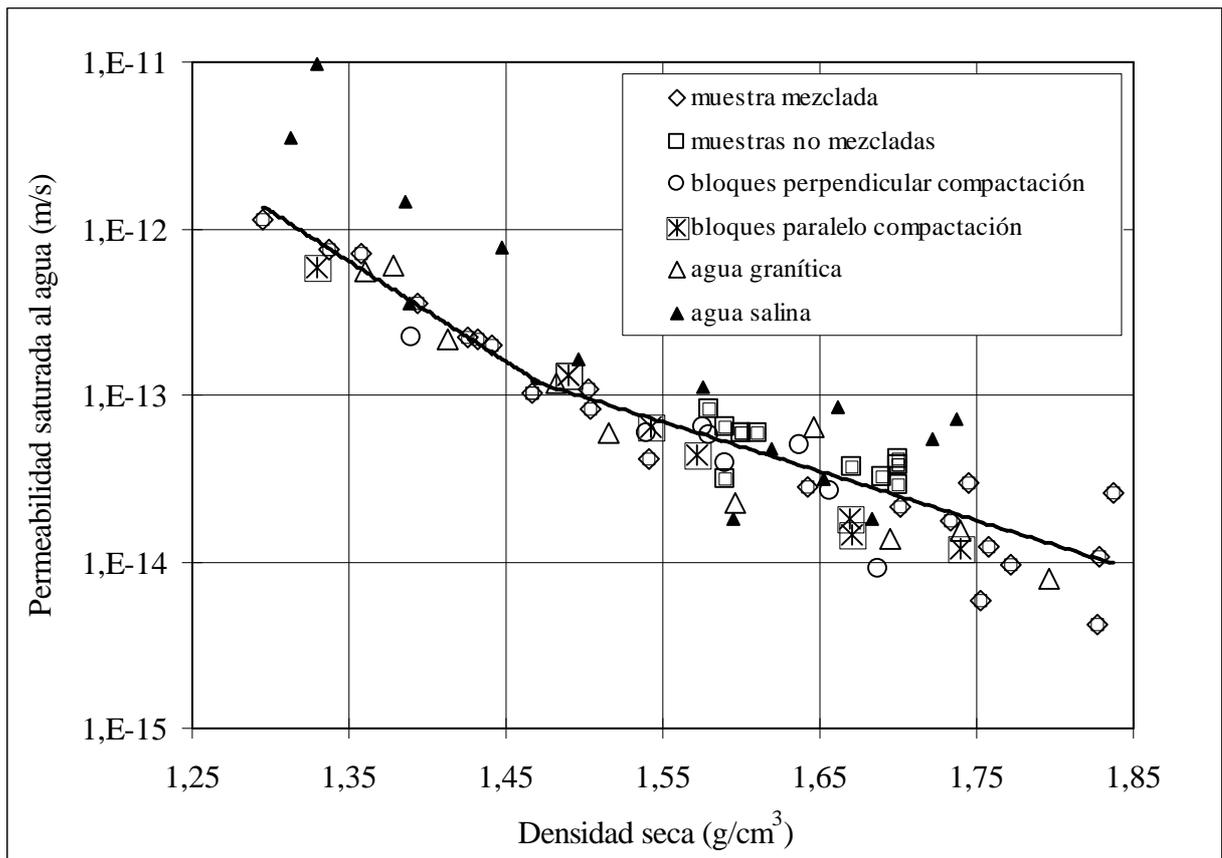


Figura 14: Curvas de retención a volumen constante y diferente temperatura

#### 4.2. PERMEABILIDAD SATURADA AL AGUA

La medida de la permeabilidad al agua de numerosas muestras compactadas a distintas densidades (Figura 15) ha permitido obtener con una buena fiabilidad la variación de la permeabilidad en función de la densidad seca o de la porosidad (ecuaciones 17 a 21). 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.



**Figura 15: 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 15 pueden establecerse las siguientes relaciones entre la densidad seca (en  $\text{g/cm}^3$ ) y la permeabilidad al agua destilada (en  $\text{m/s}$ ):

$$\log k_w = -6,00 \rho_d - 4,09 \quad \text{si } \rho_d < 1,47 \text{ g/cm}^3 \quad [17]$$

$$\log k_w = -2,96 \rho_d - 8,57 \quad \text{si } \rho_d > 1,47 \text{ g/cm}^3 \quad [18]$$

En la Figura 16 se muestran los valores de la permeabilidad intrínseca ( $k_{iw}$ ,  $\text{m}^2$ ) 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 16 pueden escribirse como:

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

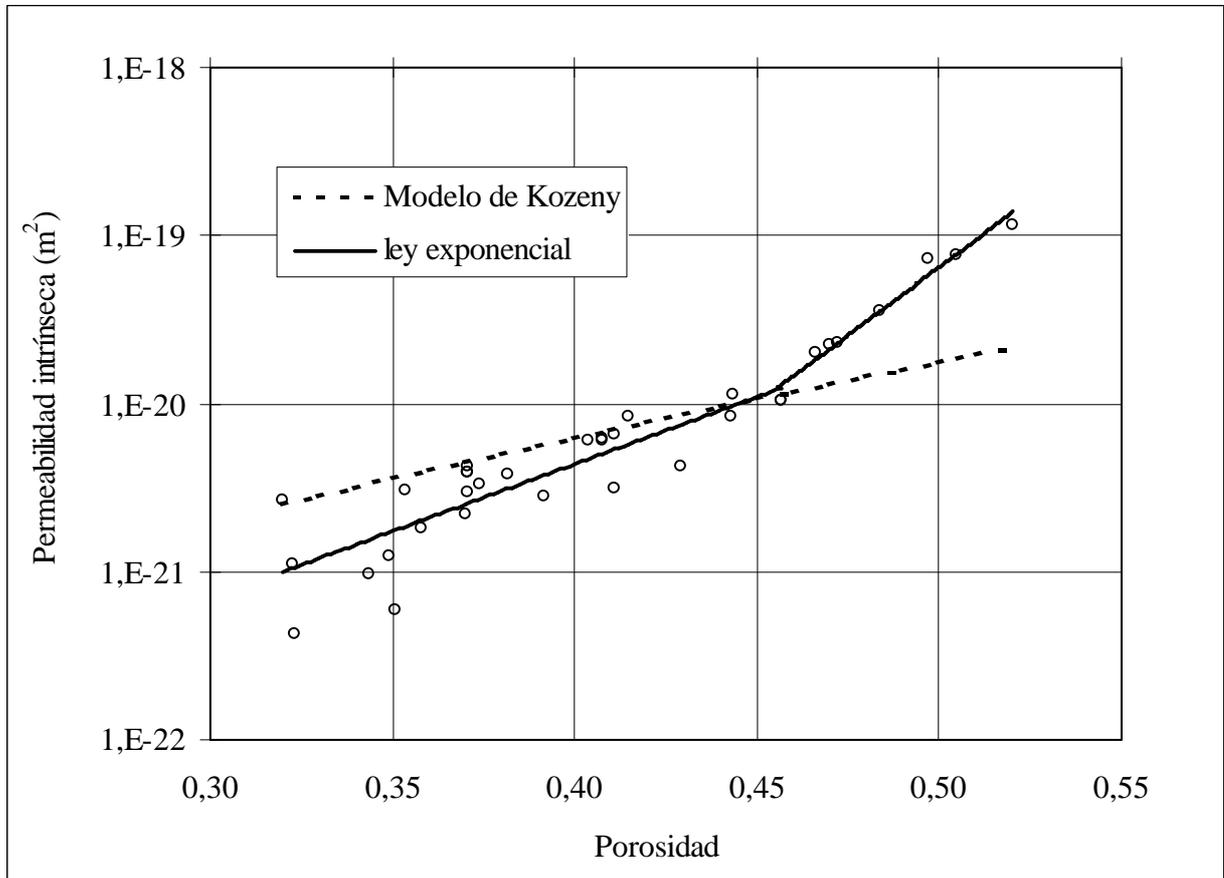
$$k_{iw} = 5,08 \cdot 10^{-28} e^{37,33 n} \quad [19]$$

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

$$k_{iw} = 2,79 \cdot 10^{-24} e^{18,39 n} \quad [20]$$

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

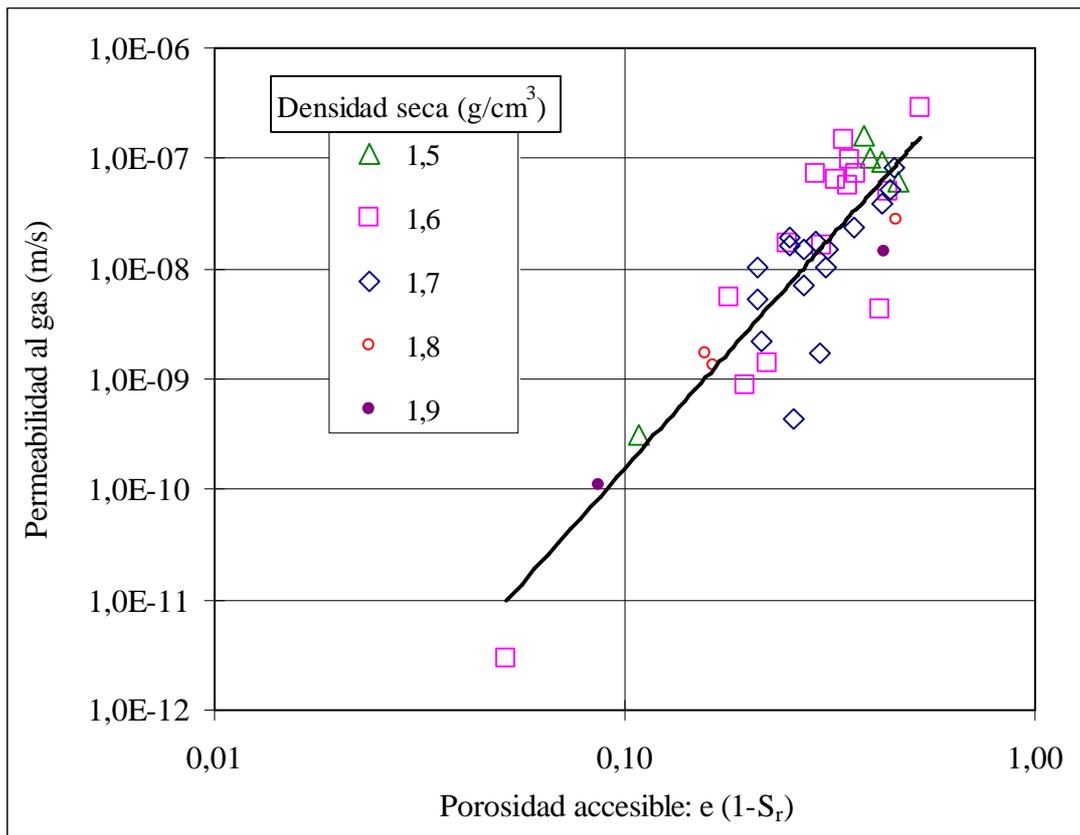
$$k_{iw} = 7,72 \cdot 10^{-21} \frac{(1 - 0,420)^2}{0,420^3} \frac{n^3}{(1 - n)^2} \quad (\text{modelo de Kozeny}) \quad [21]$$



**Figura 16: Variación de la permeabilidad intrínseca de la bentonita con diferentes porosidades**

### 4.3. PERMEABILIDAD AL GAS

Se ha medido la permeabilidad al gas sobre muestras con diferentes densidades (comprendidas entre 1,5 y 1,7 g/cm<sup>3</sup>) y grados de saturación. En la Figura 17 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 17: Relación entre la permeabilidad al gas y el volumen de poros accesible al gas**

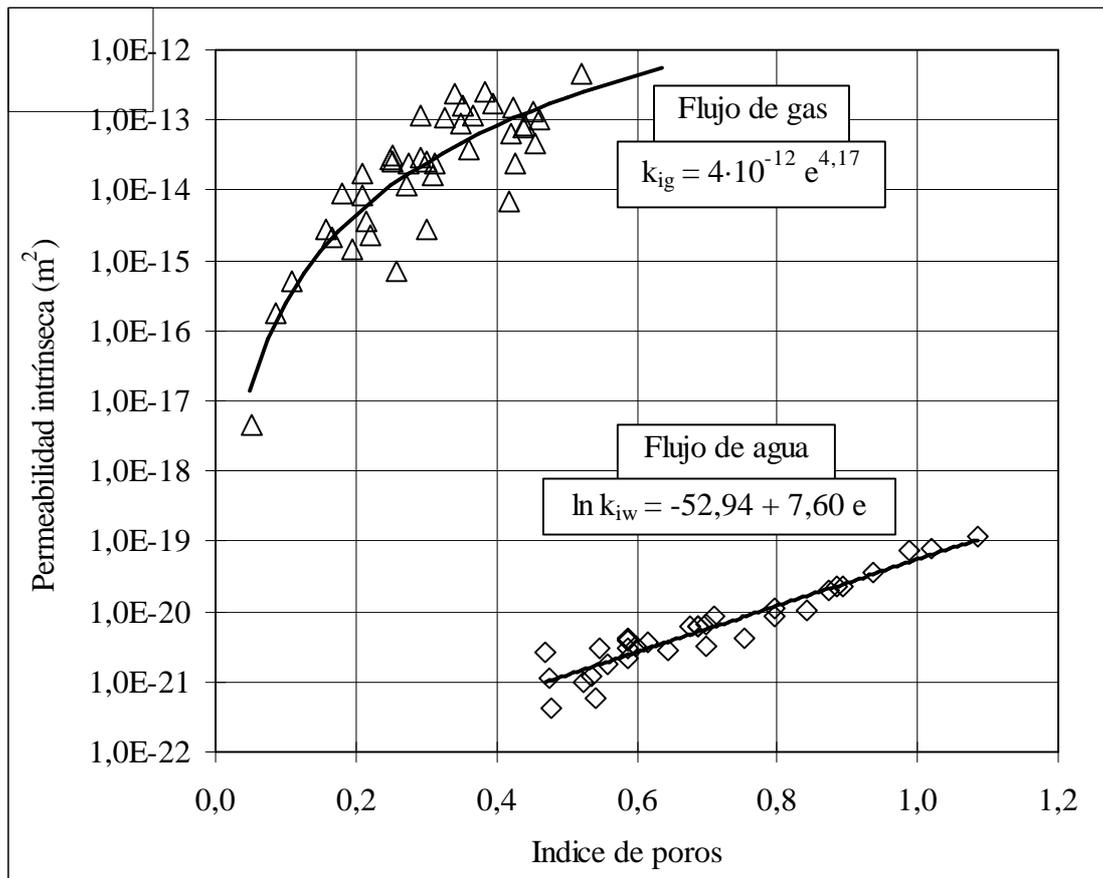
De la Figura 17 puede desprenderse la siguiente regresión entre la permeabilidad ( $k_g$ , m/s), el grado de saturación ( $S_r$ ) y el índice de poros ( $e$ ), para grados de saturación entre 0,25 y 0,80:

$$k_g = 2,29 \cdot 10^{-6} (e (1-S_r))^{4,17} \quad [22]$$

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, 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:

$$k_{ig} = 1,62 \cdot 10^{-6} k_g = 3,72 \cdot 10^{-12} e^{4,17} \quad [23]$$

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 (Figura 18) 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.



**Figura 18: 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**

#### 4.4. ENSAYOS DE INFILTRACIÓN

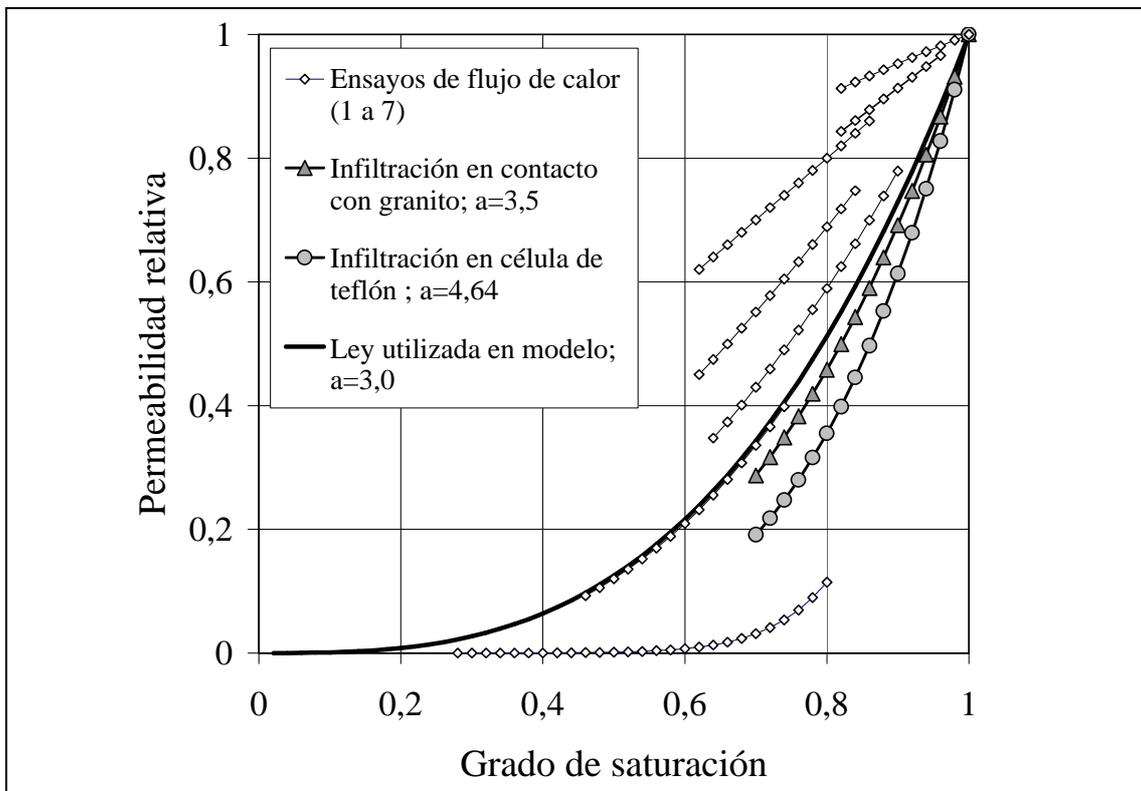
En el caso de arcillas poco permeables, la importante dependencia de la permeabilidad con el grado de saturación no puede ser evaluada mediante ensayos “directos”. El único procedimiento disponible para realizar esta evaluación es la utilización de técnicas de identificación de parámetros. Para ello, 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.

El efecto de la temperatura sobre la viscosidad del agua y del volumen de poros sobre la permeabilidad intrínseca permite explicar las diferentes velocidades de infiltración observadas en los ensayos de infiltración realizados a diferentes temperaturas y con diferentes densidades secas. Por tanto, la permeabilidad no saturada,  $k(S_r, T, \rho_d)$ , puede expresarse como:

$$k(S_r, T, \rho_d) = k_{iw}(S_r=1, \rho_d = \rho_{d0}) 10^{-3,6(\rho_d - \rho_{d0})} k_r(S_r) (\gamma_w / \mu_w(T)) \quad [24]$$

Donde  $k_{iw}$  es la permeabilidad intrínseca obtenida mediante flujo de agua,  $\rho_d$  la densidad seca,  $\rho_{d0}$  la densidad seca de referencia,  $\mu_w$  y  $\gamma_w$  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).

En la Figura 19 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. Los valores del exponente “a” por debajo de 3 son muy cuestionables. 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.



**Figura 19: 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 IV**

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:

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

$$k_r = S_r^3$$

$$\tau = 0,8$$

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

## 5. CARACTERIZACIÓN MECÁNICA

### 5.1. MÓDULO ELÁSTICO

Los resultados de la medida del módulo elástico de corte (G) sobre muestras compactadas con diferentes densidades y grados de saturación mediante el empleo de un equipo de columna resonante han presentado bastante dispersión. Aún así, el efecto del confinamiento y del grado de saturación se ha podido poner de manifiesto. 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 20 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.

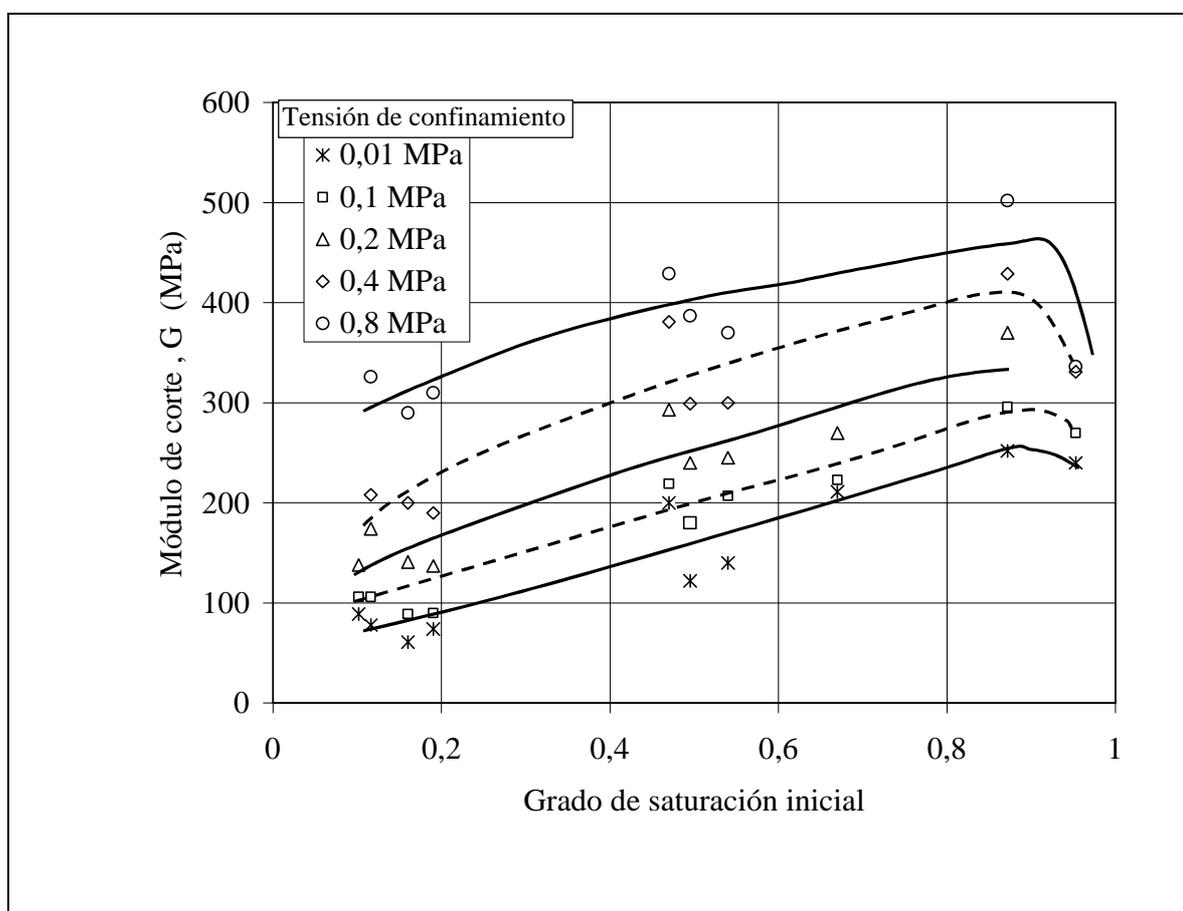


Figura 20: Evolución del módulo de corte con el grado de saturación para distintas presiones de confinamiento

### 5.2. DEFORMACIONES POR SATURACIÓN BAJO CARGA

La capacidad de hinchamiento de la bentonita se ha analizado mediante la determinación de las deformaciones de hinchamiento por saturación medidas en

muestras compactadas con diferentes densidades secas y humedades, cargadas bajo diferentes cargas verticales en condiciones edométricas y posteriormente inundadas con diferentes tipos de agua. Por tanto se ha analizado el efecto de la densidad y humedad de la bentonita y del tipo de agua sobre su capacidad de hinchamiento. Se dispone también de datos sobre la influencia de la temperatura sobre esta propiedad.

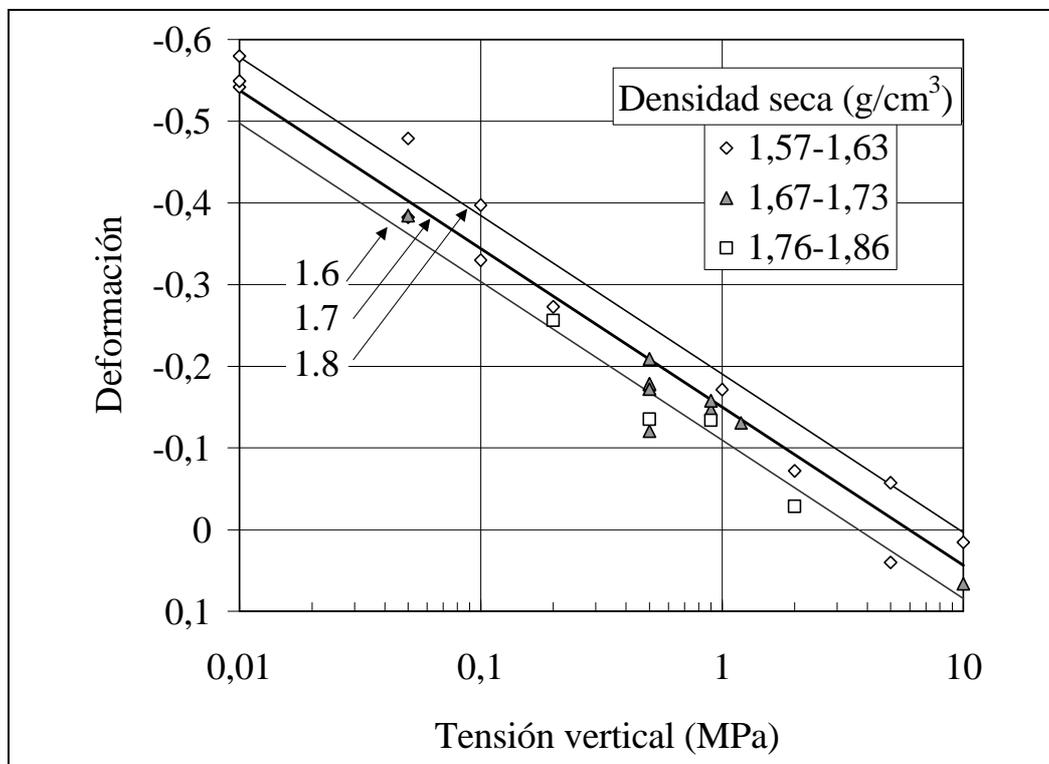
### 5.2.1. Efecto de la densidad

Se han medido las deformaciones de hinchamiento por saturación bajo diferentes cargas verticales en condiciones edométricas de muestras compactadas a diferentes densidades secas con la humedad higroscópica. Los resultados se muestran en la Figura 21. 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. Estas deformaciones pueden aproximarse utilizando la siguiente regresión:

$$\varepsilon = 0,469 + 0,1935 \log \sigma - 0,366 \rho_d \quad [25]$$

donde la tensión vertical,  $\sigma$ , está expresada en MPa, la densidad seca,  $\rho_d$ , en  $\text{g/cm}^3$  y la deformación,  $\varepsilon$ , es positiva cuando es de compresión. De esta ecuación se puede obtener aproximadamente la carga necesaria ( $\sigma_h^1$ , en MPa) para que, con ella aplicada, el cambio de volumen experimentado por el suelo al saturarse sea nulo:

$$\sigma_h^1 = 0,00377 \cdot 77,888^{\rho_d} \quad [26]$$



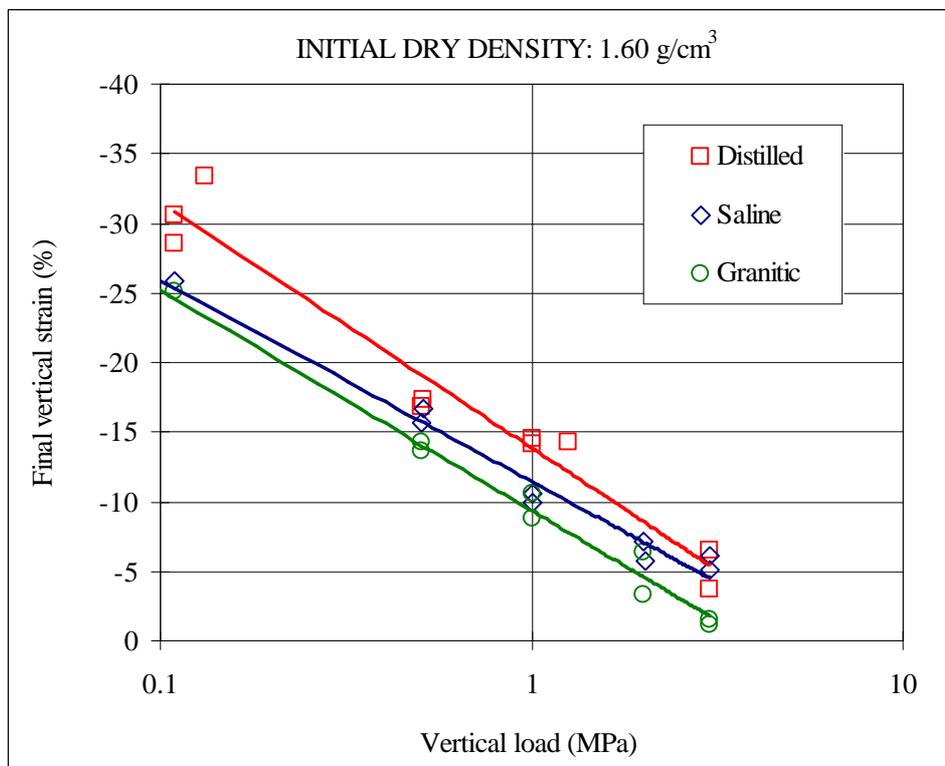
**Figura 21: Deformación medida y correlaciones obtenidas en los ensayos de hinchamiento bajo carga realizados en UPC y CIEMAT**

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. La relación entre el índice de poros final ( $e$ ) y la tensión mantenida ( $\sigma$  en MPa) durante la fase de saturación, para muestras de diferente densidad inicial, es la siguiente:

$$e = 0,78 - 0,309 \log \sigma \quad [27]$$

### 5.2.2. Efecto de la salinidad del agua

Se han realizado ensayos de hinchamiento bajo carga (de entre 0,1 y 3 MPa) de la arcilla compactada a densidad seca de 1,50, 1,60 y 1,70 g/cm<sup>3</sup> con agua salina, granítica y destilada. Las deformaciones finales en función de la carga vertical aplicada se representan en la en la Figura 22 para densidad seca nominal 1,60 g/cm<sup>3</sup>.



**Figura 22: Deformación final en muestras de densidad seca 1,50 g/cm<sup>3</sup> saturadas bajo diferentes cargas verticales y con diferentes aguas**

Teniendo en cuenta todos los resultados, se han obtenido las siguientes relaciones entre deformación ( $\epsilon$ , %) y carga vertical ( $\sigma$ , MPa) en función de la densidad seca inicial ( $\rho_d$ , g/cm<sup>3</sup>):

Para agua destilada:

$$\epsilon = (5,40 \rho_d - 1,32) \ln \sigma + (-48,25 \rho_d + 63,69) \quad [28]$$

Para agua salina:

$$\epsilon = 6,47 \ln \sigma + (-48,71 \rho_d + 66,13) \quad [29]$$

Para agua granítica:

$$\varepsilon = (-6,49 \rho_d + 16,53) \ln \sigma + (-43,59 \rho_d + 58,14) \quad [30]$$

Se ha observado una mayor capacidad de hinchamiento en las muestras saturadas con agua destilada, aunque esta diferencia es menos notable para las cargas verticales elevadas.

### **5.2.3. Efecto de la humedad inicial**

Se han realizado ensayos de saturación con agua destilada bajo diferentes cargas con muestras de bentonita compactada a densidades secas de 1,5, 1,6 y 1,7 g/cm<sup>3</sup> con humedades comprendidas entre 14 y 23 %. La Figura 23 muestra los resultados para la sobrecarga 0,1 MPa. Se ha comprobado que la capacidad de hinchamiento disminuye con la humedad inicial, pero esta disminución es menos notable a medida que aumenta la sobrecarga. Se han establecido las siguientes relaciones entre deformación final ( $\varepsilon$ , %), densidad seca inicial ( $\rho_d$ , g/cm<sup>3</sup>) y humedad ( $w$ , %):

Para sobrecarga 0,1 MPa:

$$\varepsilon = (55,1 \rho_d - 74,3) \ln w + (-204,6 \rho_d + 263,0) \quad [31]$$

Para sobrecarga 0,5 MPa:

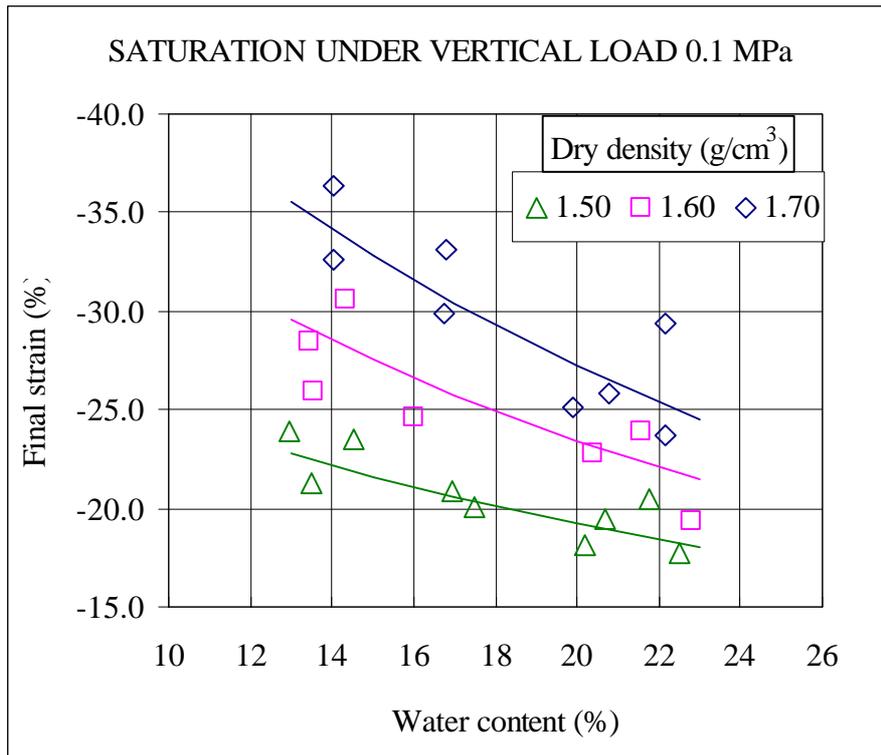
$$\varepsilon = (37,5 \rho_d - 50,4) \ln w + (-154,9 \rho_d + 204,2) \quad [32]$$

Para sobrecarga 1 MPa:

$$\varepsilon = (18,8 \rho_d - 27,1) \ln w + (-99,5 \rho_d + 138,6) \quad [33]$$

Para sobrecarga 3 MPa:

$$\varepsilon = (26,7 \rho_d - 39,9) \ln w + (-117,4 \rho_d + 174,6) \quad [34]$$

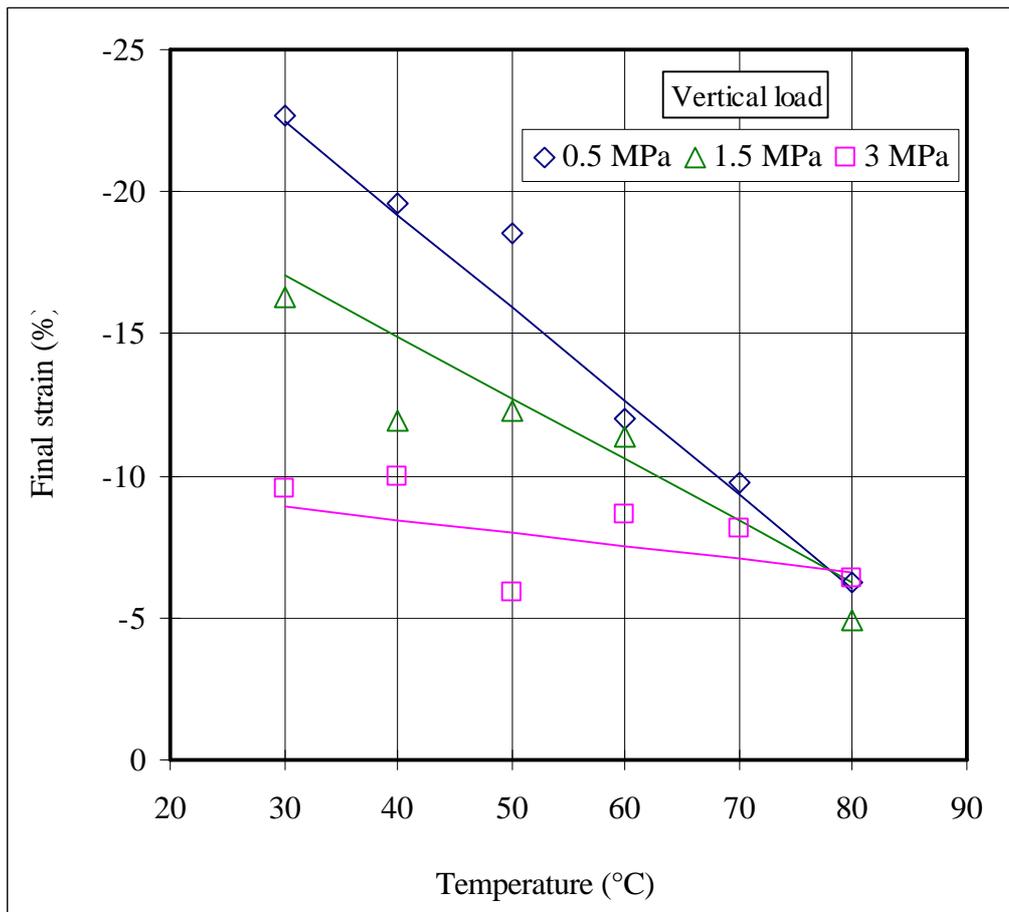


**Figura 23: Capacidad de hinchamiento bajo sobrecarga de 0,1 MPa en función de la densidad seca y la humedad inicial**

#### 5.2.4. Efecto de la temperatura

Para determinar la influencia de la temperatura sobre la capacidad de hinchamiento se han realizado ensayos de saturación bajo diferentes cargas a temperaturas comprendidas entre 30 y 80 °C, para la muestra compactada a densidad seca 1,60 g/cm<sup>3</sup> (Villar & Lloret 2002). La capacidad de hinchamiento disminuye con la temperatura y la sobrecarga (Figura 24), habiéndose encontrado la siguiente relación entre deformación vertical ( $\epsilon$ , %), temperatura (T, °C) y sobrecarga ( $\sigma$ , MPa):

$$\epsilon = (-0.11 \sigma + 0.38) T + (8.80 \sigma - 36.72) \quad [35]$$



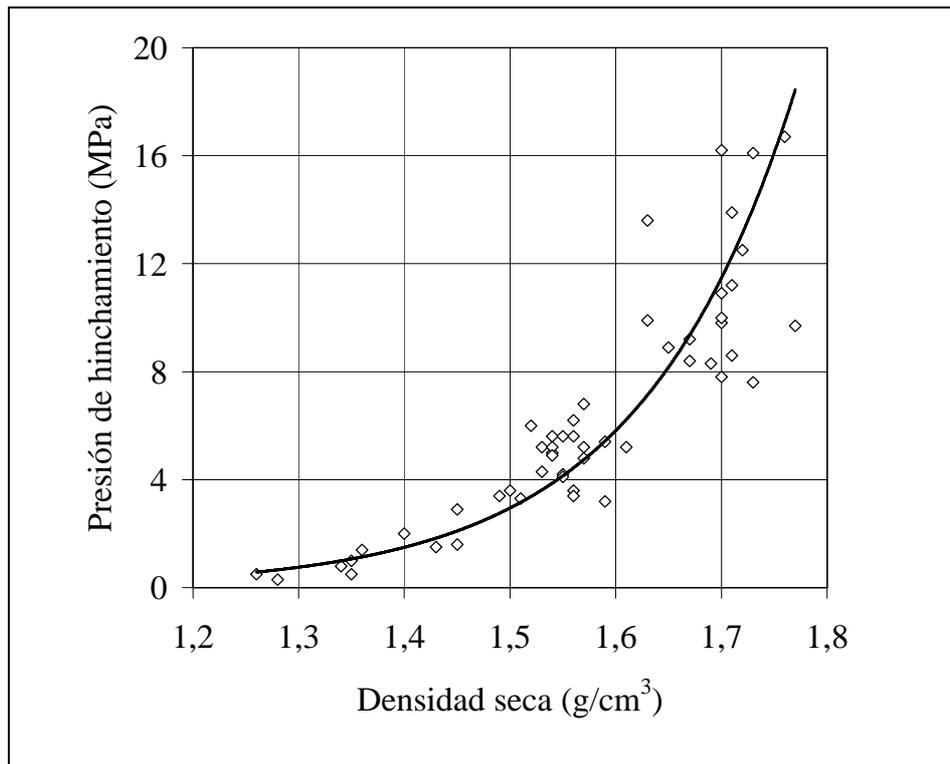
**Figura 24: Deformaciones finales en los ensayos de saturación bajo carga realizados con bentonita compactada a densidad seca inicial 1,60 g/cm<sup>3</sup> a diferentes temperaturas**

### 5.3. PRESIÓN DE HINCHAMIENTO

#### 5.3.1. Influencia de la densidad seca

En la Figura 25 se muestra el valor de la presión de hinchamiento desarrollada por muestras compactadas inicialmente con diversas densidades secas y saturadas con agua destilada. 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 g/cm<sup>3</sup>. En la Ecuación 36 se indica la relación que proporciona el valor de la presión de hinchamiento ( $P_s$  en MPa) en función de la densidad seca inicial ( $\rho_d$ , g/cm<sup>3</sup>).

$$P_s = \exp(6,77 \rho_d - 9,07) \quad [36]$$



**Figura 25: Valores de la presión de hinchamiento obtenidos en muestras compactadas con diversas densidades secas y saturadas con agua destilada**

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.

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.

### **5.3.2. Influencia de la temperatura**

Se está determinando la presión de hinchamiento en función de la temperatura para densidades secas de 1,60 y 1,50 g/cm<sup>3</sup>. Se produce una clara disminución del valor de la presión de hinchamiento con la temperatura (Figura 26).

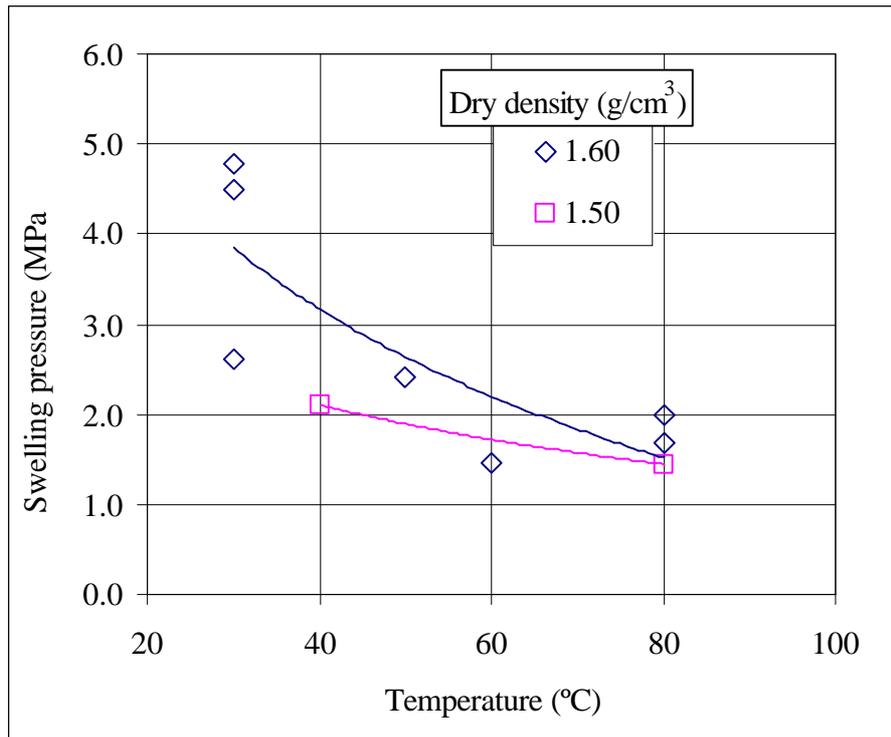


Figura 26: Variación de la presión de hinchamiento con la temperatura

#### 5.4. ENSAYOS EDMÉTRICOS CON SUCCIÓN CONTROLADA A TEMPERATURA AMBIENTE

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. Un análisis de estos resultados se puede encontrar en Lloret *et al.* (2002, 2003).

##### 5.4.1. Ensayos sin control de la deformación máxima

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 ( $s < s_0 \sim 120$  MPa). El valor de la pendiente de esta dependencia es a su vez muy dependiente del logaritmo de la carga aplicada (ecuaciones 37 y 38).

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

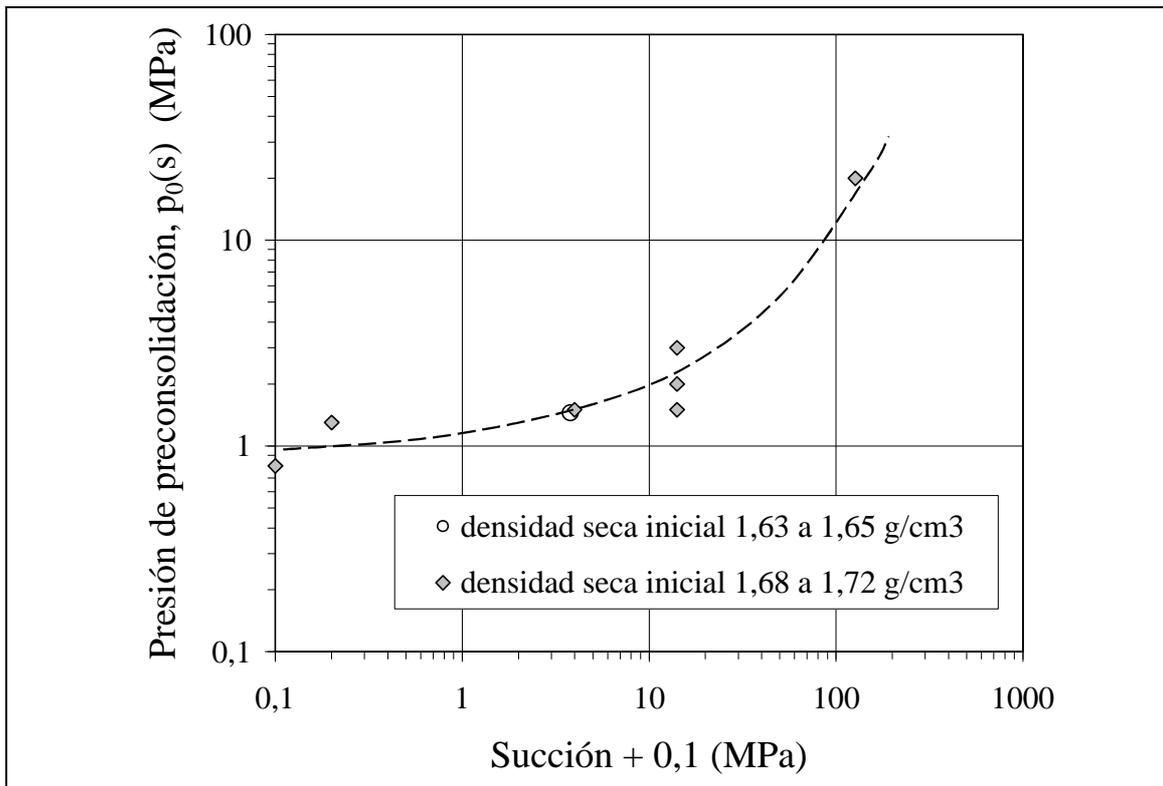
$$\delta e / \delta(\ln(s+p_{\text{atm}})) = \beta_{\text{ed}}(\sigma) = 0,017 \ln(\sigma) - 0,0352 \quad [37]$$

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

$$\delta e / \delta(\ln(s+p_{\text{atm}})) = \beta_{\text{ed}}(\sigma) = 0,0124 \ln(\sigma) - 0,0248 \quad [38]$$

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 27.



**Figura 27: Valor de la presión de preconsolidación obtenida en trayectorias de carga tras humedecimiento a diferentes succiones**

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 39 a 45. 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 28).

Carga:

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

densidad seca inicial del orden de 1,70 g/cm<sup>3</sup>:

$$\delta e / \delta(\ln \sigma) = \lambda_{ed}(s) = 0,0112 \ln(s + p_{atm}) - 0,0919 \quad [39]$$

densidad seca inicial del orden de 1,63 g/cm<sup>3</sup>:

$$\delta e / \delta(\ln \sigma) = \lambda_{ed}(s) = -0,14 \text{ (para } s = 3,7 \text{ MPa)} \quad [40]$$

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

densidad seca inicial del orden de 1,70 g/cm<sup>3</sup>:

$$\delta e / \delta(\ln \sigma) = \kappa_{ed}(s) = 0,0029 \ln(s + p_{atm}) - 0,0193 \quad [41]$$

densidad seca inicial del orden de 1,63 g/cm<sup>3</sup>:

$$\delta e / \delta(\ln \sigma) = \kappa_{ed}(s) = -0,01 \text{ (para } s > 100 \text{ MPa)} \quad [42]$$

Descarga:

densidad seca inicial del orden de 1,70 g/cm<sup>3</sup>:

$$\delta e / \delta(\ln \sigma) = \kappa_{ed0} = -0,043 \text{ (con succión nula)} \quad [43]$$

densidad seca inicial del orden de 1,63 g/cm<sup>3</sup>:

$$\delta e / \delta(\ln \sigma) = \kappa_{ed0} = -0,01 \text{ (s = 3,7 MPa)} \quad [44]$$

$$\delta e / \delta(\ln \sigma) = \kappa_{ed0} = -0,085 \text{ (con succión nula)} \quad [45]$$

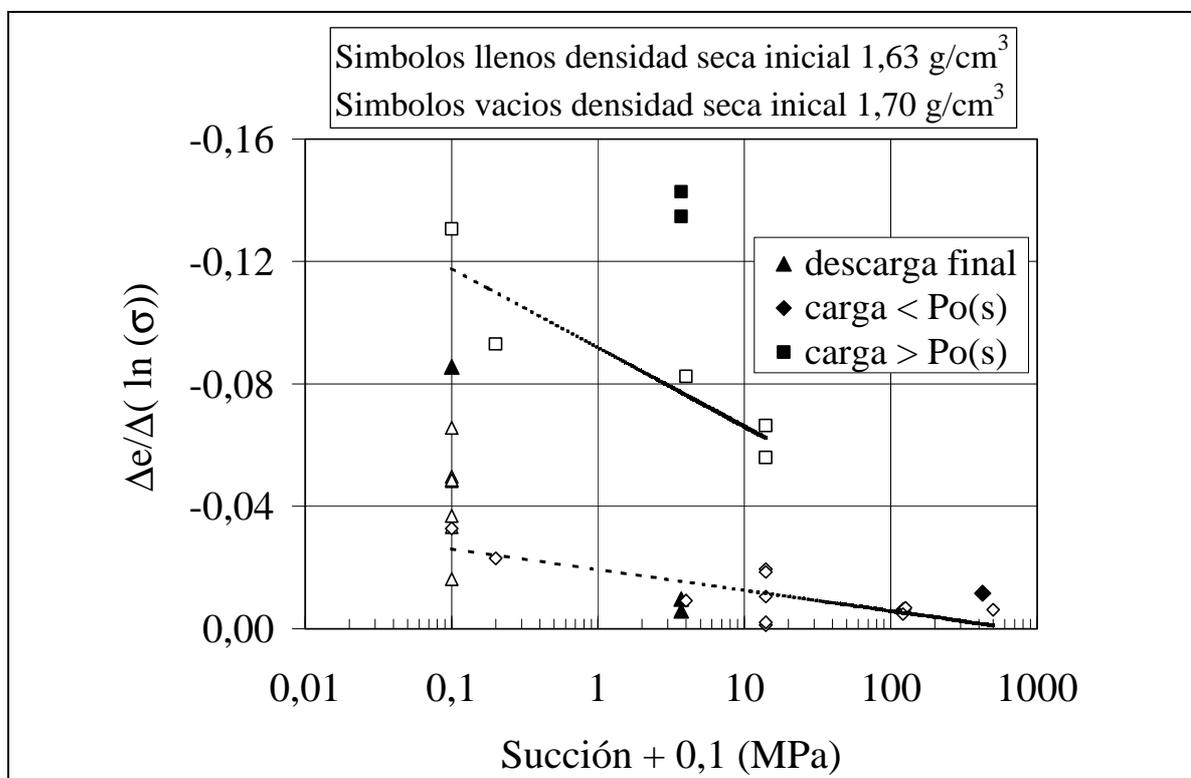
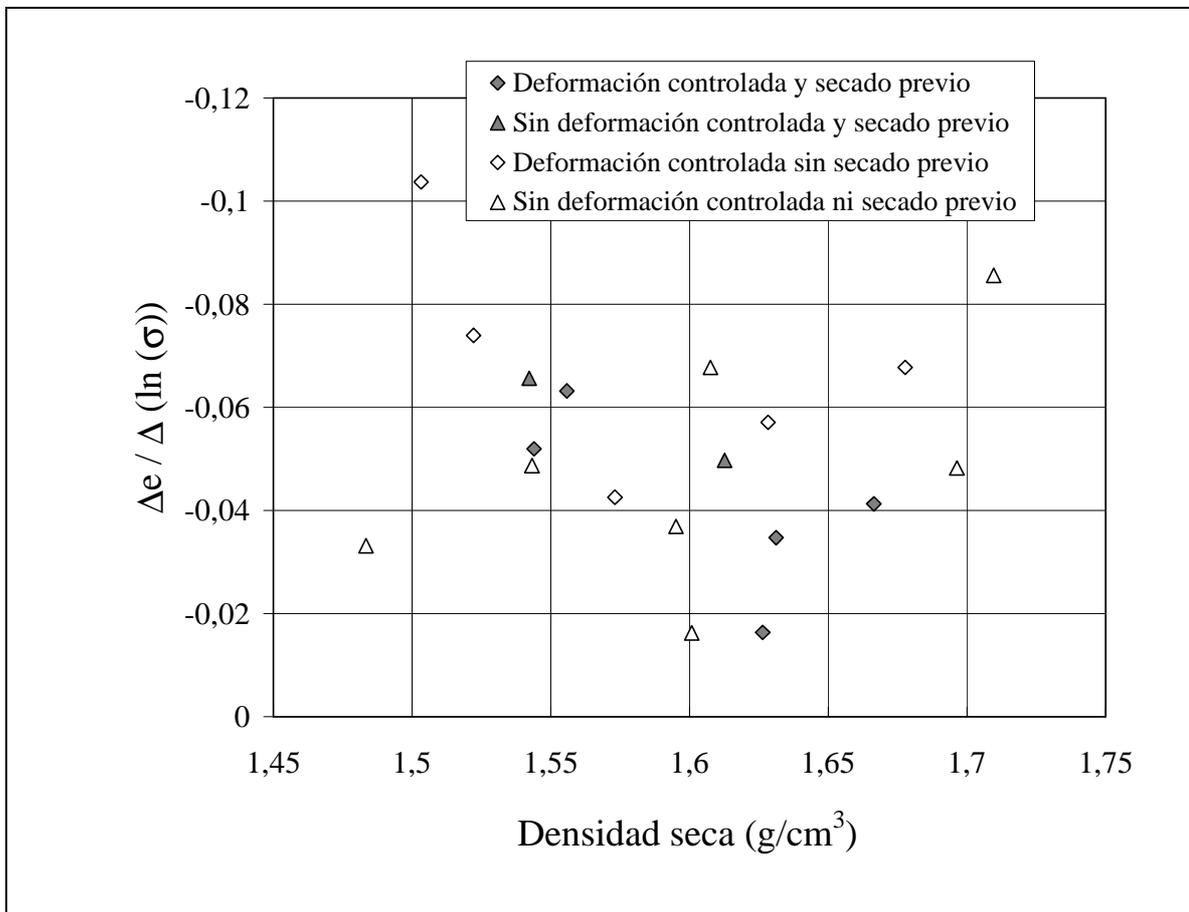


Figura 28: Valores de la compresibilidad de la bentonita cargada o descargada a diferentes valores de la succión

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 bajo una carga de 0,1 MPa son pequeños y prácticamente reversibles. La variación del índice de poros ( $e$ ) durante este secado se puede relacionar con la densidad seca inicial ( $\rho_d$ , g/cm<sup>3</sup>) y la succión ( $s$ , MPa) mediante la siguiente expresión:

$$e = (0,16 \rho_d - 0,29) \ln s + (-1,68 \rho_d + 3,53) \quad [46]$$

En los procesos de descarga una vez saturada la muestra, los cambios de volumen han sido elevados ( $C_s$  del orden de  $-0,1$ ). De hecho, 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. La pendiente de la relación entre la magnitud de la carga y el índice de poros del suelo se indica en la Figura 29.



**Figura 29: Valores de la deformabilidad en descarga para diferentes ensayos bajo condiciones de saturación**

#### 5.4.2. Ensayos con control de la deformación máxima

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

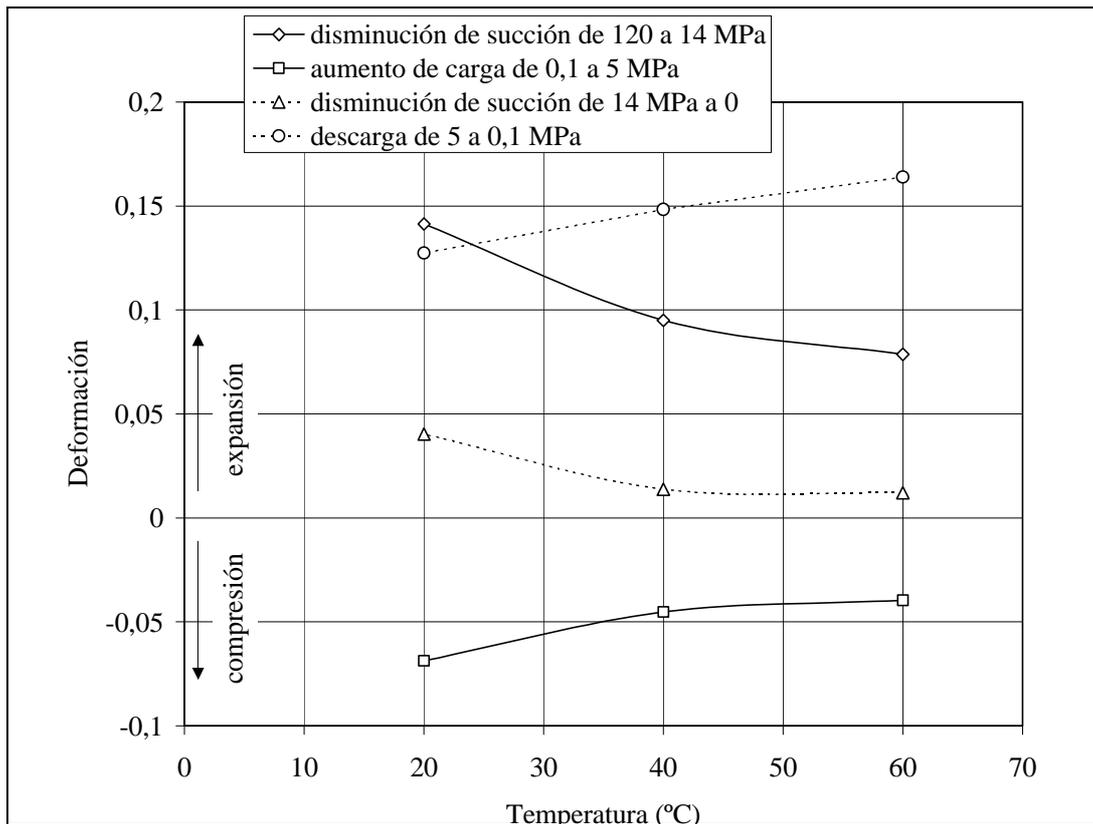
y de carga. Cuanto más rígido sea el suelo frente a un aumento de carga, más rápidamente aumenta el valor de la tensión vertical al reducirse la succión. En una segunda fase, cuando la carga se acerca al valor de la presión de preconsolidación aparente correspondiente a cada succión, la rigidez del suelo 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.

## **5.5. ENSAYOS EDMÉTRICOS CON SUCCIÓN CONTROLADA A ALTAS TEMPERATURAS**

Se han realizado ensayos edométricos con control de succión y temperatura utilizando la técnica de la traslación de ejes para imponer el valor de la succión.

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 30 se muestra claramente cómo a medida que aumenta la temperatura del ensayo la magnitud del hinchamiento por reducción de la succión disminuye. El efecto de la temperatura sobre la rigidez del suelo frente a aumentos de carga queda enmascarado por las diferentes deformaciones producidas durante la disminución inicial de la succión, que hacen que la estructura del suelo cambie (en concreto el índice de poros), con la consiguiente influencia sobre la magnitud de las deformaciones posteriores.



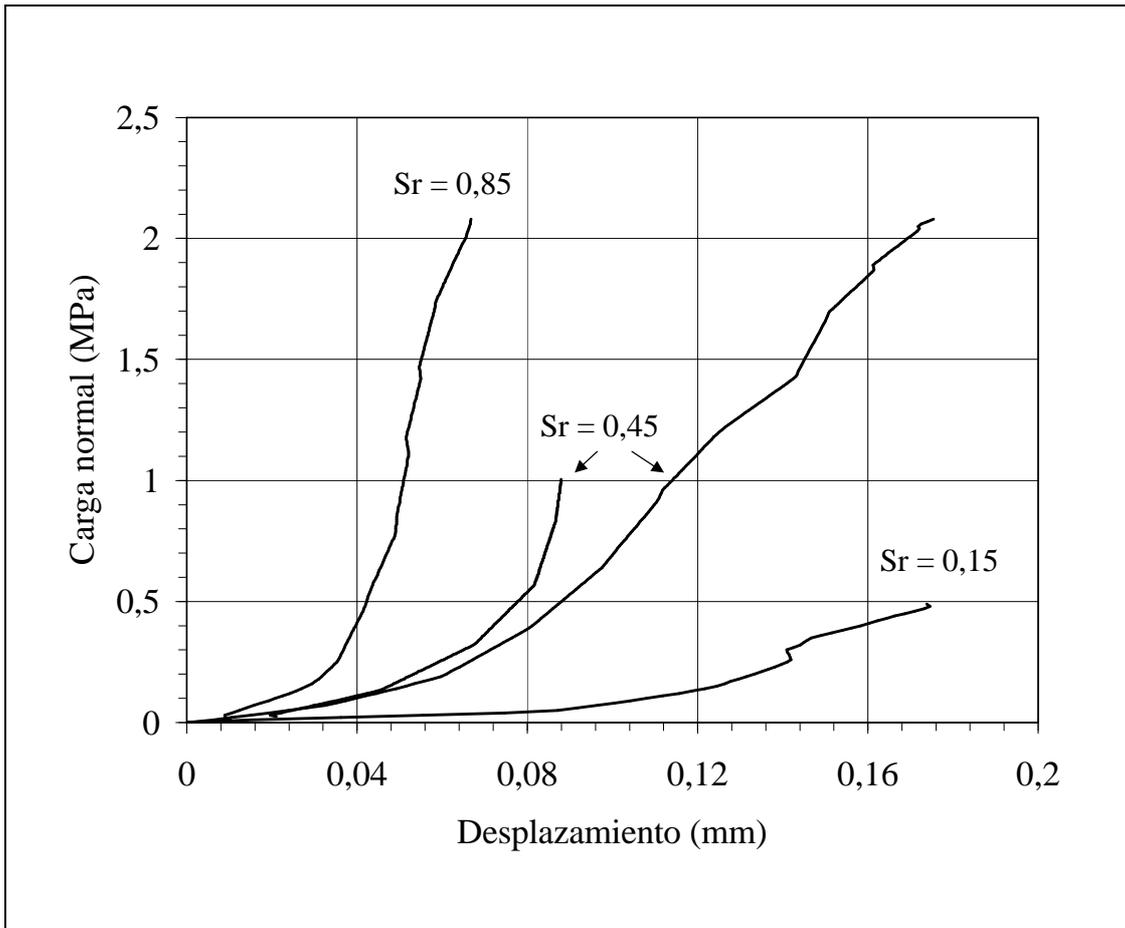
**Figura 30: Deformaciones por cambios de succión y de carga a diversas temperaturas en ensayos edométricos con control de succión por presión de gas**

## 5.6. ENSAYOS EN JUNTAS

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.

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. 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 31.



**Figura 31: Relación entre la carga y el desplazamiento entre los labios de una junta entre bloques, para diversos grados de saturación**

## 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.
- LLORET, A. & PINTADO, X. (1999): Ensayos THM para el proyecto FEBEX realizados por la UPC-DIT. Informe FEBEX 70-UPC-M-0-03.
- LLORET, A.; VILLAR, M.V. & PINTADO, X.(2002): Ensayos THM: Informe de síntesis. Informe CIEMAT/DIAE/54520/1/02. Informe FEBEX 70-UPC-M-0-04. 98 pp.
- LLORET, A.; VILLAR, M.V; SÁNCHEZ, M.; GENS, A.; PINTADO, X. & ALONSO, E. (2003): Mechanical behaviour of a heavily compacted bentonite under high suction changes. *Géotechnique* 53(1): 27-40.
- 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.
- VILLAR, M.V. & LLORET, A. (2002): Temperature influence on the hydro-mechanical behaviour of a compacted bentonite. *Proc. Int. Meeting Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement*. ANDRA, Reims.