



Ciemat

CIEMAT/DIAE/54520/1/00

Informe 70-IMA-L-0-76 rev. 0 Marzo 2001

**ENSAYOS TERMOHIDRÁULICOS
EN CELDAS GRANDES:
PROPIEDADES HIDRO-MECÁNICAS**

- Versión 0 -

AUTOR: M.V. Villar

LABORATORIO: R. Campos, J. Aroz, J. Almendrote, A. Pelayo, J.M. Durán

Marzo 2001



Ciemat

CIEMAT/DIAE/54520/1/00

Informe 70-IMA-L-0-76 rev. 0 Marzo 2001

**ENSAYOS TERMOHIDRÁULICOS
EN CELDAS GRANDES:
PROPIEDADES HIDRO-MECÁNICAS**

- Versión 0 -

PREPARADO (Prepared)	REVISADO (Revised)	APROBADO (Approved)
FECHA (Date): marzo 01	FECHA (Date): marzo 01	FECHA (Date): marzo 01
FIRMA (Signature): M.V. Villar	FIRMA (Signature): P. Rivas	FIRMA (Signature): P. Rivas

ENSAYOS TERMOHIDRÁULICOS EN CELDAS GRANDES: PROPIEDADES HIDRO-MECÁNICAS

Indice

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
2.	METODOLOGÍA DE LOS ENSAYOS TERMO-HIDRÁULICOS.....	3
3.	RESULTADOS DE LOS ENSAYOS TERMO-HIDRÁULICOS	9
3.1.	6 MESES: ENSAYO FQ1/2.....	9
3.2.	12 MESES: ENSAYO FQ1	13
3.3.	24 MESES: ENSAYO FQ2.....	18
3.4.	COMPARACIÓN ENTRE LOS DIFERENTES ENSAYOS.....	23
4.	PROPIEDADES HIDRO-MECÁNICAS EN LA ARCILLA NO TRATADA	29
4.1.	POROSIDAD	29
4.2.	PERMEABILIDAD	31
4.3.	PRESIÓN DE HINCHAMIENTO.....	32
4.4.	HINCHAMIENTO BAJO CARGA.....	32
5.	PROPIEDADES HIDRO-MECÁNICAS TRAS TRATAMIENTO TERMO-HIDRÁULICO.....	34
5.1.	6 MESES: ENSAYO FQ1/2.....	34
5.1.1.	Muestra intacta.....	34
5.1.1.1.	Porosimetría.....	34
5.1.1.2.	Hinchamiento bajo carga.....	35
5.1.1.3.	Permeabilidad.....	37
5.1.2.	Muestra remoldeada	38
5.1.2.1.	Hinchamiento bajo carga.....	39
5.1.2.2.	Presión de hinchamiento	40
5.2.	12 MESES: ENSAYO FQ1	42
5.2.1.	Muestra intacta.....	42
5.2.1.1.	Presión de hinchamiento	42
5.2.1.2.	Permeabilidad.....	43
5.2.2.	Muestra remoldeada	45
5.2.2.1.	Hinchamiento bajo carga.....	45
5.2.2.2.	Presión de hinchamiento	46
5.3.	24 MESES: ENSAYO FQ2.....	48
5.3.1.	Muestra intacta.....	48
5.3.1.1.	Porosidad	48
5.3.1.2.	Presión de hinchamiento	50
5.3.1.3.	Permeabilidad.....	51
5.3.2.	Muestra remoldeada	52
5.3.2.1.	Presión de hinchamiento	52
5.4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	54
5.4.1.	Porosidad	54
5.4.2.	Hinchamiento bajo carga	55
5.4.3.	Presión de hinchamiento	56
5.4.4.	Permeabilidad	60
6.	CONCLUSIONES.....	63
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	65

Índice de figuras

Figura 1: Representación esquemática del diseño experimental para ensayos en celdas grandes	3
Figura 2: Aspecto de las celdas termo-hidráulicas en funcionamiento, las tres primeras con cámara de muestreo	4
Figura 3: Cámara de refrigeración de la celda tras quitar la brida superior	6
Figura 4: Desmontaje de la brida inferior	7
Figura 5: Separación de la coquilla de acero inoxidable para iniciar la extracción de la probeta de bentonita	7
Figura 6: Establecimiento de secciones en probetas ya extraídas.....	8
Figura 7: Distribución de las secciones de muestreo al finalizar los ensayos termo-hidráulicos.....	9
Figura 8: Evolución de temperaturas registradas por los diferentes termopares (T1 a T5) y toma de agua en el ensayo FQ1/2.....	10
Figura 9: Distribución final de humedad y densidad en el ensayo FQ1/2.....	13
Figura 10: Evolución de temperaturas registradas por los diferentes termopares (T1 a T5) en el ensayo FQ1	14
Figura 11: Aspecto del sellado de las dos probetas superiores del ensayo FQ1 (entre las secciones 4 y 5). La separación entre las secciones 6 y 7 es debida a rotura mecánica al extraer la probeta	15
Figura 12: Distribución final de humedad y densidad en el ensayo FQ1	18
Figura 13: Evolución de temperaturas registradas por los diferentes termopares (T1 a T5) y toma de agua en el ensayo FQ2.....	19
Figura 14: Aspecto de un fragmento de la probeta 2 (sección 7), probeta 3 (secciones 8 a 12) y un fragmento de la probeta 4 (secciones 13 a 15) tras el desmontaje del ensayo FQ2.	20
Figura 15: Aspecto de la bentonita en contacto con el calentador al desmontar el ensayo FQ2.....	20
Figura 16: Distribución final de humedad y densidad en el ensayo FQ2.....	23
Figura 17: Temperaturas medias en diferentes posiciones para ensayos de diferente duración	24
Figura 18: Valores medios para intervalos de 1000 horas de las temperaturas registradas por los termopares (T1 a T5) en ensayos de diferente duración	25
Figura 19: Distribución final de humedad en ensayos de diferente duración.....	26
Figura 20: Distribución final de densidad en ensayos de diferente duración	27
Figura 21: Distribución final de grados de saturación en ensayos de diferente duración	28
Figura 22: Evolución de la deformación en función del tiempo durante los ensayos de saturación con agua granítica bajo carga de 0,5 MPa realizados con muestra proveniente de diferentes secciones del ensayo FQ1/2	36
Figura 23: Valores de deformación de los ensayos de hinchamiento bajo carga de 0,5 MPa realizados con muestra proveniente del ensayo FQ1/2 saturada con agua granítica	37
Figura 24: Permeabilidad tras tratamiento termo-hidráulico durante 6 meses (ensayo FQ1/2) en función de la distancia de la muestra al calentador	38
Figura 25: Deformación final en los ensayos de hinchamiento bajo carga de 0,5 MPa realizados con muestra proveniente del ensayo FQ1/2 remoldeada a densidad seca nominal de 1,60 g/cm ³ y saturada con agua granítica.....	40
Figura 26: Presión de hinchamiento de muestra proveniente del ensayo FQ1/2 remoldeada y saturada con agua destilada.....	42
Figura 27: Presión de hinchamiento de muestra proveniente del ensayo FQ1 saturada con agua granítica.....	43
Figura 28: Permeabilidad tras tratamiento termo-hidráulico durante 12 meses (ensayo FQ1) en función de la distancia de la muestra al calentador	44
Figura 29: Deformación final en los ensayos de hinchamiento bajo carga de 0,5 MPa realizados con muestra proveniente del ensayo FQ1 remoldeada a densidad seca nominal de 1,60 g/cm ³ , molida a tamaño inferior a 2 mm y saturada con agua granítica.....	46
Figura 30: Presión de hinchamiento de muestra proveniente del ensayo FQ1 remoldeada a densidad seca 1,60 g/cm ³ y saturada con agua destilada.....	48
Figura 31: Presión de hinchamiento de muestra proveniente del ensayo FQ2 saturada con agua destilada.....	51
Figura 32: Permeabilidad tras tratamiento termo-hidráulico durante 24 meses (ensayo FQ2) en función de la distancia de la muestra al calentador	52
Figura 33: Presión de hinchamiento de muestra proveniente del ensayo FQ2 remoldeada y saturada con agua destilada.....	54

Figura 34: Desviación de los valores de deformación bajo carga de 0,5 MPa para muestra intacta (i) y remoldeada a densidad seca 1,60 g/cm ³ (r) proveniente de ensayos termo-hidráulicos de diferente duración respecto a los valores esperados para muestra no tratada	56
Figura 35: Valores de presión de hinchamiento de muestra no tratada (ajuste FEBEX) y de muestras sometidas a tratamiento termohidráulico durante diferentes tiempos.....	57
Figura 36: Desviación de los valores de presión de hinchamiento de muestra proveniente de ensayos termo-hidráulicos de diferente duración respecto a los valores esperados para muestra no tratada	58
Figura 37: Comparación de la presión de hinchamiento de muestra remoldeada sometida a tratamiento termo-hidráulico durante diferentes tiempos respecto a la de muestra no tratada de la misma densidad (ajuste FEBEX).....	59
Figura 38: Desviación de los valores de presión de hinchamiento de muestra proveniente de ensayos termo-hidráulicos de diferente duración, remoldeada y compactada a densidad seca de 1,60 g/cm ³ , respecto a los valores esperados para muestra no tratada.....	60
Figura 39: Valores de permeabilidad obtenidos en muestra sometida a tratamiento termo-hidráulico durante diferentes tiempos en función de la distancia al calentador.....	61
Figura 40: Valores de permeabilidad obtenidos en muestra no tratada (ajuste FEBEX) y sometida a tratamiento termo-hidráulico durante diferentes tiempos.....	62
Figura 41: Desviación de los valores de permeabilidad de muestra proveniente de ensayos termo-hidráulicos de diferente duración respecto a los valores esperados para muestra no tratada.....	62

Indice de tablas

Tabla I: Composición química del agua granítica utilizada en los ensayos	5
Tabla 2: Características técnicas de los ensayos analizados.....	5
Tabla III: Datos del ensayo FQ1/2	10
Tabla IV: Temperaturas medias en el ensayo FQ1/2.....	11
Tabla V: Humedad y densidad final en diferentes secciones del ensayo FQ1/2	11
Tabla VI: Datos del ensayo FQ1	14
Tabla VII: Temperaturas medias en el ensayo FQ1.....	14
Tabla VIII: Humedad y densidad final en diferentes secciones del ensayo FQ1.....	16
Tabla IX: Datos del ensayo FQ2.....	18
Tabla X: Temperaturas medias en el ensayo FQ2.....	19
Tabla XI: Humedad y densidad final en diferentes secciones del ensayo FQ2.....	21
Tabla XII: Datos de la porosimetría por intrusión de mercurio en la parte superior, media e inferior de varios bloques de bentonita FEBEX no tratada.....	30
Tabla XIII: Distribución orientativa de la porosidad total para la bentonita FEBEX con su humedad higroscópica.....	31
Tabla XIV: Datos porosimétricos de muestras procedentes del ensayo FQ1/2.....	35
Tabla XV: Resultados de los ensayos de hinchamiento bajo carga de 0,5 MPa realizados con muestra proveniente del ensayo FQ1/2 saturada con agua granítica	35
Tabla XVI: Resultados de los ensayos de permeabilidad realizados con muestra proveniente del ensayo FQ1/2 saturada con agua granítica.....	38
Tabla XVII: Resultados de los ensayos de hinchamiento bajo carga de 0,5 MPa realizados con muestra proveniente del ensayo FQ1/2 remoldeada a densidad seca nominal de 1,60 g/cm ³ y saturada con agua granítica.....	39
Tabla XVIII: Resultados de los ensayos de presión de hinchamiento con muestra proveniente del ensayo FQ1/2 remoldeada y saturada con agua destilada.....	41
Tabla XIX: Resultados de los ensayos de presión de hinchamiento con muestra proveniente del ensayo FQ1	43
Tabla XX: Resultados de los ensayos de permeabilidad realizados con muestra proveniente del ensayo FQ1 saturada con agua granítica.....	44
Tabla XXI: Resultados de los ensayos de hinchamiento bajo carga de 0,5 MPa realizados con muestra proveniente del ensayo FQ1 remoldeada a densidad seca nominal de 1,60 g/cm ³ y saturada con agua granítica.....	45
Tabla XXII: Resultados de los ensayos de presión de hinchamiento con muestra proveniente del ensayo FQ1 remoldeada y saturada con agua destilada.....	47
Tabla XXIII: Datos porosimétricos de muestras procedentes del ensayo FQ2	49
Tabla XXIV: Datos porosimétricos de muestras procedentes del ensayo HI2.....	49

Tabla XXV: Resultados de los ensayos de presión de hinchamiento con muestra proveniente del ensayo FQ2 saturada con agua destilada	50
Tabla XXVI: Resultados de los ensayos de permeabilidad realizados con muestra proveniente del ensayo FQ2 saturada con agua granítica.....	52
Tabla XXVII: Resultados de los ensayos de presión de hinchamiento con muestra proveniente del ensayo FQ2 remoldeada y saturada con agua destilada	53
Tabla XXVIII: Valores medios de los datos porosimétricos obtenidos en diferentes ensayos.....	55

1. INTRODUCCIÓN

El propósito del FEBEX (Full-scale Engineered Barriers Experiments) es el estudio del campo próximo (especialmente de la barrera de arcilla) para un almacenamiento de residuos radiactivos de alta actividad (RAA) en roca cristalina. El experimento consta de tres partes principales: 1) un ensayo *in situ*, en condiciones y escala reales; 2) un ensayo en maqueta, a escala casi real; y 3) un conjunto de ensayos experimentales de laboratorio, para complementar la información de los dos ensayos a gran escala. El experimento está basado en el concepto de referencia español en roca cristalina, en que las cápsulas de residuo se emplazan en galerías horizontales rodeadas por una barrera de arcilla formada por bloques fabricados con bentonita compactada a alta densidad (ENRESA 1995).

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.

El comportamiento de un almacenamiento está influido por los cambios que se producen en las propiedades mecánicas, físico-químicas y geoquímicas de las barreras de ingeniería y de la roca del entorno. Estos cambios se generan por los efectos combinados del calor producido por la desintegración del residuo, por el movimiento del agua, y por la composición geoquímica del campo próximo. Los criterios de diseño y los procedimientos de construcción de las barreras de ingeniería también influyen en el comportamiento de un almacenamiento. Por todo ello, para la evaluación del comportamiento, es fundamental la comprensión y el análisis cuantitativo del campo próximo.

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 no 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), es la ejecución de un experimento a gran escala como el FEBEX. Esto requiere 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 ha decidido 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 ha considerado 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 realizará 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 ha considerado, no obstante, que además de los dos ensayos a gran escala es 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 actualmente –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.

in situ se ha elegido el laboratorio gestionado por NAGRA en Grimsel (Suiza), debido a la semejanza de los conceptos de referencia suizo y español, a la experiencia de NAGRA en la planificación y ejecución de experimentos a gran escala y a las condiciones adecuadas del laboratorio. El ensayo en maqueta está siendo realizado en el laboratorio de CIEMAT en Madrid (España). Los ensayos experimentales de laboratorio están siendo realizados en varios centros de investigación españoles.

Los ensayos en celdas grandes forman parte de la programación de ensayos de carácter hidrogeoquímico en celdas termohidráulicas del Proyecto FEBEX. Su objeto es reproducir los procesos que tienen lugar en los ensayos a gran escala. Su diseño está concebido para simular con mayor fidelidad el ensayo en maqueta que se realiza en CIEMAT. Las celdas se han diseñado para reproducir el espesor de la barrera de arcilla (60 cm) con sus discontinuidades, el gradiente térmico impuesto y las condiciones de entrada de agua. Se han fabricado seis celdas, en las que se han realizado ensayos de 0,5, 1 y 2 años de duración. Para cada duración se dispone de dos celdas, que al finalizar el ensayo se destinan a diferentes estudios: las celdas HI se han dedicado a la extracción de aguas intersticiales y las celdas FQ a la comprobación de la variación en parámetros hidráulicos y mecánicos y a estudios detallados en las variaciones geoquímicas, mineralógicas y de

Este informe describe los resultados obtenidos en tres ensayos termo-hidráulicos de tipo FQ de duración 6, 12 y 24 meses (FQ1/2, FQ1 y FQ2, respectivamente). La muestra procedente de cada uno de estos ensayos ha sido caracterizada bajo diferentes puntos de vista: la caracterización geoquímica y de fábrica ha sido llevada a cabo en la Universidad Autónoma de Madrid, y se recoge en un informe específico (Martín & Cuevas 2000); mientras que la determinación de las propiedades hidro-mecánicas de la muestra tratada se ha hecho en CIEMAT, y los resultados obtenidos están contenidos en el presente informe.

2. METODOLOGÍA DE LOS ENSAYOS TERMO-

Los ensayos termo-hidráulicos se han diseñado con el fin de reproducir con fidelidad las condiciones de la barrera de bentonita de una forma controlada y, a la vez, obtener la mayor información posible sobre el estado de la arcilla en cada momento.

Las celdas en las que se aloja la bentonita disponen de un sistema de calefacción en la parte inferior, regulado por un sistema de control, y de un sistema de refrigeración en la parte superior, consistente en la circulación continua de agua a temperatura constante en el interior de una cámara situada por encima de la tapa de la celda. La circulación se fuerza mediante una bomba centrífuga conectada a un depósito de agua a la temperatura deseada. La hidratación se realiza por la parte superior de la celda con agua granítica inyectada a cierta presión. Tres de las celdas disponen de una cámara de muestreo a la entrada del circuito de hidratación. En las otras tres celdas es posible medir el volumen de agua inyectado en función del tiempo, mediante un equipo automático de medida del cambio de volumen. Las celdas están instrumentadas con termopares (en número de 2, 3 ó 5), cuya señal, junto con la proveniente de los equipos de medida de cambio de volumen, es recogida por un equipo de adquisición datos que a su vez está conectado a un PC.

La Figura 1 muestra un esquema del conjunto experimental, cuyas partes se describen en detalle en Villar *et al.* (1998):

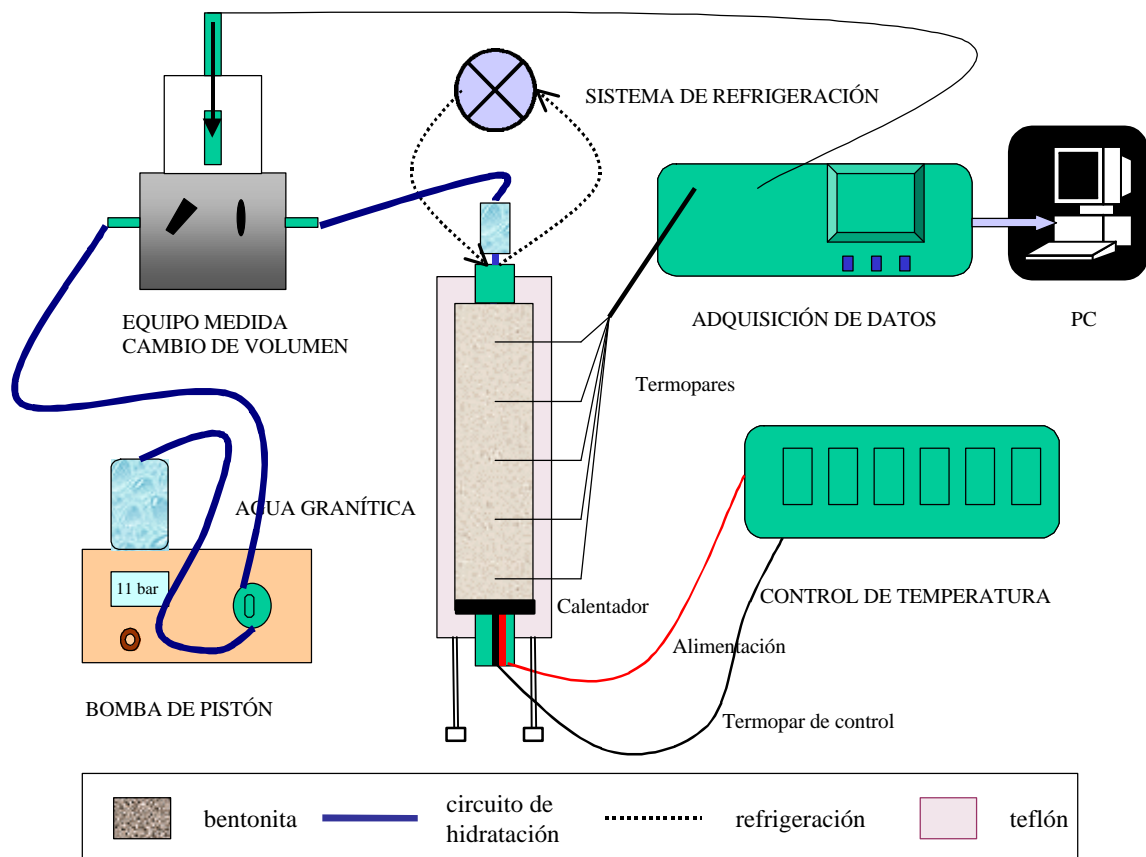


Figura 1: Representación esquemática del diseño experimental para ensayos en celdas grandes

En el interior de las celdas se alojan bloques cilíndricos de bentonita apilados, resultando una altura total igual al espesor de la barrera de arcilla, es decir, 60 cm, pero considerando sólo una dimensión, por lo que el diámetro de los bloques es de sólo 7 cm. Las temperaturas en los dos extremos de la celda se mantienen constantes, y para evitar en lo posible la disipación de calor, el cuerpo de la celda está constituido por piezas acopladas fabricadas en teflón con fibra de vidrio. Para reforzar mecánicamente las paredes de la celda, que han de soportar la presión de hinchamiento de la arcilla, externamente se han rodeado de 3 pares de coquillas de acero inoxidable sujetas con abrazaderas del mismo material. Para contribuir al aislamiento térmico de la celda, ésta se rodea de un material aislante de tipo plástico poroso. La Figura 2 muestra el aspecto de las celdas una vez montadas y en funcionamiento.



Figura 2: Aspecto de las celdas termo-hidráulicas en funcionamiento, las tres primeras con cámara de muestreo en el sistema de hidratación

Se ha utilizado arcilla FEBEX (70-IMA-3-4-0), con su humedad de equilibrio en las condiciones de laboratorio (alrededor del 14 %). Las principales características de esta bentonita se pueden encontrar en ENRESA (1998). Las probetas se han fabricado por compactación uniaxial en una prensa de 50 t hasta densidad seca nominal de $1,65 \text{ g/cm}^3$, pero la densidad no es homogénea dentro de cada probeta, ya que los rozamientos producidos durante la compactación hacen que la densidad en la parte superior sea mayor. Las dimensiones de las probetas resultantes son 10 cm de longitud y 7 cm de diámetro, por lo que son necesarias seis probetas para montar cada celda.

La temperatura de la superficie del calentador se fija en 100 °C, y la temperatura del circuito de refrigeración se fijó en un principio en 30 °C, aunque posteriormente se dejó circular el agua a la temperatura ambiente (20-25 °C), lo que da lugar a que el gradiente térmico sea aproximadamente de 1,3 °C/cm. Para la saturación se ha empleado un agua granítica comercial (Fontvella) inyectada a presión de 1,2 MPa. Es la misma agua utilizada para hidratar el ensayo en maqueta del Proyecto FEBEX, y representa el agua que satura la barrera de bentonita en un almacenamiento tipo. Su composición química se muestra en la siguiente tabla:

Tabla I: Composición química del agua granítica utilizada en los ensayos

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

La siguiente tabla recoge algunas características técnicas de los ensayos analizados en este informe:

Tabla 2: Características técnicas de los ensayos analizados

Celda	Ensayo	Duración	Termopares	c.v./c.m. ¹
CG1	FQ½(1)	6 meses	5	c.v.
CG5	FQ1(1)	12 mese	3	c.m.
CG2	FQ2(1)	24 meses	5	c.v.

¹c.v./c.m.: cambio de volumen o cámara de muestreo

Al finalizar el ensayo termo-hidráulico se procede a su desmontaje y a la extracción de las probetas de arcilla del interior de la celda. Este proceso se realiza de una manera lenta y controlada, procurando evitar cualquier variación del estado de la arcilla, es decir, de su humedad, densidad y consistencia. Según se extraen las probetas de la celda se van cortando rodajas de unos 2,5 cm de espesor, con lo que se obtienen cilindros de esta altura y de 7 cm de diámetro, en total 24 secciones. Las Figura 3 a Figura 6 muestran algunas secuencias del proceso de desmontaje. Las muestras se preservan de diferente forma según el tipo de análisis que esté previsto realizar en ellas. En casi todas las secciones se realiza una determinación de su humedad y densidad en el mismo momento del desmontaje, para lo que se toman 1 ó 2 fragmentos inalterados de entre 8 y 20 cm³. Un pequeño fragmento inalterado de cada sección (unos 5 cm³) se preserva para la determinación de su distribución porosimétrica. Para los ensayos en edómetro y de permeabilidad se toma

muestra de suficiente tamaño, en ocasiones la sección entera, y se conserva envuelta en papel parafinado. Estas secciones se tallan con anillos cortadores para obtener una muestra de las dimensiones apropiadas, que denominamos "muestra intacta", justo en el momento en que se va a realizar el ensayo hidro-mecánico. La muestra sobrante del tallado se recoge, así como toda la que se desmenuza durante el desmontaje del ensayo termo-hidráulico, se deja estabilizar en las condiciones del laboratorio y, tras alcanzar la humedad de equilibrio, se disgrega con mazo de goma y rodillo de madera hasta tamaño de grano inferior a 5 mm. Con la muestra así preparada se realizan las determinaciones sobre muestra remoldeada. El muestreo de los ensayos FQ incluye también la toma de muestras para las determinaciones geoquímicas y de fábrica descritas en Martín & Cuevas 2000.

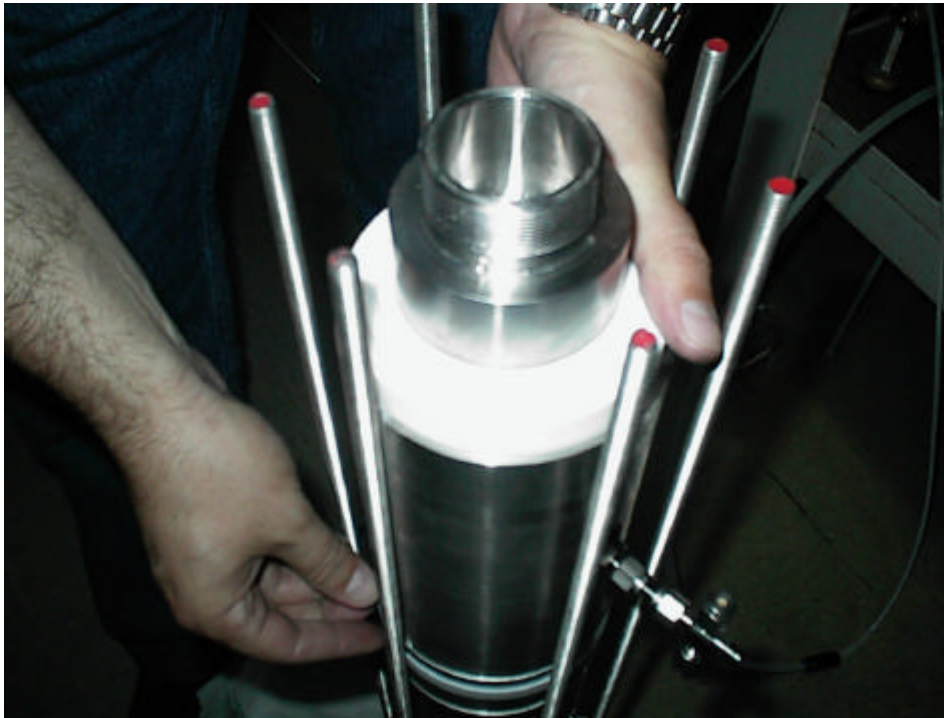


Figura 3: Cámara de refrigeración de la celda tras quitar la brida superior

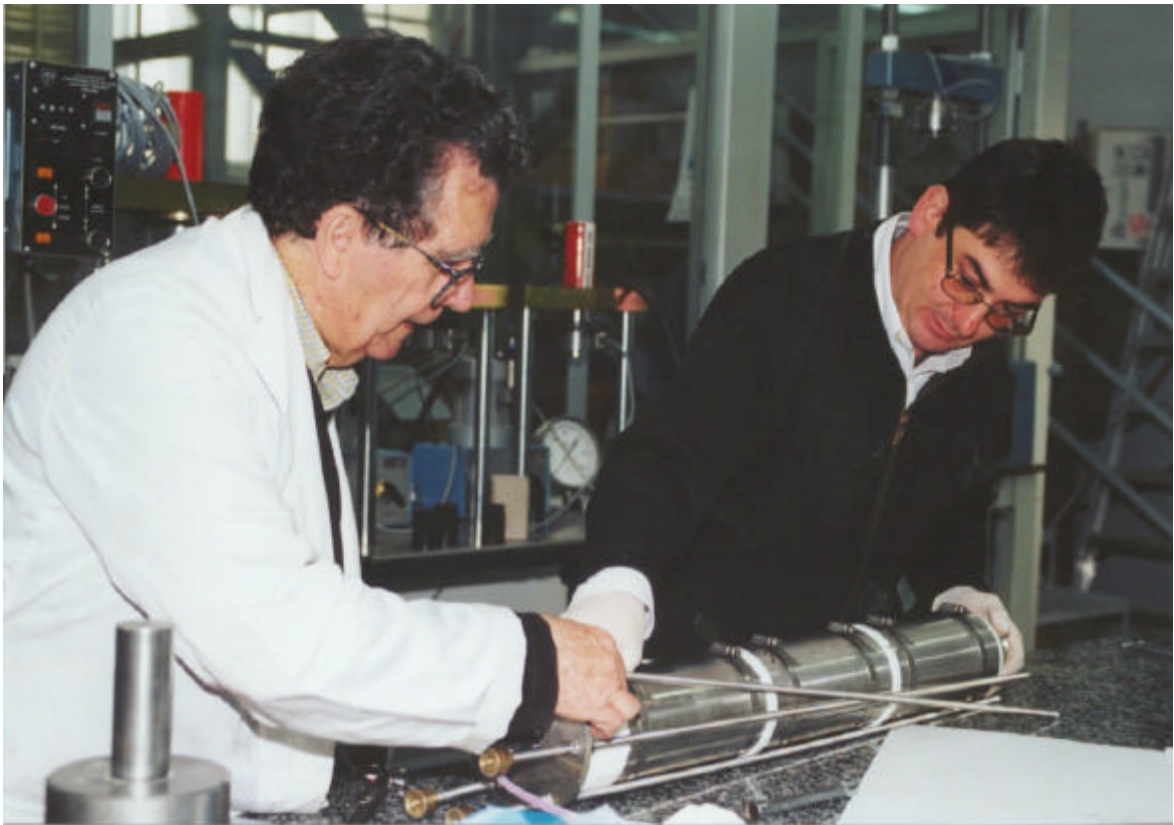


Figura 4: Desmontaje de la brida inferior



Figura 5: Separación de la coquilla de acero inoxidable para iniciar la extracción de la probeta de bentonita

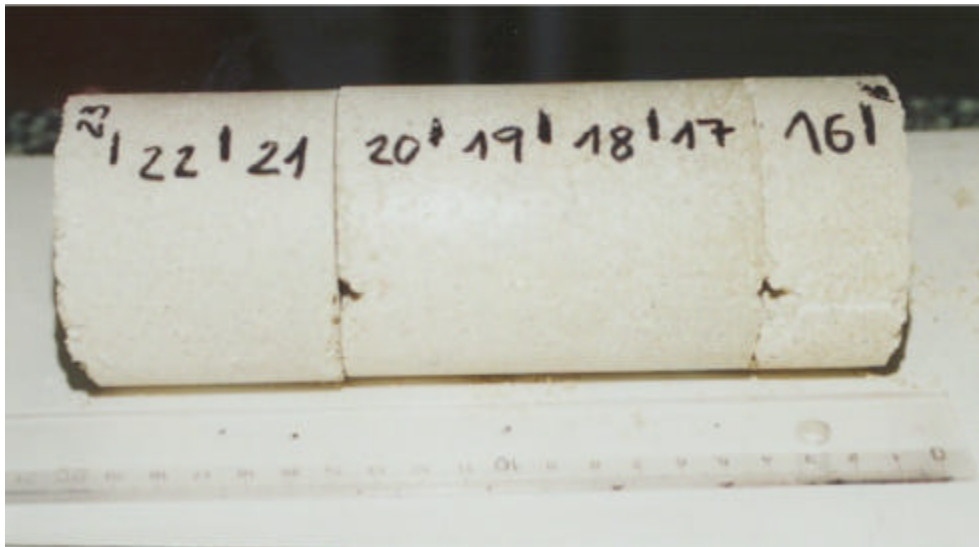


Figura 6: Establecimiento de secciones en probetas ya extraídas

3. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS TERMO-HIDRÁULICOS

En esta sección se describen las características concretas de cada uno de los ensayos termo-hidráulicos realizados, las medidas tomadas durante su desarrollo y las condiciones de la arcilla al acabar el tratamiento termo-hidráulico y antes de realizar cualquier otro tipo de ensayo. Las condiciones de la arcilla al finalizar el ensayo se han descrito mediante su densidad seca y su humedad en diferentes secciones. La posición de estas secciones de muestreo a lo largo de la probeta de arcilla se indica en la Figura 7, en la que se representan también las separaciones entre los 6 bloques apilados. Para la determinación de la densidad seca se ha seguido la Norma UNE 7045 (inmersión en mercurio), y para la determinación de la humedad gravimétrica la Norma UNE 103-300-93 (secado en estufa a

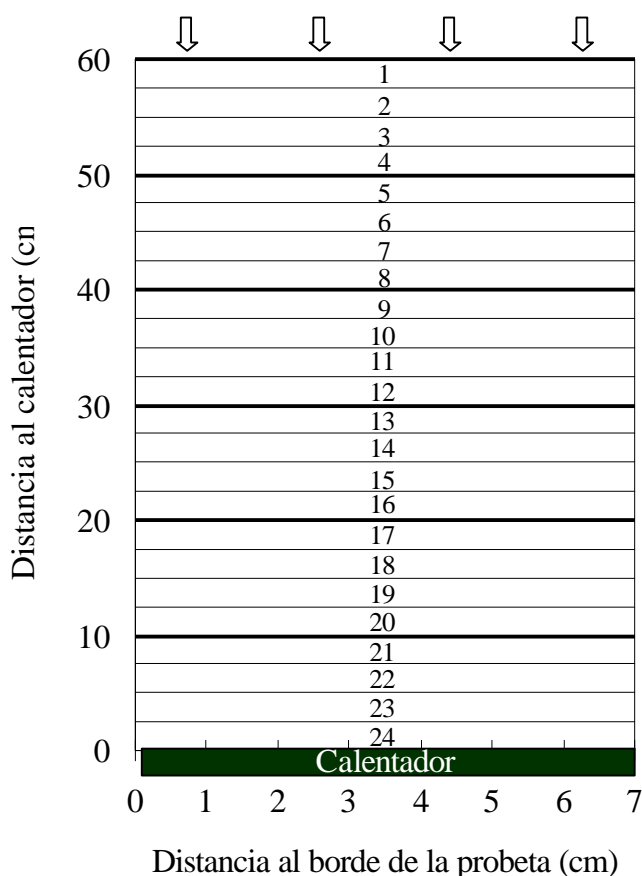


Figura 7: Distribución de las secciones de muestreo al finalizar los ensayos termo-hidráulicos

3.1. 6 MESES: ENSAYO FQ1/2

Las siguientes tablas y figuras resumen las características del ensayo termo-hidráulico FQ1/2 y los resultados obtenidos.

Tabla III: Datos del ensayo FQ1/2

Fecha fabricación:	11/2/98	Presión compactación (MPa):	31
Densidad seca inicial (g/cm³):	1,64	Humedad inicial (%):	13,2
Inicio calentamiento:	1/4/98	Inicio hidratación:	2/4/98
Duración calentamiento (h):	4530	Duración hidratación (h):	4508
Desmontaje:	7/10/98	Duración tratamiento TH (días):	188
Agua tomada¹ (cm³):	171	Humedad final (%):	17,7
Humedad final² (%):	17,8	Densidad seca final² (g/cm³):	1,55

¹ medida del aparato de cambio de volumen

² promedio de los valores obtenidos en las diferentes secciones

La concordancia entre la humedad final obtenida a partir de la medida del volumen de agua que entró en la celda y el valor promedio de las humedades medidas en las diferentes secciones, pone de manifiesto la estanqueidad de la celda.

Las oscilaciones de temperatura que se observan en la Figura 8 reflejan las de la temperatura ambiente.

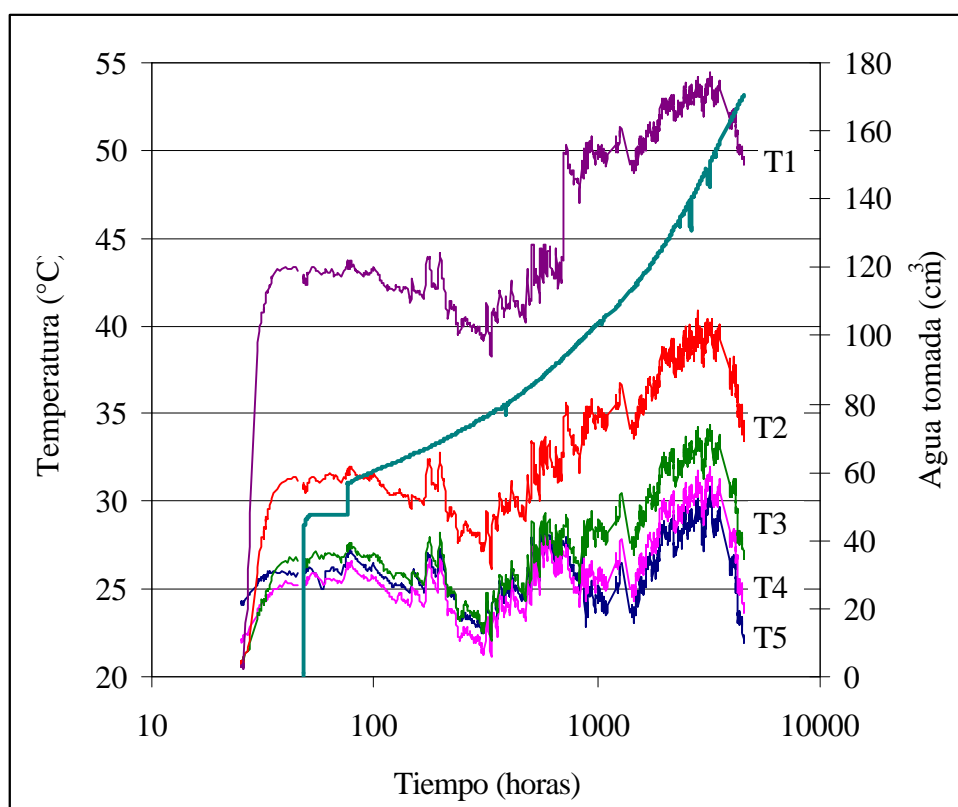


Figura 8: Evolución de temperaturas registradas por los diferentes termopares (T1 a T5) y toma de agua en el ensayo FQ1/2

Tabla IV: Temperaturas medias en el ensayo FQ1/2

Termopar	T1	T2	T3	T4	T5
Distancia al calentador (cm)	10	20	30	40	50
Temperatura (°C)	51,6	37,1	30,8	28,3	27,0

Al realizar el desmontaje se comprobó que ninguna de las probetas había quedado unida a la contigua y no se apreciaron grietas de desecación.

En la Tabla V se recogen los valores finales de densidad y humedad en las diferentes secciones de la probeta. Algunos de estos valores, los marcados con h o p, no se han determinado inmediatamente al acabar el ensayo termo-hidráulico, sino que corresponden a secciones que se preservaron intactas para realización de ensayos hidro-mecánicos. La densidad seca de las secciones h o p se ha calculado a partir de su peso y volumen una vez colocadas en la celda del ensayo hidro-mecánico (permeabilidad o hinchamiento). Se observará que los valores de densidad seca correspondientes a estas secciones suelen ser mayores que los obtenidos mediante inmersión en mercurio de un fragmento de la sección, lo que es debido a que el tallado que se realiza para obtener el fragmento conlleva cierta disminución de densidad. En la tabla se muestra también la humedad de estabilización, que es la que alcanza la muestra remoldeada en equilibrio con las condiciones de humedad relativa y temperatura del laboratorio. La comparación de la humedad de muestras tomadas a diferentes radios (diferente coordenada x) dentro de una misma sección (misma coordenada y) revela que la periferia de las probetas está algo más hidratada que su interior, lo que es debido a que se ha producido flujo preferente de agua entre los bloques de bentonita y la pared de teflón, ya que el encaje entre ambos no es perfecto. Por otra parte, sólo los 2,5 cm más próximos al frente de hidratación tienen un grado de saturación superior al 90 %.

Tabla V: Humedad y densidad final en diferentes secciones del ensayo FQ1/2

Sección	Ensayo ¹	y ² (cm)	x ³ (cm)	w (%)	ρ_a (g/cm ³)	S _r (%)	w ⁴ (%)
1		58,75	1,17	32,2	1,42	96	15,2
2		56,25	1,17	27,6	1,47	89	16,9
2	h	56,25		27,1	1,49	90	
3		53,75	1,17	24,8	1,48	81	
4		51,25	1,17	22,2	1,49	74	15,5
4		51,25	3,50	21,7	1,52	75	
4		51,25	5,83	21,9	1,48	72	
5		48,75	1,17	20,9	1,55	76	
5		48,75	3,50	20,9	1,53	74	
5		48,75	5,83	20,9	1,55	76	
5	h	48,75		21,5	1,63	88	
6	p	46,25		22,8	1,43	69	17,5
7		43,75	3,50	18,5	1,56	68	17,6

Sección	Ensayo ¹	y ² (cm)	x ³ (cm)	w (%)	ρ _d (g/cm ³)	S _r (%)	w ⁴ (%)
8		41,25	1,17	18,0	1,52	63	16,2
8		41,25	3,50	17,8	1,53	63	
8		41,25	5,83	18,0	1,52	63	
9		38,75	1,17	16,6	1,57	62	15,9
9	h	38,75		16,7	1,60	66	
10		36,25	3,50	16,1	1,60	63	15,2
10	h	36,25		15,6	1,76	79	
11	p	33,75		17,1	1,61	68	14,2
12		31,25	1,17	19,0	1,56	70	16,0
12		31,25	3,50	15,9	1,59	61	
12		31,25	5,83	16,1	1,56	59	
13		28,75	1,17	16,0	1,61	64	14,8
13	h	28,75		16,1	1,63	66	
14		26,25	1,17	16,3	1,59	63	15,5
14		26,25	3,50	16,7	1,57	63	
14		26,25	5,83	16,3	1,59	63	
15	p	23,75		15,6	1,68	69	16,8
16		21,25	1,17	16,5	1,52	57	16,3
16		21,25	3,50	15,6	1,56	58	
16		21,25	5,83	16,5	1,52	57	
17		18,75	3,50	15,2	1,63	63	14,7
17	h	18,75		15,6	1,62	63	
18		16,25	3,50	14,9	1,62	60	15,6
19	p	13,75		15,0	1,63	62	14,8
20		11,25	1,17	13,4	1,59	52	14,7
20		11,25	3,50	13,0	1,60	51	
20		11,25	5,83	13,4	1,59	52	
21	p	8,75		12,1	1,67	53	14,9
22-23		5,00	3,50	10,4	1,65	44	14,4
24		1,25	3,50	5,7			13,0

Sección	Ensayo ¹	y ² (cm)	x ³ (cm)	w (%)	ρ_d (g/cm ³)	S _r (%)	w ⁴ (%)
24	h	1,25		6,2	1,69	28	

¹ los datos marcados con h provienen de un ensayo de hinchamiento y los datos marcados con p provienen de un ensayo de permeabilidad, realizados ambos tras el tratamiento termo-hidráulico

² distancia desde el calentador

³ distancia desde el borde de la probeta

⁴ humedad tras estabilización en las condiciones del laboratorio, no corresponde a una coordenada x determinada

En la Figura 9 se aprecia la distribución final de humedad y densidad seca en función de la posición respecto al calentador de las diferentes secciones.

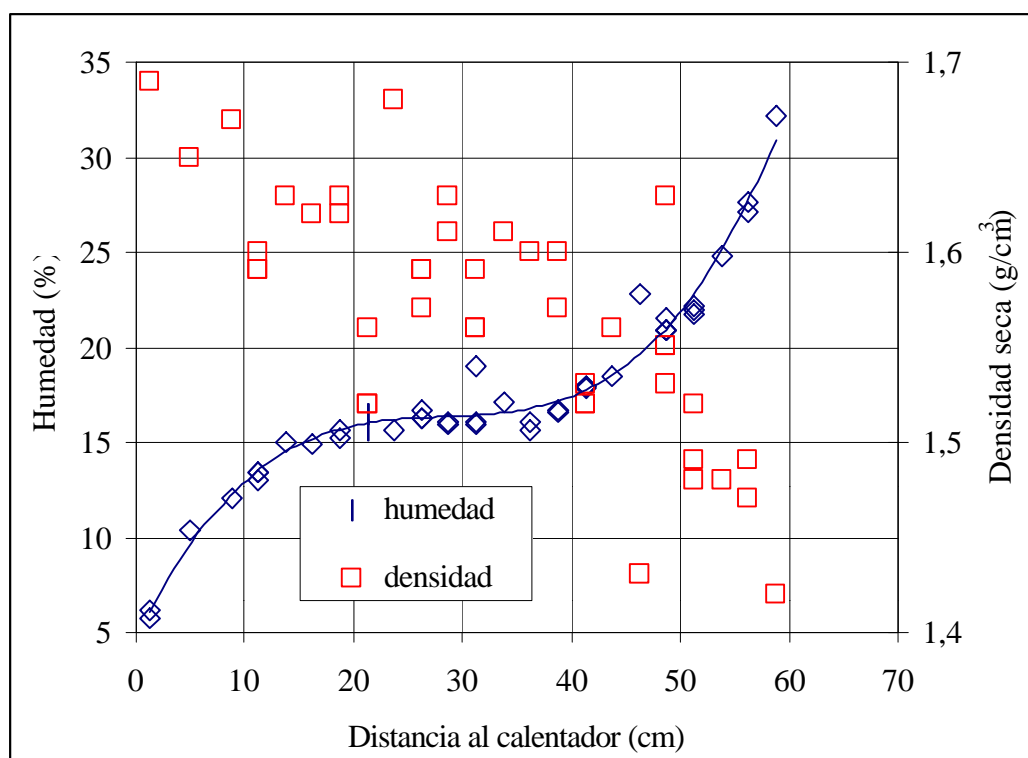


Figura 9: Distribución final de humedad y densidad en el ensayo FQ1/2

3.2. 12 MESES: ENSAYO FQ1

Las siguientes tablas y figuras resumen las características del ensayo termo-hidráulico FQ1/2 y los resultados obtenidos. Este ensayo no disponía de aparato de cambio de volumen para medida del volumen de agua inyectado, por lo que la humedad final está calculada a partir de la diferencia entre el peso inicial y final de la probeta.

Tabla VI: Datos del ensayo FQ1

Fecha fabricación:	24/6/98	Presión compactación (MPa):	42
Densidad seca inicial (g/cm³):	1,67	Humedad inicial (%):	13,8
Inicio calentamiento:	3/7/98	Inicio hidratación:	3/7/98
Duración calentamiento (h):	8877	Duración hidratación (h):	8877
Desmontaje:	8/7/99	Duración tratamiento TH (días):	370
Agua tomada (cm³):		Humedad final¹ (%):	18,2
Humedad final² (%):	19,3	Densidad seca final² (g/cm³):	1,56

¹ calculada a partir de la diferencia entre el peso inicial y final

² promedio de los valores obtenidos en las diferentes secciones

El fuerte descenso de temperaturas observado en la Figura 10 coincide con la disminución de temperaturas en la sala de ensayo durante el invierno.

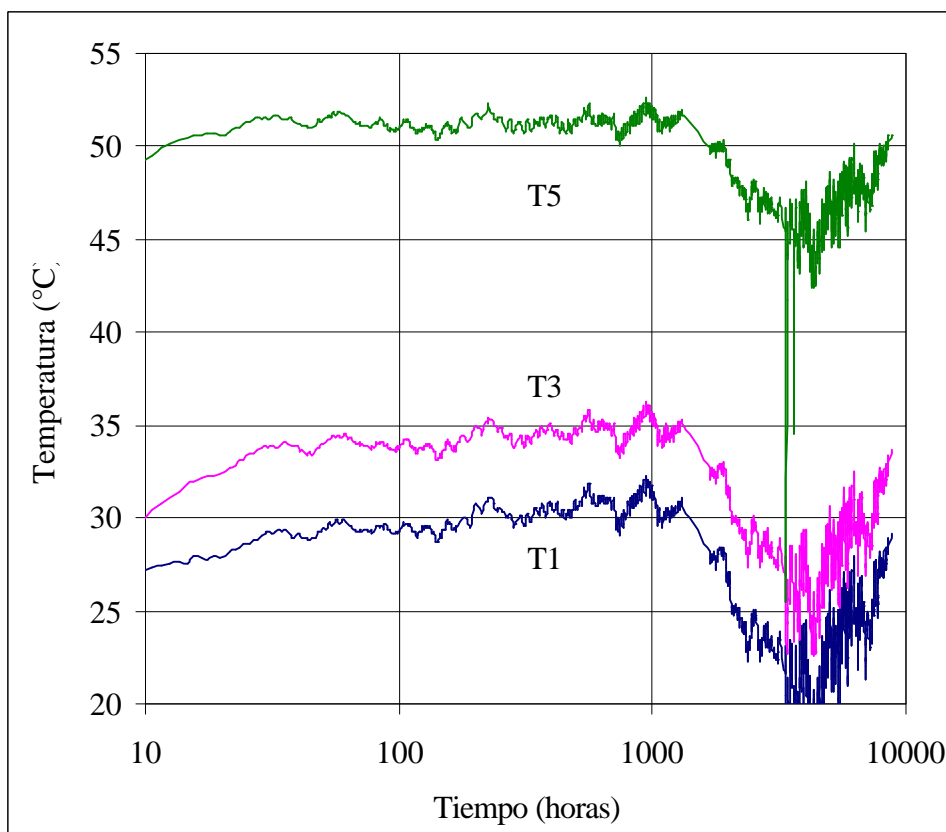


Figura 10: Evolución de temperaturas registradas por los diferentes termopares (T1 a T5) en el ensayo FQ1

Tabla VII: Temperaturas medias en el ensayo FQ1

Termopar	T1	T3	T5
Distancia al calentador (cm)	10	30	50
Temperatura (°C)	47,8	29,6	24,8

La Figura 11 muestra cómo las dos probetas superiores del ensayo se han sellado tras 1 año de tratamiento, no pudiendo distinguirse la separación entre las secciones 4 y 5, que coincidiría con la separación original entre los dos bloques superiores. La separación observada entre las secciones 6 y 7 corresponde a una rotura mecánica originada durante el desmontaje, por coincidir esta zona con la zona de unión entre dos de los cuerpos de teflón de la celda. Al realizar el desmontaje se comprobó también que no había grietas de desecación en las secciones próximas al calentador.



Figura 11: Aspecto del sellado de las dos probetas superiores del ensayo FQ1 (entre las secciones 4 y 5). La separación entre las secciones 6 y 7 es debida a rotura mecánica al extraer la probeta

En la Tabla VIII se recogen los valores finales de densidad y humedad en las diferentes secciones de la probeta. Algunos de estos valores, los marcados con h o p, no se han determinado inmediatamente al acabar el ensayo termo-hidráulico, sino que corresponden a secciones que se preservaron intactas para realización de ensayos hidro-mecánicos. La densidad seca de las secciones h o p se ha calculado a partir de su peso y volumen una vez colocadas en la celda del ensayo hidro-mecánico (permeabilidad o hinchamiento) realizado tras el tratamiento termo-hidráulico. Se observará que los valores de densidad seca correspondientes a estas secciones suelen ser mayores que los obtenidos mediante inmersión en mercurio de un fragmento de la sección, lo que es debido a que el tallado que se realiza para obtener el fragmento conlleva cierta disminución de densidad. En la tabla se muestra también la humedad de estabilización, que es la que alcanza la muestra remoldeada en equilibrio con las condiciones de humedad relativa y temperatura del laboratorio. La comparación de la humedad de muestras tomadas a diferentes radios (diferente coordenada x) dentro de una misma sección (misma coordenada y) revela que la parte externa de las probetas está algo más hidratada que su interior, lo que es debido a que se ha producido flujo preferente de agua entre los bloques de bentonita y la pared de teflón, ya que el encaje entre ambos no es perfecto. Por otra parte, sólo los 7,5 cm más próximos al frente de hidratación tienen un grado de saturación superior al 90 %, por lo que el

sellado entre las dos probetas superiores se ha producido para un grado de saturación inferior a este valor.

Tabla VIII: Humedad y densidad final en diferentes secciones del ensayo FQ1

Sección	Ensayo ¹	y ² (cm)	x ³ (cm)	w (%)	ρ_d (g/cm ³)	S _r (%)	w ⁴ (%)
1	p	58,75		33,0	1,40	96	13,3
2		56,25	1,17	29,9	1,48	98	15,1
3		53,75	1,17	28,5	1,49	95	13,9
3		53,75	3,50	27,8	1,51	95	
3		53,75	5,83	27,5	1,49	91	
4		51,25	1,17	25,5	1,52	89	
4		51,25	3,50	25,8	1,50	87	
4		51,25	5,83	26,0			
5		48,75	1,17	23,4	1,52	81	16,0
5	h	48,75		20,7	1,50	70	
6		46,25	1,17	22,9			13,1
6	p	46,25		23,4	1,47	76	
7		43,75	1,17	21,1	1,49	70	
7		43,75	3,50	21,1	1,54	76	
8		41,25	1,17	20,9	1,49	69	13,6
8		41,25	3,50	20,2	1,52	70	
8		41,25	5,83	21,3	1,49	71	
9	p	38,75			1,66		15,5
10		36,25	1,17	21,7	1,54	78	
10		36,25	3,50	19,2	1,55	70	
11		33,75	3,50				
12		31,25	1,17	18,1	1,53	64	
12		31,25	3,50	16,1	1,70	74	
13		28,75	1,17	17,8	1,59	69	12,2
13		28,75	3,50	17,5	1,57	66	
13		28,75	5,83	17,9	1,57	67	
14	p	26,25			1,40		14,4
15		23,75	1,17	17,2	1,53	61	12,4
16		21,25	1,17	17,6	1,56	65	
16		21,25	3,50	15,7	1,59	61	

Sección	Ensayo ¹	y ² (cm)	x ³ (cm)	w (%)	ρ_d (g/cm ³)	S _r (%)	w ⁴ (%)
16		21,25	5,83	16,2	1,55	59	
17		18,75	3,50	15,5	1,65	66	12,6
17	h	18,75		16,0	1,58	61	
18		16,25	1,17	15,0	1,64	63	
18		16,25	3,50	14,8	1,61	59	
18		16,25	5,83	14,7	1,62	60	
19	p	13,75		12,4	1,70	57	13,9
20		11,25	1,17	14,3	1,60	56	
20		11,25	3,50	12,9	1,61	51	
21		8,75	1,17	12,2	1,67	53	14,7
21	p	8,75		12,0	1,76	61	
22		6,25	3,50	10,8	1,66	47	13,4
22	h	6,25		10,0	1,69	45	
23		3,75	3,50	8,1	1,66	35	
23-24	p	2,5		8,0	1,71	37	12,7

¹ los datos marcados con h provienen de un ensayo de hinchamiento y los datos marcados con p provienen de un ensayo de permeabilidad, realizados ambos tras el tratamiento termo-hidráulico

² distancia desde el calentador

³ distancia desde el borde de la probeta

⁴ humedad tras estabilización en las condiciones del laboratorio, no corresponde a una coordenada x determinada

En la Figura 12 se aprecia la distribución final de humedad y densidad seca en función de la posición respecto al calentador de las diferentes secciones.

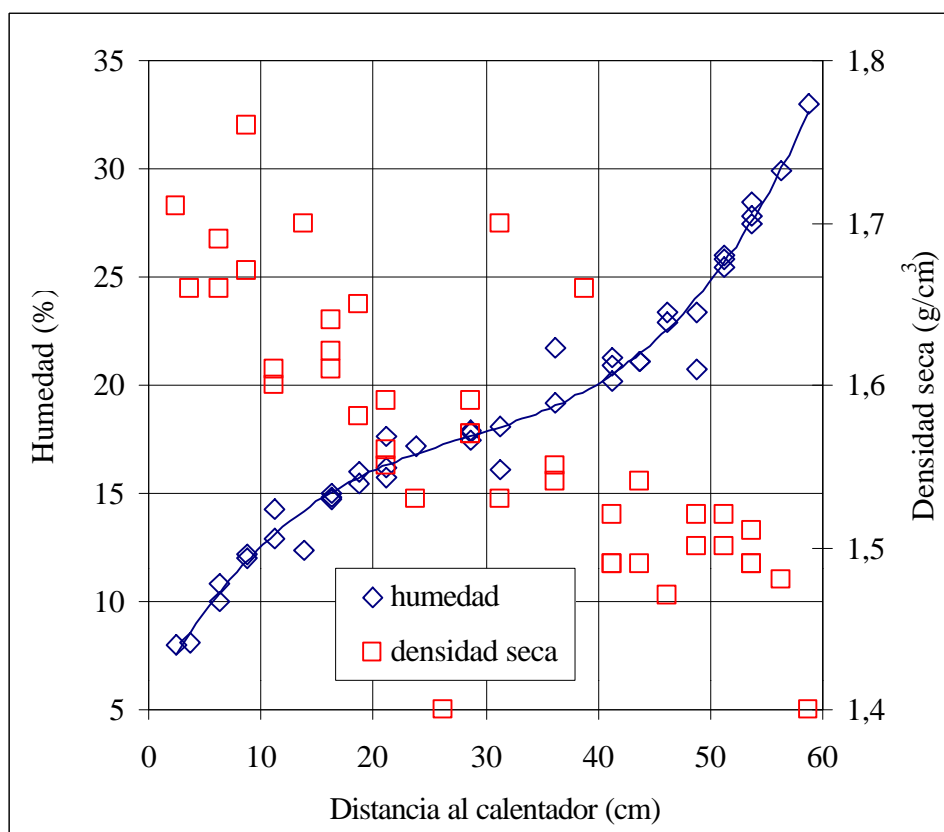


Figura 12: Distribución final de humedad y densidad en el ensayo FQ1

3.3. 24 MESES: ENSAYO FQ2

Las siguientes tablas y figuras resumen las características del ensayo termo-hidráulico FQ2 y los resultados obtenidos.

Tabla IX: Datos del ensayo FQ2

Fecha fabricación:	17/2/98	Presión compactación (MPa):	50
Densidad seca inicial (g/cm³):	1,66	Humedad inicial (%):	13,2
Inicio calentamiento:	1/4/98	Inicio hidratación:	2/4/98
Duración calentamiento (h):	18305	Duración hidratación (h):	18282
Desmontaje:	3/5/00	Duración tratamiento TH (días):	762
Agua tomada¹ (cm³):	280	Humedad final² (%):	19,4
Humedad final³ (%):	20,5	Densidad seca final³ (g/cm³):	1,54

¹ medida del aparato de cambio de volumen

² calculada a partir de la diferencia entre el peso inicial y final

³ promedio de los valores obtenidos en las diferentes secciones

En el ensayo FQ2 hubo una fuga en el circuito de hidratación durante aproximadamente las 1000 primeras horas. Si se atribuye una toma de agua para el ensayo FQ2 análoga a la del ensayo FQ1/2 para este período de tiempo (unos 113 cm³ en 1400 horas), y a continuación se prosigue con la toma de agua registrada por el cambio de volumen para el

ensayo FQ2, se obtiene la curva corregida que se representa en la Figura 13. Esta curva se solapa perfectamente con la obtenida en el ensayo FQ1/2 para los mismos tiempos (hasta 4500 horas). De esta manera se obtiene una toma final de agua de 280 cm³ en los dos años, con lo que la humedad final sería de 20,6 %, muy próxima al valor medio determinado por pesada y por secciones. Esto permite confirmar la estanqueidad de la celda hasta el final del ensayo. En esta figura se aprecian también las oscilaciones estacionales de temperatura registradas por los termopares.

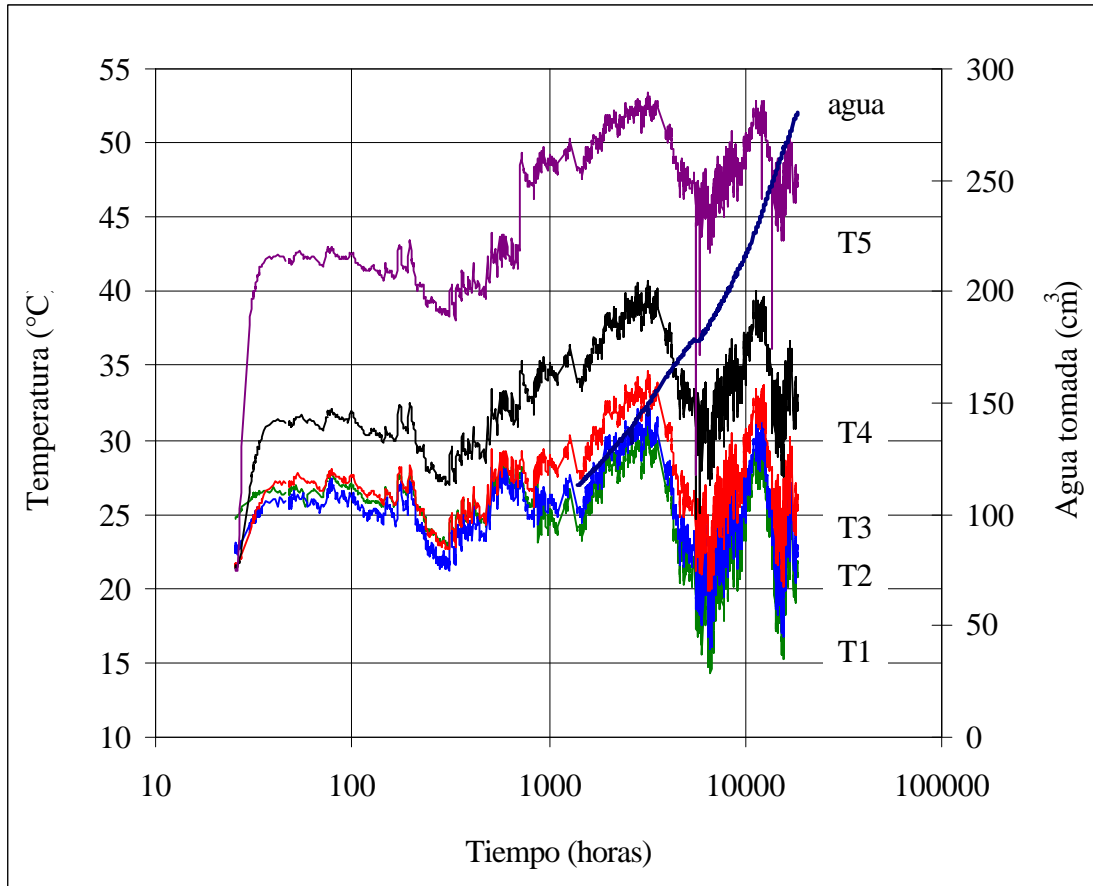


Figura 13: Evolución de temperaturas registradas por los diferentes termopares (T1 a T5) y toma de agua en el ensayo FQ2

Tabla X: Temperaturas medias en el ensayo FQ2

Termopar	T1	T2	T3	T4	T5
Distancia al calentador (cm)	10	20	30	40	50
Temperatura (°C)	48,8	34,7	28,1	25,3	24,0

Tras los 2 años de tratamiento las dos probetas superiores del ensayo se han sellado, no pudiendo distinguirse la separación entre las secciones 4 y 5, que coincidiría con la separación original entre los dos bloques superiores. Sin embargo, como se muestra en la Figura 14, las probetas 2 y 3 no se han llegado a sellar, manteniéndose la separación entre las secciones 7 y 8, a 20 cm del frente de hidratación. Al realizar el desmontaje se comprobó también que no había grietas de desecación en las secciones próximas al

calentador, lo que se aprecia en la Figura 15, donde sólo se observa el desmoronamiento mecánico de los bordes debido al proceso de extracción.



Figura 14: Aspecto de un fragmento de la probeta 2 (sección 7), probeta 3 (secciones 8 a 12) y un fragmento de la probeta 4 (secciones 13 a 15) tras el desmontaje del ensayo FQ2.



Figura 15: Aspecto de la bentonita en contacto con el calentador al desmontar el ensayo FQ2

En la Tabla XI se recogen los valores finales de densidad y humedad en las diferentes secciones de la probeta. Algunos de estos valores, los marcados con h o p, no se han determinado inmediatamente al acabar el ensayo termo-hidráulico, sino que corresponden a secciones que se preservaron intactas para realización de ensayos hidro-mecánicos. La densidad seca de las secciones h o p se ha calculado a partir de su peso y volumen una vez colocadas en la celda de ensayo. Se observará que los valores de densidad seca correspondientes a estas secciones suelen ser mayores que los obtenidos mediante inmersión en mercurio de un fragmento de la sección, lo que es debido a que el tallado que se realiza para obtener el fragmento conlleva cierta disminución de densidad. En la tabla se muestra también la humedad de estabilización, que es la que alcanza la muestra remoldeada en equilibrio con las condiciones de humedad relativa y temperatura del laboratorio. La comparación de la humedad de muestras tomadas a diferentes radios (diferente coordenada x) dentro de una misma sección (misma coordenada y) revela que la parte externa de las probetas está algo más hidratada que su interior, lo que es debido a que se ha producido flujo preferente de agua entre los bloques de bentonita y la pared de teflón, ya que el encaje entre ambos no es perfecto. Por otra parte, sólo los 10 cm más próximos al frente de hidratación tienen un grado de saturación superior al 90 %.

Tabla XI: Humedad y densidad final en diferentes secciones del ensayo FQ2

Sección	Ensayo ¹	y ² (cm)	x ³ (cm)	w (%)	ρ_d (g/cm ³)	S _r (%)	w ⁴ (%)
1		58,75	1,17	33,2	1,42	99	16,3
1	p	58,75		33,0	1,41	97	
2		56,25	1,17	30,4	1,46	97	12,3
2		56,25	3,50	31,1	1,46	99	
2	h	56,25		29,7	1,46	94	
3		53,75	1,17	30,4	1,47	98	14,8
3	h	53,75		27,2	1,51	93	
4		51,25	1,17	29,4	1,46	93	16,7
4		51,25	3,50	28,9	1,46	92	
4		51,25	5,83	28,2	1,48	92	
5		49,75	1,17	26,7	1,49	89	
5		49,75	3,50	25,8	1,50	87	
5	h	49,75		24,0	1,56	89	
6		46,25	1,17	25,4	1,50	86	16,7
6	p	46,25		26,5	1,46	84	
7		43,75	1,17	24,5	1,50	83	
7		43,75	3,50	23,7	1,52	82	
7		43,75	5,83	23,9	1,51	82	
8		41,25	1,17	22,9	1,47	74	
8		41,25	3,50	22,8	1,51	78	

Sección	Ensayo ¹	y ² (cm)	x ³ (cm)	w (%)	ρ_d (g/cm ³)	S _r (%)	w ⁴ (%)
8		41,25	5,83	22,5	1,47	73	
9		38,75	1,17	21,7	1,54	78	15,7
9		38,75	3,50	21,6	1,50	73	
10		36,25	1,17	20,2	1,53	71	15,3
10	p	36,25		22,7	1,59	88	
11		33,75	1,17	19,3	1,51	66	16,6
11	h	33,75		18,6	1,60	73	
12		31,25	1,17	19,6	1,52	68	16,2
12		31,25	3,50	19,6	1,51	67	
12		31,25	5,83	19,1	1,50	64	
13		28,75	1,17	18,9	1,56	70	15,6
13	h	28,75		17,0	1,66	73	
14		26,25	1,17	17,5	1,57	66	16,1
14		26,25	3,50	18,1	1,57	68	
15		23,75	1,17	16,9	1,55	62	15,6
15	h	23,75		17,6	1,57	66	
16	h	21,25		21,5	1,58	82	11,6
17		18,75	1,17	15,9	1,62	64	15,2
17		18,75	3,50	14,4	1,64	60	
18		16,25	1,17	13,7	1,65	58	14,0
18	h	16,25		12,5	1,60	49	
19		13,75	1,17	14,1	1,65	60	15,6
19		13,75	3,50	13,6	1,64	57	
20		11,25	1,17	12,5	1,66	54	16,0
20		11,25	3,50	12,6	1,65	53	
21		8,75	1,17	11,9	1,69	54	14,9
21		8,75	3,50	12,2	1,66	53	
22		6,25	1,17	11,1	1,64	46	
24		1,25	1,17	5,8	1,67	25	10,6

¹ los datos marcados con h provienen de un ensayo de hinchamiento y los datos marcados con p provienen de un ensayo de permeabilidad, realizados ambos tras el tratamiento termo-hidráulico

² distancia desde el calentador

³ distancia desde el borde de la probeta

⁴ humedad tras estabilización en las condiciones del laboratorio, no corresponde a una coordenada x determinada

En la Figura 16 se aprecia la distribución final de humedad y densidad seca en función de la posición respecto al calentador de las diferentes secciones.

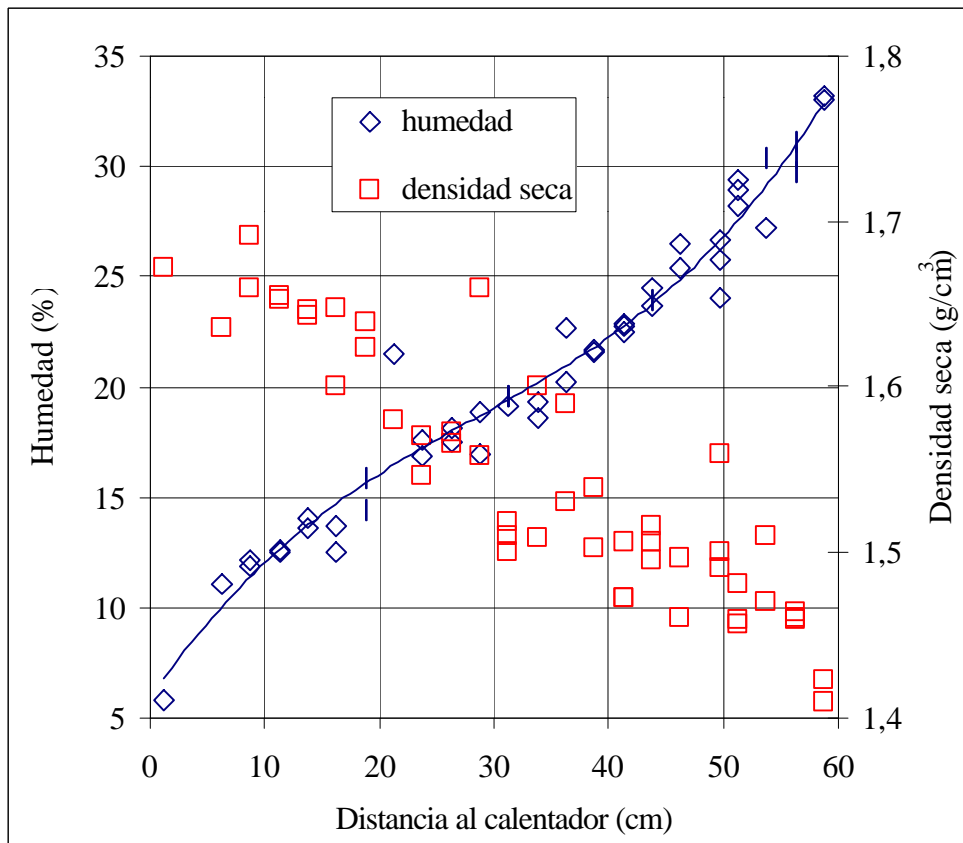


Figura 16: Distribución final de humedad y densidad en el ensayo FQ2

3.4. COMPARACIÓN ENTRE LOS DIFERENTES ENSAYOS

En la Figura 17 se representan los valores medios de las temperaturas registradas por cada termopar en el período de tiempo comprendido entre las 1000 horas después del comienzo del ensayo y el final de éste. Especialmente para las zonas más húmedas de la probeta, es decir, los 20 cm más próximos al frente de hidratación, se observa la disminución de temperatura a medida que aumenta la saturación (ensayos más largos), debida a la mayor efectividad en la disipación del calor de la muestra húmeda.

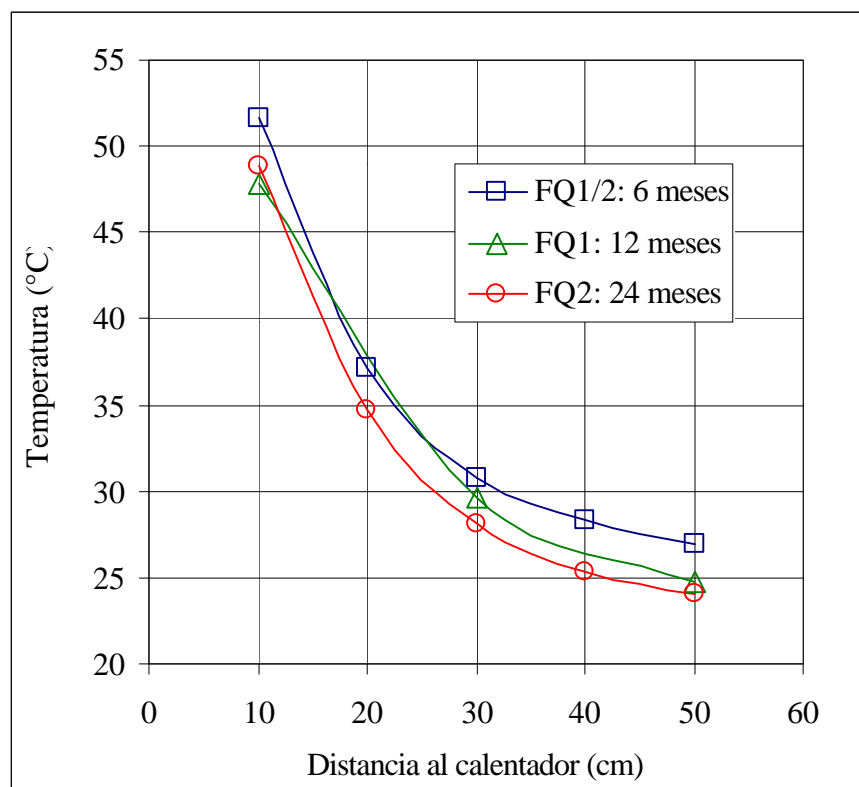


Figura 17: Temperaturas medias en diferentes posiciones para ensayos de diferente duración

En la Figura 18 se observa la notable variación de temperaturas registradas por los termopares a lo largo del año como respuesta a los cambios estacionales. Por este motivo, se han comparado las temperaturas de los diferentes ensayos para una misma fecha, independientemente del tiempo transcurrido desde el inicio de cada ensayo. Para mayor claridad de la figura se han utilizado los valores medios de intervalos de 1000 horas. Al comparar las temperaturas de la bentonita para una misma fecha en los diferentes ensayos, queda claro que las temperaturas del ensayo FQ1 en los 30 cm más próximos al frente de hidratación (termopares T3 y T5) son superiores unos 2 °C a las temperaturas de la bentonita en la misma posición en el ensayo FQ2. Esto podría deberse a la mayor humedad de la bentonita del ensayo FQ2, que comenzó 3 meses antes. La humedad aumenta la conductividad térmica de la bentonita, con lo que se favorece la disipación de calor. En las proximidades del calentador no se ha dejado sentir la influencia de la hidratación en ninguno de los ensayos, por lo que tampoco se aprecia repercusión en la temperatura (termopar T1), que es análoga en los tres ensayos.

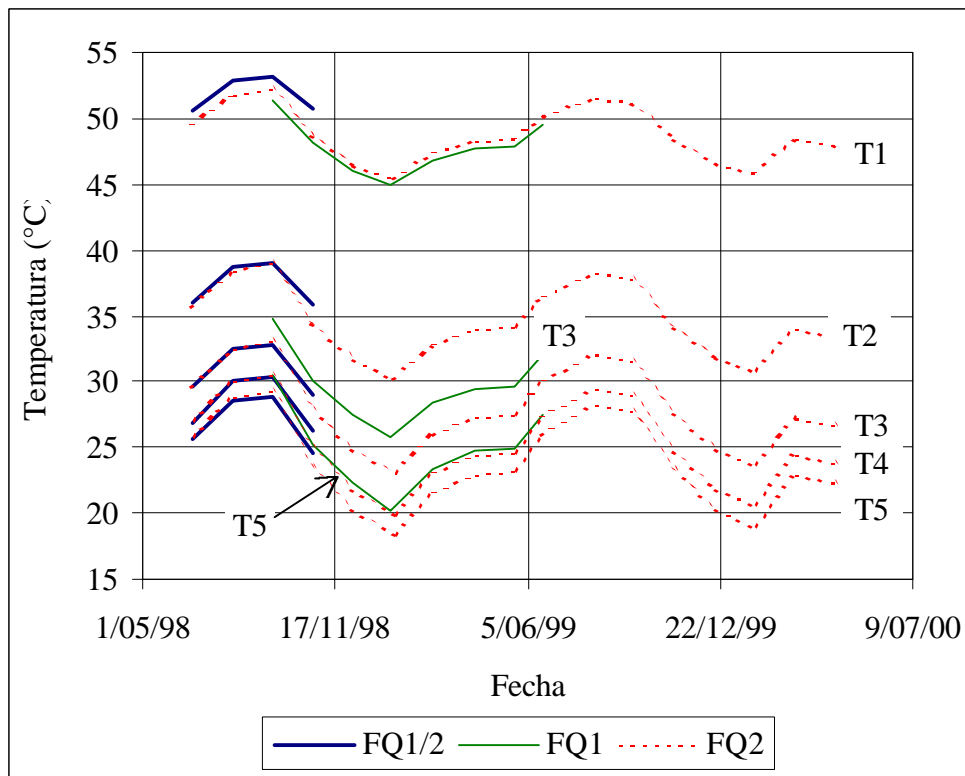


Figura 18: Valores medios para intervalos de 1000 horas de las temperaturas registradas por los termopares (T1 a T5) en ensayos de diferente duración

La distribución de humedad de la arcilla en función de la distancia al calentador se ajusta a un polinomio de tercer grado, según se muestra en la Figura 19. Los parámetros de este polinomio varían en función de la duración del ensayo. La disminución de humedad por efecto de la temperatura es análoga en los tres ensayos, lo que indica que la desecación se produce rápidamente y sólo afecta a los 20 cm más próximos al calentador. En el ensayo de 6 meses hay una zona central, entre 20 y 40 cm, en la que no se modifica la humedad inicial. El efecto del frente de hidratación, que sólo llega hasta los primeros 20 cm a los 6 meses, es apreciable ya hasta los 40 cm a los 12 meses; y en los 12 meses siguientes (ensayo FQ2), se produce fundamentalmente un aumento de humedad sólo hasta esa distancia, sin que los 20 cm más cercanos al calentador registren modificación de humedad, probablemente porque en esta zona predomina todavía el efecto térmico. La disminución de humedad y el aumento de densidad seca registrados en los 20 cm más próximos al calentador ocasionarían una disminución de la permeabilidad y, por tanto, una ralentización de la cinética de hidratación en esta zona, que podría verse compensada en parte por el aumento de succión debido a la desecación.

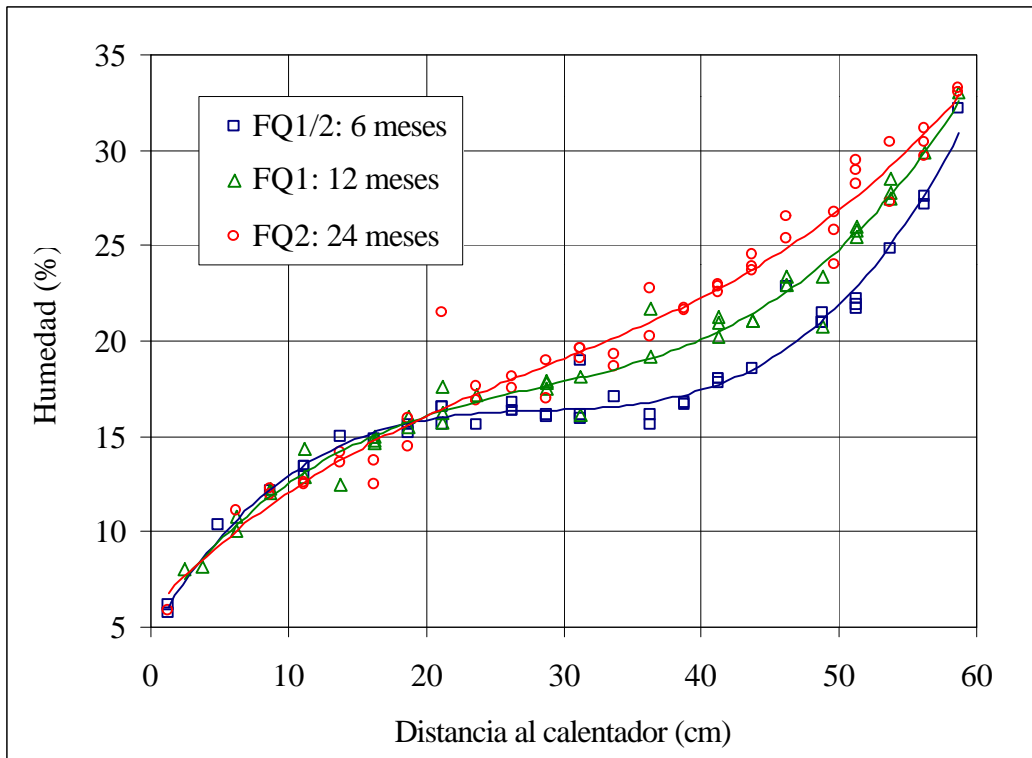


Figura 19: Distribución final de humedad en ensayos de diferente duración

La densidad seca disminuye hacia el frente de hidratación, con una tendencia aproximadamente lineal. En la zona afectada por el frente de hidratación, las densidades disminuyen por debajo del valor inicial, debido a la expansión ocasionada por la saturación. Por el contrario, cerca del calentador, la densidad seca se incrementa, debido a la retracción de volumen que ocasiona la desecación. A pesar de la dispersión de los datos -debida al método de determinación y a las diferencias en la densidad seca inicial dentro de una misma probeta- se observa que las densidades alcanzadas cerca del frente de hidratación son menores en los ensayos de mayor duración, debido a que su saturación, y por lo tanto hinchamiento, es mayor. Esta diferencia se aprecia a partir de alejarnos 20 cm del calentador. Cerca del calentador, las densidades de los diferentes ensayos se igualan, como sucede con las humedades y los grados de saturación, aunque la densidad seca tiende a ser algo menor en el ensayo de menor duración, quizá porque su densidad inicial era algo menor.

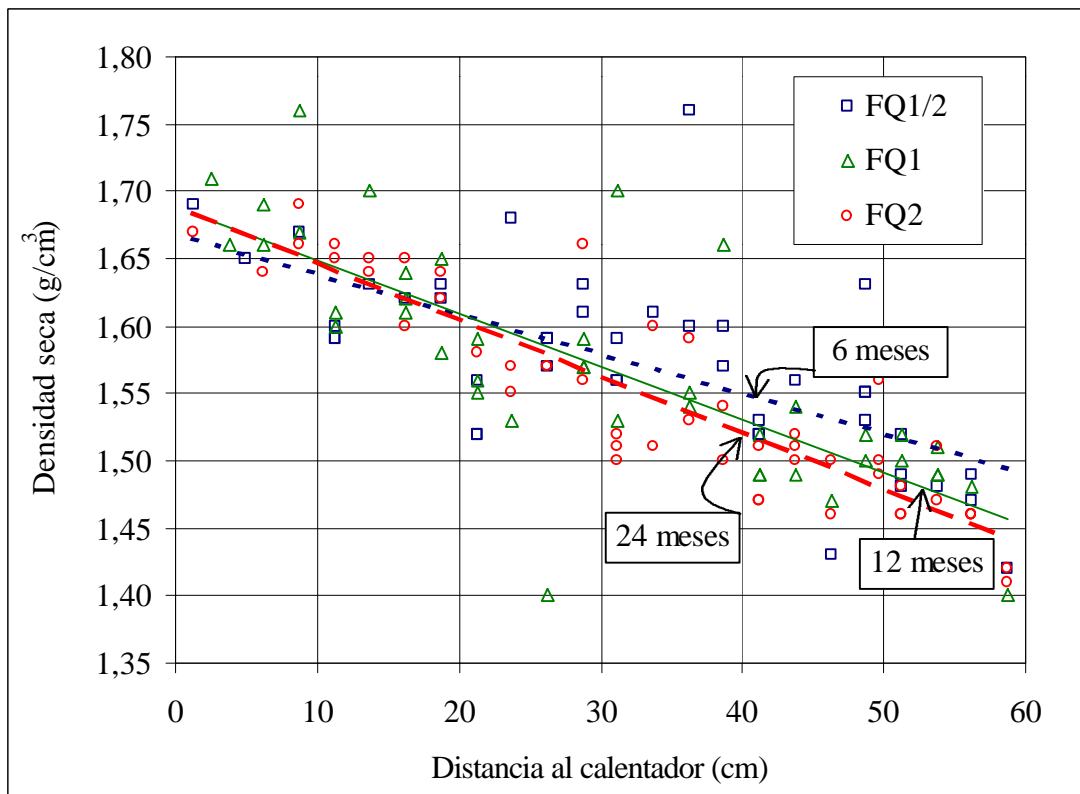


Figura 20: Distribución final de densidad en ensayos de diferente duración

Por otra parte, la comparación entre los valores iniciales y finales de densidad seca global, permite constatar que, a pesar de que hay cierta disparidad en la densidad seca inicial de la bentonita, su disminución durante el ensayo se incrementa con el tiempo. Así, durante el ensayo de 6 meses de duración, la densidad seca disminuye un 5,5 %, durante el de 12 meses un 6,6 %, y durante el de 24 meses un 7,2 %. Esta disminución de densidad es debida al hinchamiento de la arcilla, que rellena la holgura inicial con las paredes de la celda, llegando incluso a deformarla, ya que es de teflón. Cuanto más largo es el ensayo mayor es la humedad que alcanza la arcilla, y por tanto la presión de hinchamiento que desarrolla, con lo que la celda se deforma más y la densidad puede disminuir. Por este motivo, la disminución de densidad es más acusada en las secciones más hidratadas.

La distribución de los grados de saturación sigue pautas análogas a las de la humedad, ajustándose la relación entre distancia al calentador y grado de saturación a un polinomio de tercer grado. Se observa que, debido a la disminución de densidad seca, sólo se ha alcanzado un grado de saturación próximo al 100 % en los 5 cm primeros de los ensayos de 12 y 24 meses de duración. En las proximidades del calentador, el grado de saturación disminuye desde el 55-60 % inicial hasta valores en torno al 25 %.

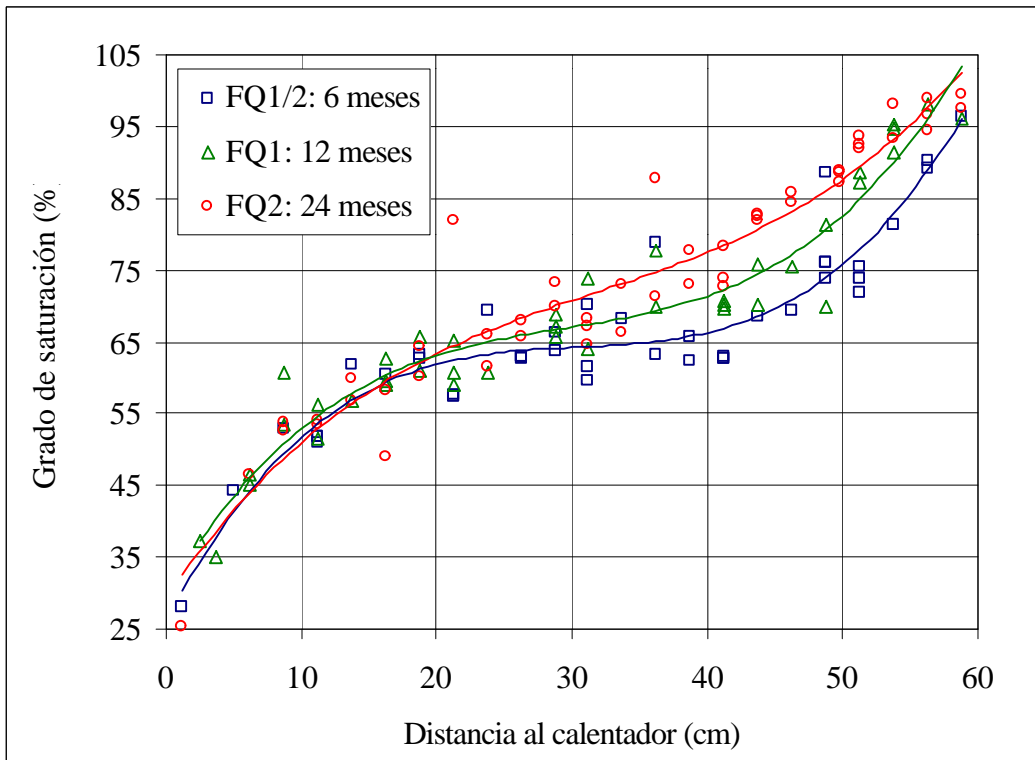


Figura 21: Distribución final de grados de saturación en ensayos de diferente duración

Tabla XII: Datos de la porosimetría por intrusión de mercurio en la parte superior, media e inferior de varios bloques de bentonita FEBEX no tratada

	SUPERIOR	MEDIA	INFERIOR	TOTAL
Nº 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
e_1	0,593±0,110	0,570±0,033	0,640±0,281	0,599±0,168
e_2	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

e_1 : índice de poros medido experimentalmente por inmersión en mercurio (Norma UNE 7045);
 e_2 : índice de poros calculado de acuerdo a la intrusión de mercurio en el porosímetro; % 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; moda de poros grandes, medios o pequeños (μm); coef. unif.: coeficiente de uniformidad de poros ϕ_{40}/ϕ_{80} .

El método de intrusión de mercurio sólo permite acceder a la macroposidad y a parte de los mesoporos. De hecho, 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 XIII. 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 XII se aprecia también que es bajo el coeficiente de uniformidad, puesto que existe un claro predominio de los poros pequeños.

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

4.2. PERMEABILIDAD

Las determinaciones de conductividad hidráulica se han realizado según el procedimiento descrito en Villar (1997). Durante la determinación la muestra permanece en una celda cilíndrica de acero inoxidable de 5,0 cm de diámetro y 2,5 cm de altura. Antes de realizar la medida las muestras se saturan inyectando agua granítica a presión de 0,6 MPa por su parte superior e inferior, durante un tiempo entre una semana y un mes, dependiendo de la densidad de la pastilla. A continuación se aplica un gradiente hidráulico, mediante aumento de la presión de inyección en la base de la muestra, y se mide el volumen de agua que atraviesa la pastilla en función del tiempo. El coeficiente de permeabilidad se calcula aplicando la ley de Darcy.

La conductividad hidráulica al agua destilada de la bentonita FEBEX se relaciona con la densidad seca de forma exponencial, pudiendo distinguirse dos ajustes diferentes según el intervalo de densidad:

para densidades secas inferiores a 1,47 g/cm³:

$$\log k_{wt} = -6,00 \rho_d - 4,09 \quad (r^2 = 0,97, 8 \text{ puntos}) \quad [1]$$

para densidades secas superiores a 1,47 g/cm³:

$$\log k_{wt} = -2,96 \rho_d - 8,57 \quad (r^2 = 0,70, 26 \text{ puntos}) \quad [2]$$

donde k_{wt} , es la conductividad hidráulica teórica en m/s y ρ_d es la densidad seca en g/cm³. La variación de los valores experimentales respecto a estos ajustes es más pequeña para las densidades bajas que para las altas, con un promedio -en valor absoluto- del 30 %, lo que debe evaluarse teniendo en cuenta que los valores de permeabilidad son del orden de 10⁻¹³ m/s.

Para cada ensayo de los que se recogen posteriormente en este informe se ha calculado el valor teórico de la permeabilidad según estos ajustes (k_{wt}) y la desviación en porcentaje de este valor teórico respecto al obtenido experimentalmente (k_w): $((k_w - k_{wt})/k_{wt}) \times 100$, de manera que valores de desviación negativos indican que la permeabilidad obtenida es menor que la esperable para muestra no tratada, y viceversa.

No se ha observado una tendencia clara de variación de los valores obtenidos con agua granítica respecto a los obtenidos con agua destilada, por lo que se considera que estos ajustes se pueden utilizar también aunque se trabaje con agua granítica.

4.3. PRESIÓN DE HINCHAMIENTO

La presión de hinchamiento se ha determinado siguiendo el procedimiento descrito en Villar (1996), en equipos edométricos convencionales sobre pastillas compactadas uniaxialmente en el interior del anillo portamuestras hasta diferentes densidades. En todos los casos se ha utilizado la arcilla con su humedad higroscópica. La sección de las pastillas ha sido de 19,63, 11,40 ó 9,98 cm² y la altura de 1,20 cm. La muestra se satura con agua destilada desde la piedra porosa inferior, a la vez que se añaden cargas para evitar su deformación, que se mide con un comparador.

Existe una relación exponencial entre la presión de hinchamiento desarrollada al saturar la muestra con agua destilada ($P_{s,t}$, en MPa) y su densidad seca (ρ_d , en g/cm³):

$$\ln P_{s,t} = 6,77 \rho_d - 9,07 \quad (r^2 = 0,88) \quad [3]$$

La diferencia entre los valores experimentales y este ajuste es en promedio del 25 %. Esta dispersión, mayor para las densidades secas elevadas, es debida tanto a la variabilidad natural de la bentonita como al método de medida que no permite una gran precisión, a lo que se une que los equipos se utilizan en ocasiones al límite de su capacidad, permitiéndose cierta deformación en la muestra a la que el valor de la presión de hinchamiento es muy sensible.

Para cada ensayo de los que se recogen en este informe se ha calculado el valor teórico de la presión de hinchamiento según este ajuste ($P_{s,t}$) y la desviación en porcentaje de este valor teórico respecto al obtenido experimentalmente (P_s): $((P_s - P_{s,t})/P_{s,t}) \times 100$, de manera que valores de desviación negativos indican que la presión de hinchamiento obtenida es menor que la esperable para muestra no tratada, y viceversa.

Los valores obtenidos con agua granítica no difieren mucho de los que se habrían obtenido para las mismas densidades con agua destilada. Aunque se acepta generalmente que la presión de hinchamiento disminuye con el contenido salino de la disolución, para la montmorillonita compactada a alta densidad la influencia de la salinidad del agua en el valor de la presión de hinchamiento es inapreciable, especialmente en el caso de la montmorillonita cálcica (Pusch 1994). Por este motivo se utiliza este ajuste para comparar con los valores obtenidos experimentalmente, independientemente de que la muestra se haya saturado con agua destilada o granítica.

4.4. HINCHAMIENTO BAJO CARGA

Mediante el ensayo de saturación (o hinchamiento) bajo carga se determina la capacidad de deformación del suelo cuando éste se satura sometido a una presión previamente establecida. El ensayo se realiza en el equipo edométrico siguiendo el procedimiento "Hinchamiento bajo carga" (Villar 2000a). La muestra se compacta directamente en un anillo portamuestras que impide su deformación lateral. Se confina la muestra entre dos piedras porosas en la parte inferior y superior y, una vez en el edómetro, se le aplica la carga deseada. A continuación se inunda la celda edométrica, de manera que se produzca la saturación de la muestra a través de la placa porosa inferior. La relación entre el incremento de altura final experimentado por la muestra en equilibrio con la carga aplicada, y su altura inicial, da el valor de la deformación experimentada por el material al saturarse bajo la carga a la que se realizó el ensayo.

Cuando la arcilla FEBEX se satura con agua granítica bajo una carga determinada, la σ , MPa) y deformación (ϵ , %) es de tipo logarítmico, y dependiente de la densidad seca inicial (ρ_d , g/cm³), y se puede expresar mediante la siguiente ecuación:

$$\epsilon = (-6,49 \rho_d + 16,53) \ln \sigma + (-43,59 \rho_d + 58,14) \quad [4]$$

En concreto, para la densidad seca de 1,60 g/cm³, que es a la que se han realizado los ensayos con muestra remoldeada, el mejor ajuste a los datos experimentales sobre muestra no tratada viene dado por la siguiente expresión:

$$\epsilon = 6,88 \ln \sigma - 9,36 \quad [5]$$

Para cada ensayo de hinchamiento bajo carga recogido en este informe se ha calculado el valor teórico de la deformación según estos ajustes y la desviación en porcentaje de este valor teórico respecto al obtenido experimentalmente, de manera que valores de desviación negativos indican que la deformación alcanzada es menor que la esperable para muestra no tratada, y viceversa.

Se ha comprobado que las deformaciones finales no dependen mucho del tipo de agua empleado para saturar, sino de la densidad seca inicial. Sin embargo, entre las muestras de densidad seca inicial 1,60 g/cm³, los valores de deformación obtenidos con agua destilada son algo más altos que los obtenidos con agua granítica.

5. PROPIEDADES HIDRO-MECÁNICAS TRAS TRATAMIENTO TERMO-HIDRÁULICO

Se han determinado diferentes propiedades hidro-mecánicas (presión de hinchamiento, permeabilidad, hinchamiento bajo carga) de la bentonita sometida a los tratamientos termohidráulicos descritos en el capítulo 2. Las determinaciones se han realizado sobre bentonita procedente de distintas secciones de las probetas tratadas (Figura 7), intacta o remoldeada. En el primer caso, la única manipulación que sufre la muestra tras el tratamiento termohidráulico es su tallado a las dimensiones apropiadas mediante un anillo cortador, preservándose la humedad y la densidad que tenían al finalizar el ensayo termohidráulico. Esto da lugar a que las muestras presenten diferentes humedades y densidades secas al comienzo de los ensayos hidro-mecánicos, lo que tiene repercusiones importantes sobre los resultados obtenidos. Para evitar esto, algunas muestras se han dejado estabilizar en las condiciones del laboratorio, con lo que muestras procedentes de diferentes secciones alcanzan humedades similares. Después se han disgregado con mazo de goma y rodillo de madera hasta conseguir que no haya fragmentos de tamaño superior a 5 mm. Con la muestra así preparada –a la que denominamos remoldeada– se fabrican las pastillas para el ensayo hidro-mecánico, mediante compactación uniaxial en el anillo del edómetro o de la celda de permeabilidad hasta densidad seca nominal de $1,60 \text{ g/cm}^3$. De esta manera, pastillas procedentes de distintas secciones tienen la misma densidad seca y humedad al comenzar el ensayo hidro-mecánico.

Los procedimientos empleados para los distintos ensayos hidro-mecánicos son los Procedimientos CIEMAT recogidos en el Manual de Procedimientos del Proyecto FEBEX, que ya se han citado en la sección anterior. En las determinaciones que requieren utilización de agua se han utilizado dos tipos diferentes: destilada y granítica. El agua destilada se ha utilizado por convención y como patrón. El agua granítica es la misma utilizada durante el ensayo termo-hidráulico, cuya composición se mostró en la Tabla I.

5.1. 6 MESES: ENSAYO FQ1/2

5.1.1. Muestra intacta

Los ensayos descritos en esta sección se han realizado con muestra proveniente de las diferentes secciones tras el tratamiento termo-hidráulico. Para cada sección, la densidad seca y humedad alcanzadas al final de este tratamiento son las iniciales del ensayo hidro-mecánico, por lo que las muestras de diferentes secciones del ensayo FQ1/2 presentan condiciones iniciales muy diferentes en los ensayos hidro-mecánicos.

5.1.1.1. Porosimetría

Se ha determinado la distribución porosimétrica por intrusión de mercurio en cuatro muestras después del tratamiento termo-hidráulico. Los datos obtenidos se muestran en la Tabla XIV.

Tabla XIV: Datos porosimétricos de muestras procedentes del ensayo FQ1/2

	(cm)	ρ_d (g/cm ³)	total (%)	grandes (%)	moda grandes (μm)	medios %	moda medios (μm)	pequeñ (%)	moda pequeños (μm)	coef. unif.
3	53,75	1,48	31	30	8	25	1,10	45	0,005	107
4	51,25	1,49	45	37	21	7	0,25	56	0,005	84
6	46,25	1,43	31	29	21	17	0,86	54	0,005	40
22-23	5,00	1,65	51	35	13	17	0,41	53	0,005	175

Posición: distancia al calentador; total: total de poros intruido por mercurio; grandes, medianos o pequeños: (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 intruido; moda de poros grandes, medios o pequeños; coef. unif.: coeficiente de uniformidad de poros ϕ_{40}/ϕ_{80} .

5.1.1.2. Hinchamiento bajo carga

La Tabla XV muestra los resultados de los ensayos de saturación con agua granítica bajo carga de 0,5 MPa. Se indica también la desviación del valor obtenido respecto al valor teórico esperable para una muestra de igual densidad seca pero humedad inicial higroscópica (ec. 4). Las curvas de deformación en función del tiempo para cada ensayo se representan en la Figura 22. Esta figura permite comprobar cómo el desarrollo del hinchamiento es más rápido en las muestras con menor humedad inicial (secciones más próximas al calentador), dada su mayor succión y, por tanto, avidez por el agua.

Tabla XV: Resultados de los ensayos de hinchamiento bajo carga de 0,5 MPa realizados con muestra proveniente del ensayo FQ1/2 saturada con agua granítica

	Posición ¹ (cm)	ρ_{di} (g/cm ³)	w _i (%)	Deformación (%)	Duración (días)	w _f (%)	ρ_{df} (g/cm ³)	Def. teórica (%)	Desviación (%)
2	56,25	1,49	27,1	-8,22	9	39,5	1,38	-11,48	-28
5	48,75	1,63	21,5	-16,74	13	34,0	1,40	-17,01	-2
9	38,75	1,60	16,7	-14,41	9	40,6	1,40	-15,59	-8
10	36,25	1,76	15,6	-19,72	13	37,6	1,47	-22,06	-11
13	28,75	1,63	16,1	-19,54	13	35,1	1,37	-17,05	15
17	18,75	1,62	15,6	-14,01	13	38,1	1,42	-16,61	-16
24	1,25	1,69	6,2	-21,82	21	35,9	1,39	-19,40	12

¹Distancia al calentador

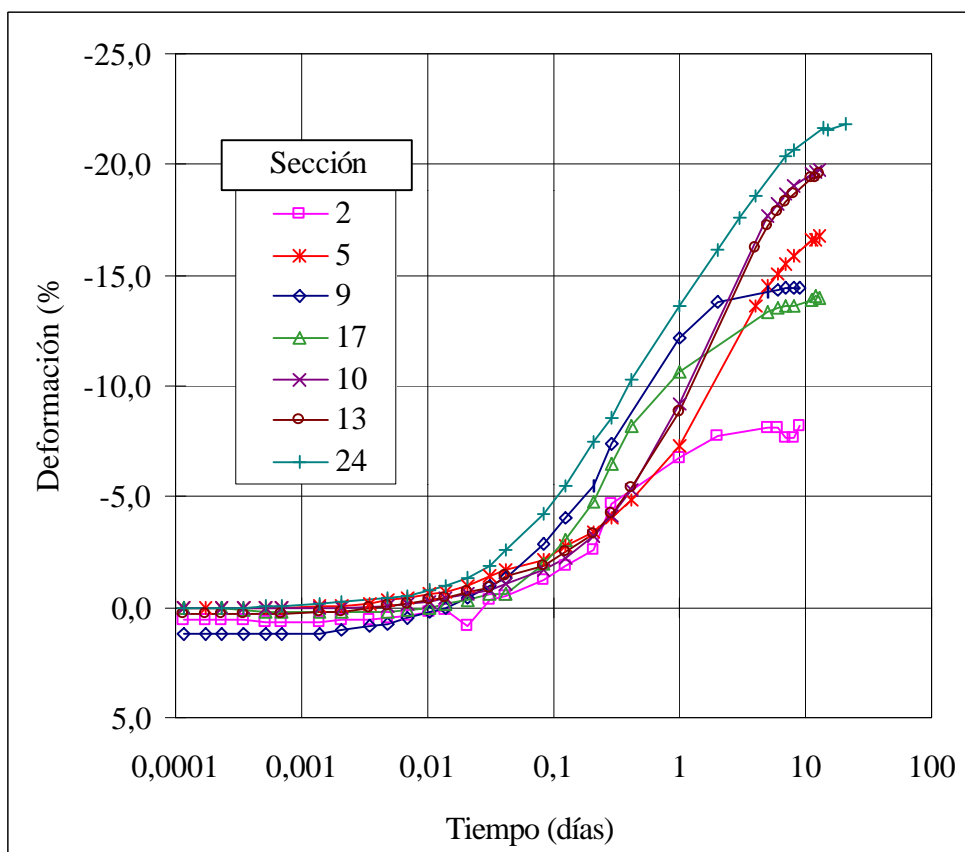


Figura 22: Evolución de la deformación en función del tiempo durante los ensayos de saturación con agua granítica bajo carga de 0,5 MPa realizados con muestra proveniente de diferentes secciones del ensayo FQ1/2

Los valores finales de deformación para cada ensayo se representan en la Figura 23. Se observa una tendencia a que la capacidad de deformación disminuya al alejarnos del calentador. Esto está ligado simplemente al hecho de que la densidad seca disminuye hacia el frente de hidratación, mientras que la humedad aumenta, con la consiguiente reducción de la capacidad de hinchamiento. Por este motivo, si se considera la desviación de los valores obtenidos respecto a los teóricos esperables para muestra no tratada de la misma densidad seca en función de la distancia al calentador (Tabla XV), esta tendencia ya no es tan clara.

En cualquier caso, la capacidad de hinchamiento de la muestra tratada parece disminuir ligeramente respecto a la no tratada, puesto que las desviaciones tienden a ser negativas, con un promedio de -5% . Esto podría ser debido simplemente al hecho de que las muestras tratadas tienen mayor humedad (media de 17%) que las muestras utilizadas en los ensayos con los que se hicieron los ajustes teóricos (que es la higroscópica), y la humedad inicial condiciona la capacidad de hinchamiento. De hecho, las muestras más próximas al calentador, cuyas humedades son más bajas que la higroscópica, registran desviaciones positivas, es decir, mayor capacidad de hinchamiento que la muestra no tratada de la misma densidad seca.

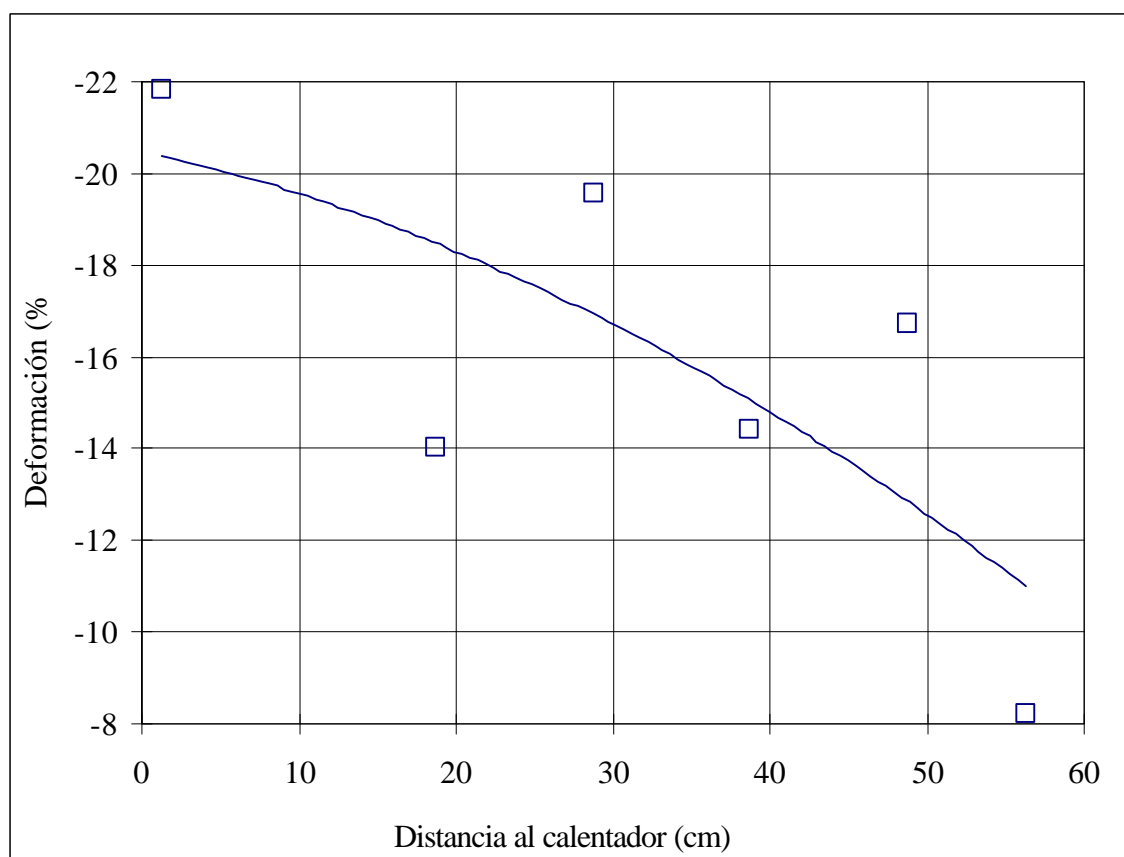


Figura 23: Valores de deformación de los ensayos de hinchamiento bajo carga de 0,5 MPa realizados con muestra proveniente del ensayo FQ1/2 saturada con agua granítica

5.1.1.3. Permeabilidad

Los resultados obtenidos en los ensayos de permeabilidad al agua granítica sobre muestra procedente del ensayo FQ1/2 se recogen en la Tabla XVI y se representan en la Figura 24. Se observa una tendencia a la disminución de la permeabilidad hacia el calentador, lo que probablemente es debido simplemente a la mayor densidad seca de estas zonas ocasionada por la desecación, como confirma el hecho de que los valores de desviación no tengan una tendencia en función de la posición.

Sin embargo, sí es claro el aumento de la conductividad hidráulica de la muestra tratada respecto a la esperada para muestra no tratada de la misma densidad seca (valores obtenidos mediante ec. 1 y 2), puesto que los valores de desviación son de un 218 % en promedio. Estudios realizados con probetas de arcilla FEBEX preparadas mediante compactación directa en el anillo de la celda y preparadas mediante tallado de bloques grandes, han mostrado que existe una tendencia a que las conductividades hidráulicas de muestras preparadas de la última manera sean menores que las de muestras compactadas en el anillo de la celda (Villar 1999). La disminución de la permeabilidad de pastillas talladas respecto al valor esperado en muestra compactada, puede ser debida a que la densidad seca que se ha considerado para las pastillas talladas es la que resulta de suponer un volumen de muestra igual a la capacidad interna de la celda. Pero probablemente, esta densidad no es homogénea, y aunque sea muy baja en los bordes, donde la arcilla ha expandido para rellenar la holgura inicial, la parte central de la muestra tiene una densidad superior, y ésta es la que tiene más influencia sobre el volumen de agua que atraviesa la

	¹ (cm)	$\rho_{d i}$ (g/cm ³)	w i (%)	Permeabilidad (m/s)	w f (%)	$\rho_{d f}$ (g/cm ³)	Perm. Teórica (m/s)	Desviación (%)
1	58,75	1,42		$5,1 \cdot 10^{-13}$		1,42	$1,67 \cdot 10^{-13}$	204
6	46,25	1,43	22,8	$4,3 \cdot 10^{-13}$	35,0	1,43	$1,58 \cdot 10^{-13}$	172
11	33,75	1,61	17,1	$1,2 \cdot 10^{-13}$	28,3	1,61	$4,70 \cdot 10^{-14}$	165
15	23,75	1,68	15,6	$1,3 \cdot 10^{-13}$	28,7	1,61	$2,82 \cdot 10^{-14}$	362
19	13,75	1,63	15,0	$1,4 \cdot 10^{-13}$	29,2	1,57	$3,90 \cdot 10^{-14}$	262
21	8,75	1,67	12,1	$7,2 \cdot 10^{-14}$	25,0	1,67	$2,97 \cdot 10^{-14}$	142

¹Distancia al calentador

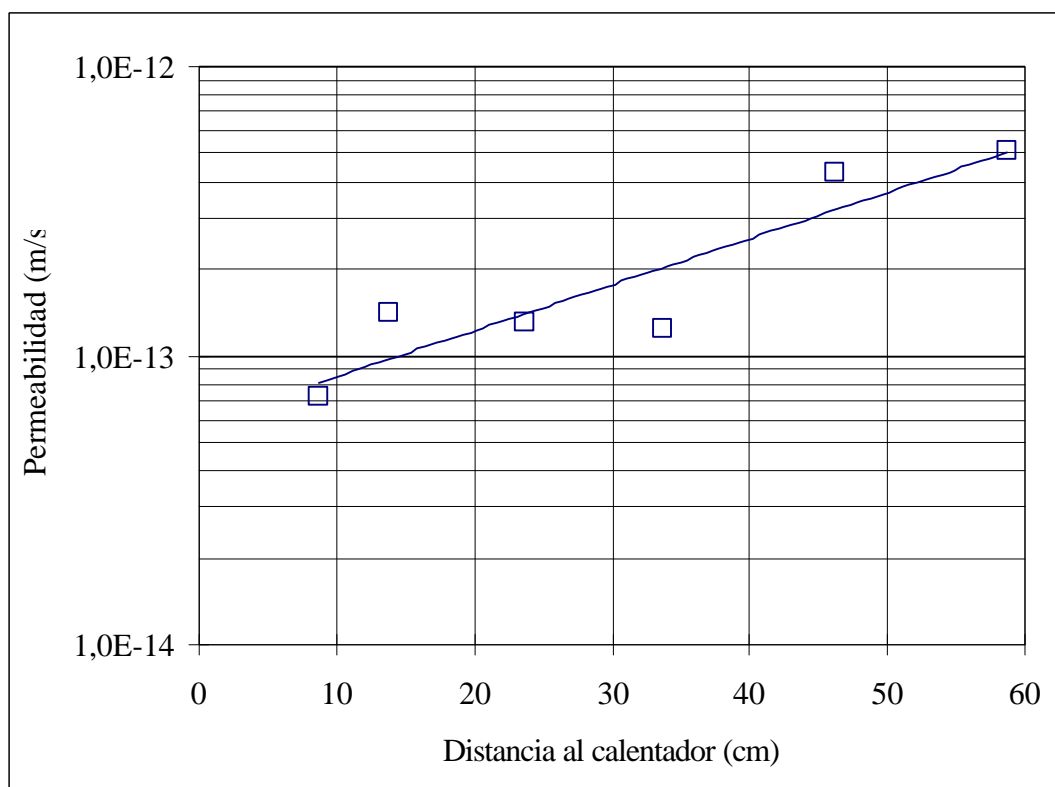


Figura 24: Permeabilidad tras tratamiento termo-hidráulico durante 6 meses (ensayo FQ1/2) en función de la distancia de la muestra al calentador

5.1.2. Muestra remodelada

En esta sección se recogen los resultados obtenidos con muestra proveniente del ensayo termo-hidráulico FQ1/2 que posteriormente ha sido estabilizada a las condiciones del

laboratorio y disgregada hasta tamaño inferior a 5 mm. Con la muestra así preparada se han fabricado las pastillas para los ensayos hidro-mecánicos, por lo que todas ellas tienen inicialmente humedad higroscópica y la misma densidad seca.

5.1.2.1. Hinchamiento bajo carga

Se han realizado ensayos de hinchamiento bajo carga de 0,5 MPa, saturando con agua granítica la muestra procedente de distintas secciones remoldeada y compactada a densidad seca nominal de 1,60 g/cm³. La deformación esperada en estas condiciones para muestra no tratada es de -44,1 % (ec. 5). Los resultados de los ensayos junto con la desviación respecto a este valor teórico se muestran en la Tabla XVII. Los valores de deformación alcanzados son en todos los casos superiores a los esperables para muestra no tratada, en un promedio del 22 %. Puesto que este aumento de la capacidad de hinchamiento es bastante homogéneo e independiente de la posición durante el tratamiento termo-hidráulico que condiciona la humedad y la temperatura, este aumento podría ser consecuencia simplemente del remoldeo.

Tabla XVII: Resultados de los ensayos de hinchamiento bajo carga de 0,5 MPa realizados con muestra proveniente del ensayo FQ1/2 remoldeada a densidad seca nominal de 1,60 g/cm³ y saturada con agua granítica

Sección	Posición ¹ (cm)	$\rho_a i$ (g/cm ³)	w i (%)	Deformación (%)	Duración (días)	w f (%)	$\rho_a f$ (g/cm ³)	Desviación (%)
2	56,25	1,61	16,6	-17,88	26	35,7	1,36	25
2	56,25	1,60	16,7	-15,68	12	37,3	1,39	11
7	43,75	1,63	15,8	-17,33	17	34,2	1,39	24
8	41,25	1,67	11,2	-20,24	17	34,7	1,39	45
9	38,75	1,59	16,8	-17,26	13	39,9	1,35	23
11	33,75	1,60	14,5	-16,80	15	40,0	1,37	19
12	31,25	1,60	15,8	-17,26	15	39,1	1,37	23
14	26,25	1,60	15,1	-16,41	25	41,1	1,38	17
17	18,75	1,60	14,8	-16,04	13	39,1	1,38	14
18	16,25	1,60	15,4	-21,77	18	40,0	1,32	55
19	13,75	1,59	15,2	-15,31	12	38,7	1,38	9
21	8,75	1,61	14,3	-17,43	13	40,6	1,37	24
24	1,25	1,59	13,4	-16,67	13	40,7	1,37	18

¹Distancia al calentador

Los valores finales de deformación en función de la posición de la muestra durante el tratamiento termo-hidráulico se muestran en la Figura 25, en la que se confirma que no existe una tendencia de la capacidad de hinchamiento en función de la distancia al calentador.

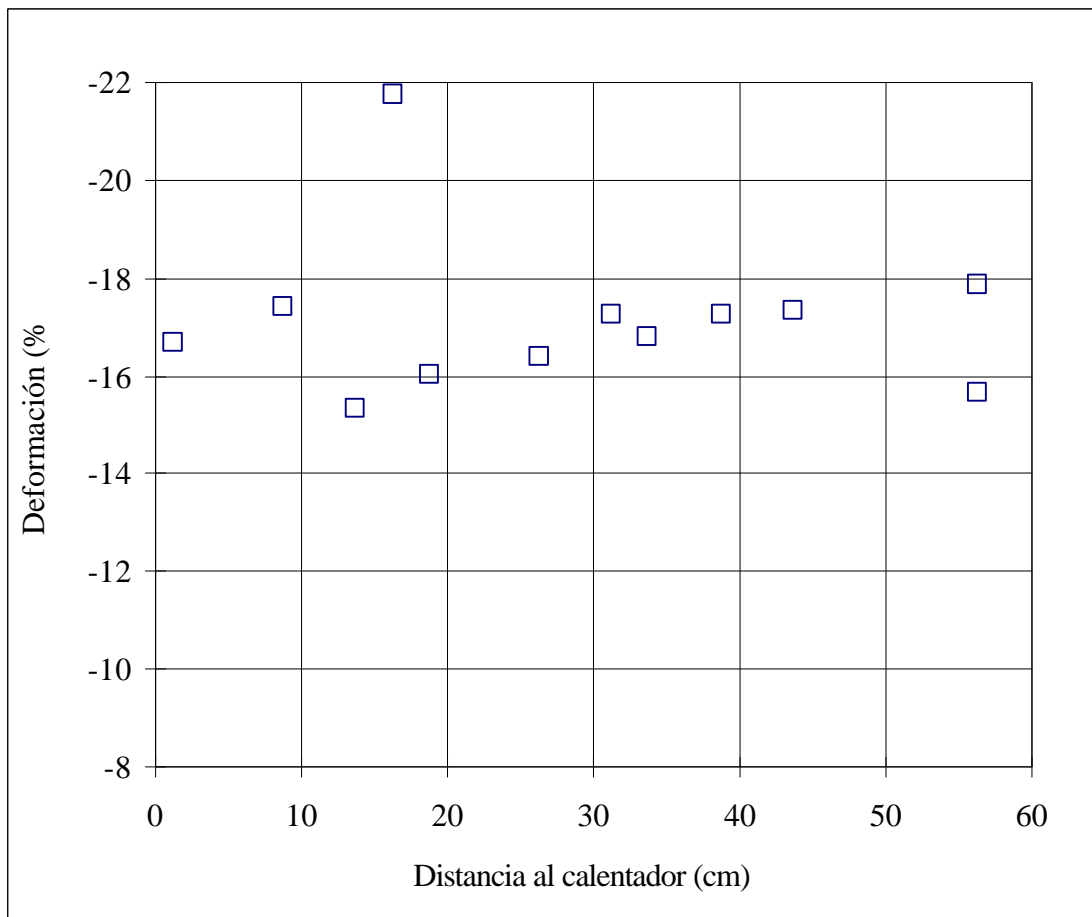


Figura 25: Deformación final en los ensayos de hinchamiento bajo carga de 0,5 MPa realizados con muestra proveniente del ensayo FQ1/2 remodelada a densidad seca nominal de 1,60 g/cm³ y saturada con agua granítica

5.1.2.2. Presión de hinchamiento

Se ha determinado la presión de hinchamiento al saturar con agua destilada de la muestra procedente de distintas secciones, una vez remodelada y compactada a densidad seca nominal de 1,60 g/cm³. La presión de hinchamiento esperada en estas condiciones para muestra no tratada es de 5,8 MPa (ec. 3). Los resultados de los ensayos junto con la desviación respecto a este valor teórico se muestran en la Tabla XVIII. Los valores de presión de hinchamiento alcanzados son en todos los casos superiores a los esperables para muestra no tratada, en un promedio del 44 %. Puesto que, al igual que se comprobó en los ensayos de hinchamiento bajo carga con muestra remodelada, este aumento de la capacidad de hinchamiento es bastante homogéneo e independiente de la posición durante el tratamiento termo-hidráulico que condiciona la humedad y la temperatura τ , este aumento podría ser consecuencia simplemente del remoldeo.

Tabla XVIII: Resultados de los ensayos de presión de hinchamiento con muestra proveniente del ensayo FQ1/2 remoldeada y saturada con agua destilada

Sección	Posición (cm)	$\rho_{d i}$ (g/cm ³)	w i (%)	P _s (MPa)	Duración (días)	w f (%)	$\rho_{d f}$ (g/cm ³)	Desviación (%)
1	58,75	1,60	15,2	8,7	8	29,8	1,59	61
4	51,25	1,60	15,2	9,7	7	25,9	1,60	69
6	46,25	1,61	16,5	7,0	6	30,7	1,58	38
7	43,75	1,60	17,4	11,7	9	25,5	1,60	103
8	41,25	1,60	16,0	6,3	7	29,6	1,58	25
9	38,75	1,59	16,6	7,0	6	30,7	1,56	53
11	33,75	1,61	13,6	5,0	7	31,1	1,58	0
12	31,25	1,60	16,1	8,0	7	26,4	1,58	54
15	23,75	1,63	14,1	9,5	10	25,7	1,61	55
16	21,25	1,62	14,7	7,0	7	29,9	1,61	15
17	18,75	1,58	16,0	8,3	8	26,8	1,57	75
19	13,75	1,58	16,0	6,6	9	30,8	1,57	36
19	13,75	1,59	15,5	7,0	6	30,2	1,57	50
20	11,25	1,59	15,4	5,7	9	31,3	1,57	23
21	8,75	1,61	14,2	8,2	10	26,4	1,60	43
21	8,75	1,61	13,8	7,5	6	29,2	1,58	42
21-22-23	6,25	1,60	13,8	6,6	5	26,2	1,58	29
22-23	5,00	1,61	13,3	7,0	7	29,1	1,58	42
24	1,25	1,60	12,7	5,3	12	28,7	1,59	-1
24	1,25	1,61	12,6	8,8	6	25,3	1,59	65

¹Distancia al calentador

Los valores de presión de hinchamiento en función de la posición de la muestra durante el tratamiento termo-hidráulico se muestran en la Figura 26, en la que se confirma que no existe una tendencia de la capacidad de hinchamiento en función de la distancia al calentador.

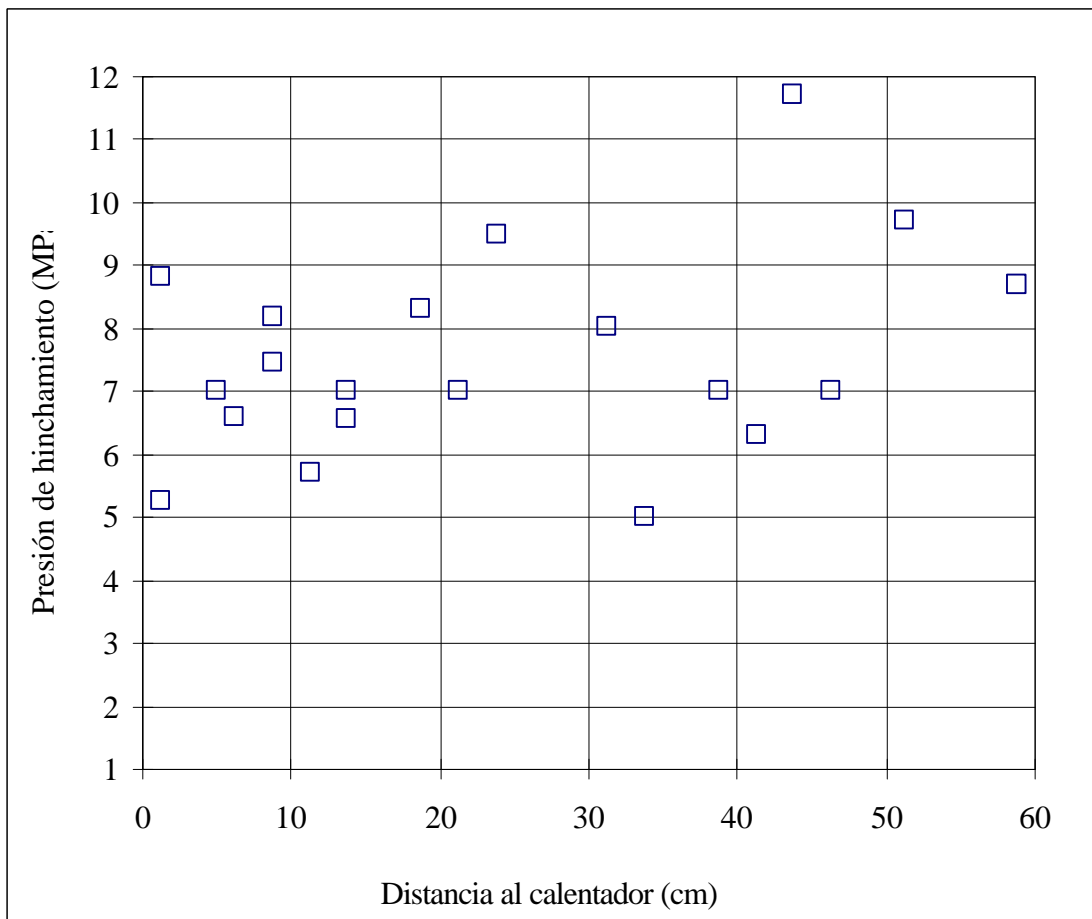


Figura 26: Presión de hinchamiento de muestra proveniente del ensayo FQ1/2 remoldeada y saturada con agua destilada

5.2. 12 MESES: ENSAYO FQ1

5.2.1. Muestra intacta

Los ensayos descritos en esta sección se han realizado con muestra proveniente de las diferentes secciones del ensayo FQ1 tras el tratamiento termo-hidráulico. Para cada sección, la densidad seca y humedad alcanzadas al final este tratamiento son las iniciales del ensayo hidro-mecánico, por lo que las muestras de diferentes secciones del ensayo FQ1, presentan condiciones iniciales muy diferentes en los ensayos hidro-mecánicos.

5.2.1.1. Presión de hinchamiento

Los resultados de los ensayos de presión de hinchamiento realizados con muestra proveniente del ensayo FQ1 se recogen en la Tabla XIX, en la que también se ha incluido el valor de la presión de hinchamiento esperable para una muestra no tratada de la misma densidad seca y humedad inicial higroscópica (ec.3), y la desviación del valor medido experimentalmente respecto a este valor teórico. Aunque se han realizado muy pocos ensayos, se observa que la presión de hinchamiento aumenta hacia el calentador, lo que está ligado a la mayor densidad seca de la arcilla en esta zona, cuyo aumento es, a su vez, debido a la desecación. Sin embargo, la desviación respecto al valor teórico se hace

negativa hacia el calentador, lo que demuestra que en realidad no se produce un aumento de la capacidad de hinchamiento por el tratamiento a temperatura más elevada.

Tabla XIX: Resultados de los ensayos de presión de hinchamiento con muestra proveniente del ensayo FQ1 saturada con agua granítica

	(cm)	$\rho_{d i}$ (g/cm ³)	w i (%)	P _s (MPa)	Duración (días)	w f (%)	$\rho_{d f}$ (g/cm ³)	P _s teórica (MPa)	Desviación (%)
5	48,75	1,50	20,7	2,7	8	34,1	1,47	2,4	12
17	18,75	1,66	14,2	8,8	8	26,5	1,67	9,1	-3
22	6,25	1,69	10,0	6,6	3	30,5	1,67	9,5	-31

¹Distancia al calentador

La Figura 27 muestra la presión de hinchamiento de la muestra en función de la distancia al calentador.

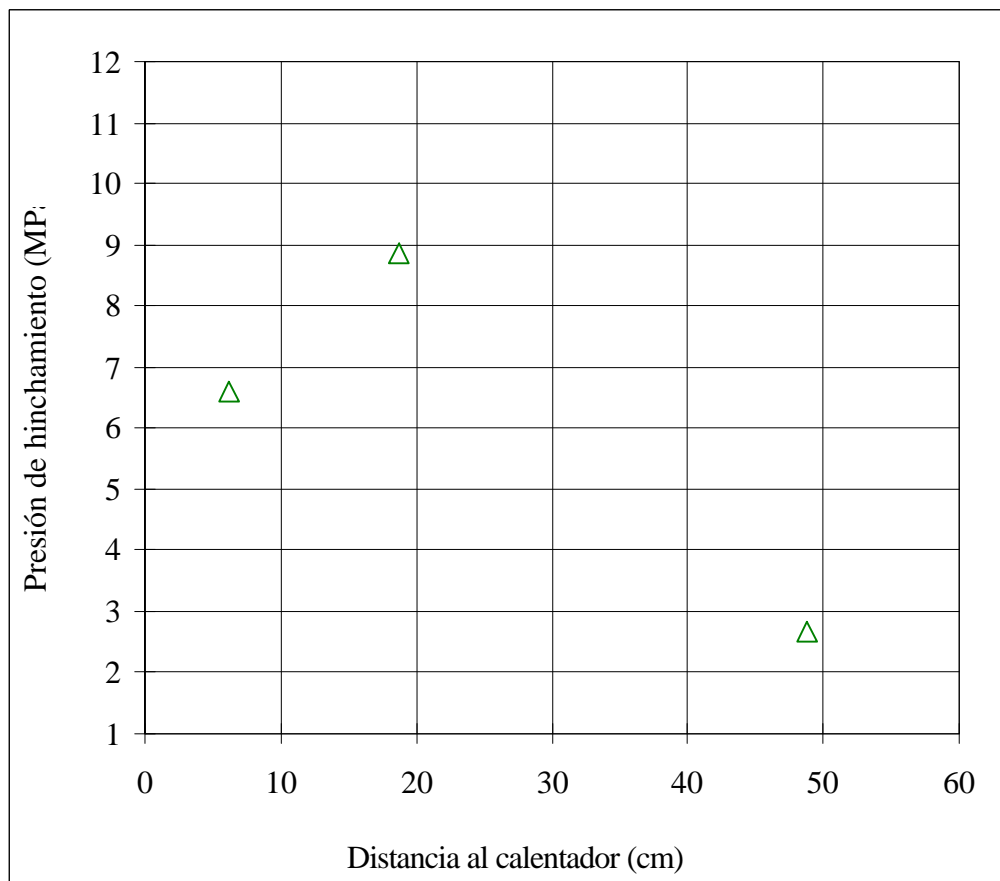


Figura 27: Presión de hinchamiento de muestra proveniente del ensayo FQ1 saturada con

5.2.1.2. Permeabilidad

Los valores de permeabilidad al agua granítica obtenidos en muestra proveniente del ensayo de 1 año de duración se recogen en la Tabla XX, en la que se incluyen también los valores que se habrían obtenido en muestras de la misma densidad seca no tratadas (ec. 1 y

	¹ (cm)	ρ_{di} (g/cm ³)	w i (%)	Permeabilidad (m/s)	w f (%)	ρ_{df} (g/cm ³)	Perm. Teórica (m/s)	Desviación (%)
1	58,75	1,40	33,0	$3,2 \cdot 10^{-13}$	33,8	1,37	$2,3 \cdot 10^{-13}$	38
6	46,25	1,47	23,4	$2,5 \cdot 10^{-13}$	32,2	1,47	$1,2 \cdot 10^{-13}$	113
9	38,75	1,66		$1,2 \cdot 10^{-13}$	31,5	1,46	$1,3 \cdot 10^{-13}$	-5
14	26,25	1,40		$4,8 \cdot 10^{-13}$	34,9	1,40	$1,9 \cdot 10^{-13}$	150
19	13,75	1,70	12,4	$3,0 \cdot 10^{-14}$	24,8	1,59	$5,2 \cdot 10^{-14}$	-42
21	8,75	1,76	12,0	$3,0 \cdot 10^{-14}$	23,4	1,67	$3,0 \cdot 10^{-14}$	-1
23-24	2,50	1,71	8,0	$1,5 \cdot 10^{-13}$	27,5	1,57	$5,8 \cdot 10^{-14}$	161

¹Distancia al calentador

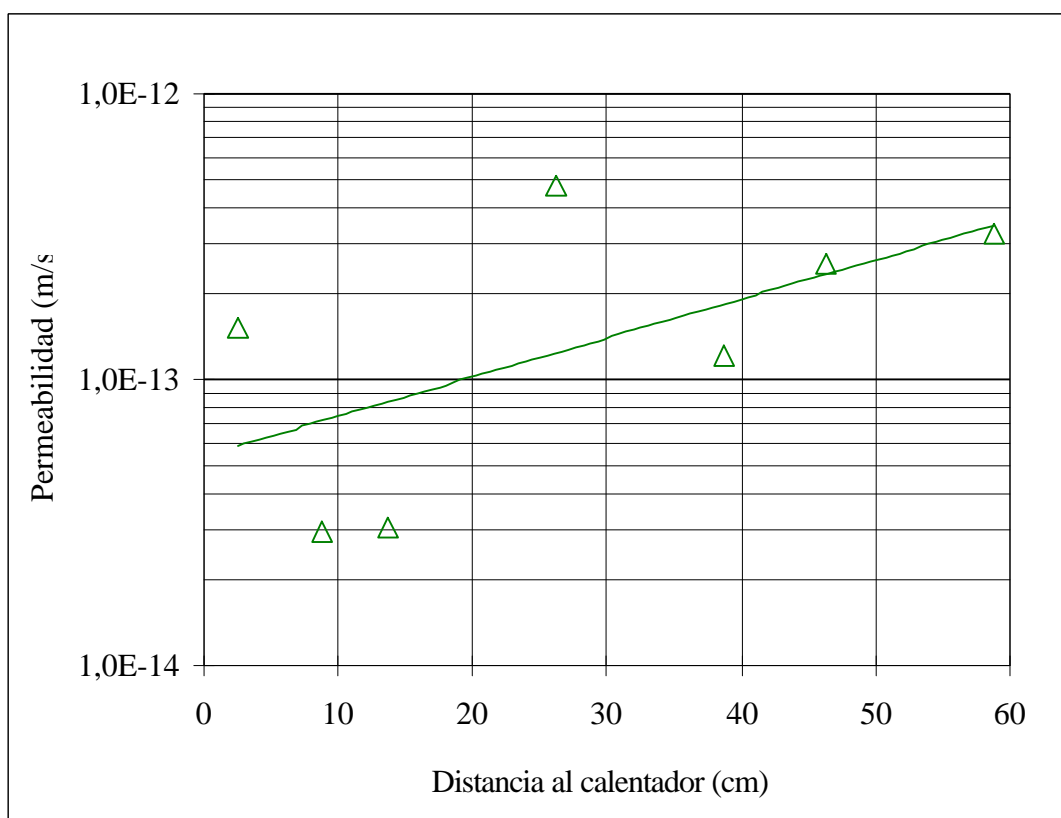


Figura 28: Permeabilidad tras tratamiento termo-hidráulico durante 12 meses (ensayo FQ1) en función de la distancia de la muestra al calentador

5.2.2. Muestra remoldeada

En esta sección se recogen los resultados obtenidos con muestra proveniente del ensayo termo-hidráulico FQ1 que posteriormente ha sido estabilizada a las condiciones del laboratorio y disgregada hasta tamaño inferior a 5 mm. Con la muestra así preparada se han fabricado las pastillas para los ensayos hidro-mecánicos, por lo que todas ellas tienen inicialmente la misma humedad higroscópica y la misma densidad seca.

5.2.2.1. Hinchamiento bajo carga

Se han realizado ensayos de hinchamiento bajo carga de 0,5 MPa, saturando con agua granítica la muestra procedente de distintas secciones remoldeada y compactada a densidad seca nominal de 1,60 g/cm³. Durante el remoldeo la muestra se ha molido, excepcionalmente, hasta tamaño inferior a 2 mm. La deformación esperada en estas condiciones para muestra no tratada es de -44,1 % (ec. 5). Los resultados de los ensayos, junto con la desviación respecto a este valor teórico, se muestran en la Tabla XXI.

Tabla XXI: Resultados de los ensayos de hinchamiento bajo carga de 0,5 MPa realizados con muestra proveniente del ensayo FQ1 remoldeada a densidad seca nominal de 1,60 g/cm³ y saturada con agua granítica

Sección	Posición ¹ (cm)	$\rho_a i$ (g/cm ³)	w i (%)	Deformación (%)	Duración (días)	w f (%)	$\rho_a f$ (g/cm ³)	Desviación (%)
3	53,75	1,59	12,3	-16,78	15	34,2	1,36	20
4	51,25	1,61	11,7	-17,56	19	37,1	1,37	25
5	48,75	1,56	14,6	-16,85	16	36,0	1,34	20
6	46,25	1,59	12,7	-17,58	22	36,4	1,35	25
8	41,25	1,58	13,2	-17,46	22	40,2	1,35	24
10	36,25	1,56	13,8	-16,97	27	40,2	1,34	20
12	31,25	1,58	11,8	-17,11	14	38,7	1,35	21
13	28,75	1,61	12,5	-19,72	16	39,1	1,34	40
14	26,25	1,59	14,1	-16,43	16	37,5	1,37	17
16	21,25	1,59	11,4	-17,23	15	39,6	1,36	22
18	16,25	1,61	11,7	-18,22	14	37,3	1,36	30
20	11,25	1,63	10,4	-18,47	6	36,4	1,38	31
22	6,25	1,60	12,1	-17,74	15	37,4	1,36	26
23-24	2,50	1,58	11,5	-17,01	15	35,8	1,35	22

¹Distancia al calentador

Los valores de deformación alcanzados son en todos los casos superiores a los esperables para muestra no tratada, en un promedio del 25 %. Como se observa en la Figura 29, la capacidad de hinchamiento es bastante homogénea e independiente de la posición durante el tratamiento termo-hidráulico que condiciona la humedad y la temperatura, por lo que el aumento respecto a la capacidad de hinchamiento teórica podría ser consecuencia

simplemente del remoldeo, como se observó en el ensayo termo-hidráulico de 6 meses de

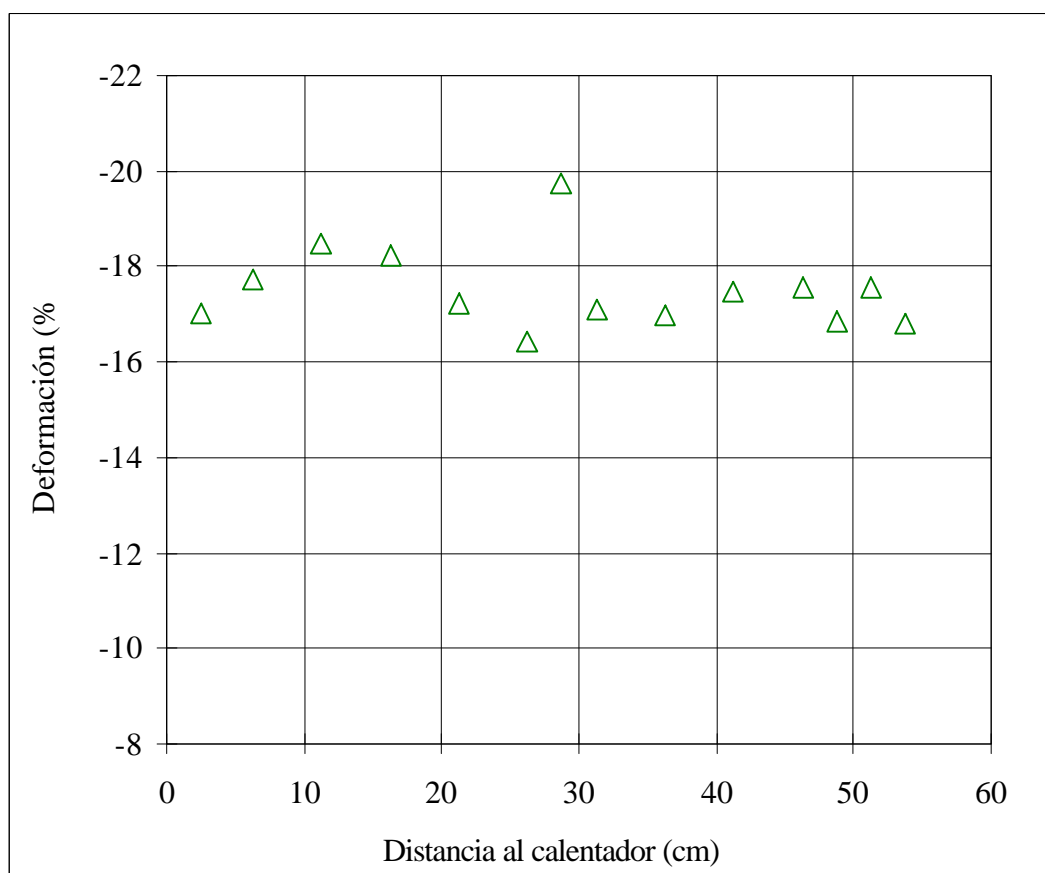


Figura 29: Deformación final en los ensayos de hinchamiento bajo carga de 0,5 MPa realizados con muestra proveniente del ensayo FQ1 remoldeada a densidad seca nominal de 1,60 g/cm³, molida a tamaño inferior a 2 mm y saturada con agua granítica

5.2.2.2. Presión de hinchamiento

Se ha determinado la presión de hinchamiento al saturar con agua destilada ejercida por la muestra procedente de distintas secciones, remoldeada y compactada a densidad seca nominal de 1,60 g/cm³. La presión de hinchamiento esperada en estas condiciones para muestra no tratada es de 5,8 MPa (ec.3), con una gran dependencia de pequeñas variaciones en la densidad seca. Los resultados de los ensayos junto con la desviación respecto a este valor teórico se muestran en la Tabla XXII. Los valores de presión de hinchamiento alcanzados son en todos los casos superiores a los esperables para muestra no tratada, en un promedio del 46 %. Puesto que, al igual que se comprobó en los ensayos de hinchamiento bajo carga sobre muestra remoldeada, este aumento de la capacidad de hinchamiento es bastante homogéneo e independiente de la posición durante el tratamiento termo-hidráulico que condiciona la humedad y la temperatura τ , este aumento podría ser consecuencia simplemente del remoldeo. Otro dato que confirmaría esta hipótesis es que el aumento respecto al valor teórico es similar al observado para las muestras del ensayo termo-hidráulico de 6 meses de duración (44 %), y por lo tanto parece ser independiente de las condiciones del tratamiento previo.

Tabla XXII: Resultados de los ensayos de presión de hinchamiento con muestra proveniente del ensayo FQ1 remoldeada y saturada con agua destilada

Sección	Posición (cm)	ρ_{di} (g/cm ³)	w _i (%)	P _s (MPa)	Duración (días)	w _f (%)	ρ_{df} (g/cm ³)	Desviación (%)
1	58,75	1,63	11,2	9,5	9	25,6	1,62	42
2	56,25	1,59	15,5	7,1	11	29,9	1,56	57
5	48,75	1,62	14,4	8,7	10	26,6	1,61	57
6	46,25	1,62	11,7	8,5	6	25,3	1,61	35
9	38,75	1,61	14,5	8,6	7	26,5	1,61	42
13	28,75	1,62	11,1	7,3	7	26,7	1,60	28
14	26,25	1,60	14,2	9,8	6	25,1	1,60	68
15	23,75	1,61	11,5	7,1	8	26,8	1,60	26
17	18,75	1,61	11,6	7,9	6	25,3	1,60	33
19	13,75	1,61	13,1	9,5	7	25,7	1,60	58
19	13,75	1,61	13,1	8,8	11	26,8	1,60	47
21	8,75	1,61	14,2	8,6	11	29,4	1,57	79
22	6,25	1,62	12,0	8,0	8	26,0	1,61	26
23-24	2,50	1,62	11,0	9,4	9	25,5	1,61	49

¹Distancia al calentador

La Figura 30 representa los valores de la presión de hinchamiento para muestra remoldeada procedente de diferentes secciones del ensayo FQ1. Se observa la falta de tendencia respecto a la posición durante el tratamiento termo-hidráulico.

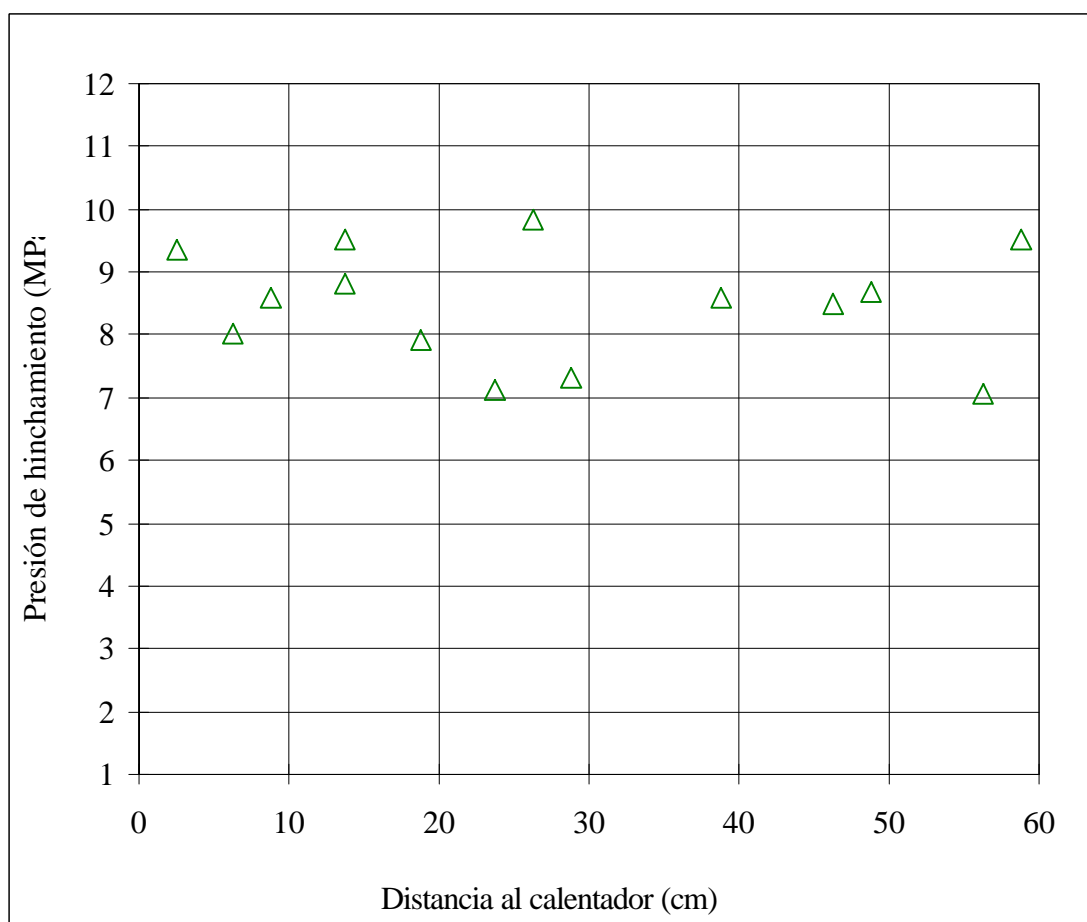


Figura 30: Presión de hinchamiento de muestra proveniente del ensayo FQ1 remoldeada a densidad seca $1,60 \text{ g/cm}^3$ y saturada con agua destilada

5.3. 24 MESES: ENSAYO FQ2

5.3.1. Muestra intacta

Los ensayos descritos en esta sección se han realizado con muestra proveniente de las diferentes secciones tras el tratamiento termo-hidráulico. Para cada sección, la densidad seca y humedad alcanzadas al final de este tratamiento son las iniciales del ensayo hidromecánico, por lo que las muestras de diferentes secciones del ensayo FQ2, presentan condiciones iniciales muy diferentes en los ensayos hidromecánicos.

5.3.1.1. Porosidad

Se ha determinado la distribución porosimétrica por intrusión de mercurio en doce muestras procedentes de distintas secciones del ensayo FQ2 después del tratamiento. Los datos obtenidos se muestran en la Tabla XXV.

Tabla XXIII: Datos porosimétricos de muestras procedentes del ensayo FQ2

	(cm)	ρ_d (g/cm ³)	total (%)	grandes (%)	moda grandes (μm)	medios %	moda medios (μm)	pequeñ (%)	moda pequeños (μm)	coef. unif.
6	46,25	1,50	53	26	21	21	0,70	53	0,006	137
7	43,75	1,51	40	25	13	29	0,41	46	0,005	65
8	41,25	1,47	44	29	10	28	1,10	43	0,005	107
8.2	41,25	1,51	39	36	13	24	0,86	40	0,006	285
9	38,75	1,50	44	26	16	21	0,86	53	0,006	107
12	31,25	1,52	46	32	8	20	0,86	48	0,006	224
15	23,75	1,55	51	33	34	22	0,86	45	0,008	223
17	18,75	1,62	51	25		24		50		84
19	13,75	1,65	41	32		21		47		
21	8,75	1,69	46	7	10	39	0,86	54	0,008	31
23	3,75			28	10	30	0,86	42	0,008	468
24	1,25	1,67	68	22	27	31	0,86	47	0,008	467

Posición: distancia al calentador; total: total de poros intruido por mercurio; grandes, medianos o pequeños: 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 intruido; moda de poros grandes, medios o pequeños; coef. unif.: coeficiente de uniformidad de poros ϕ_{40}/ϕ_{80} .

Se dispone también de los datos del análisis porosimétrico realizado en las muestras provenientes del ensayo HI2, que como se explicó en la , se dedica a la extracción y análisis de aguas intersticiales. En este caso, las secciones 1 a 10, por estar más húmedas, se han preservado íntegras para la extracción del agua intersticial por consolidación, por lo que sólo se dispone de los datos del resto de secciones (Tabla XXIV).

Tabla XXIV: Datos porosimétricos de muestras procedentes del ensayo HI2

	(cm)	ρ_d (g/cm ³)	total (%)	grandes (%)	moda grandes (μm)	medios %	moda medios (μm)	pequeñ (%)	moda pequeños (μm)	coef. unif.
11	38,75	1,52	52	34	8	22	0,41	43	0,008	286
12	31,25	1,48	75	20	13	22	0,41	57	0,005	24
14	26,25	1,51	97	25	8	22	0,41	57	0,005	
15	23,75	1,52		33	8	25	0,41	25	0,017	284
16	21,25	1,53	44	36	6	23	0,41	41	0,008	222
17	18,75	1,62	61	33	13	8	0,15	59	0,008	9
18	16,25	1,61	56	31	6	22	0,41	47	0,008	175
20	13,75	1,59	76	16	8	28	0,41	55	0,010	15

Sección	posición (cm)	ρ_d (g/cm ³)	total (%)	grandes (%)	moda grandes (μ m)	medios %	moda medios (μ m)	pequeñ (%)	moda pequeños (μ m)	coef. unif.
21	8,75	1,67	60	27	8	22	0,41	51	0,010	51
22	6,25	1,63	74	39	13	20	0,41	40	0,006	598
23	3,75	1,64	85	39	27	19	0,41	42	0,017	365

Posición: distancia al calentador; total: total de poros intruido por mercurio; grandes, medianos o pequeños: μ m), medianos (diámetro de entre 6 y 0,2 μ m) o pequeños (diámetro de entre 0,2 y 0,006 μ m) respecto al volumen total de poros intruido; moda de poros grandes, medios o pequeños; coef. unif.: coeficiente de uniformidad de poros ϕ_{40}/ϕ_{80} .

5.3.1.2. Presión de hinchamiento

Los resultados de los ensayos de presión de hinchamiento realizados con muestra proveniente del ensayo FQ2 se recogen en la Tabla XXV, en la que también se ha incluido el valor de la presión de hinchamiento esperable para una muestra no tratada de la misma densidad seca y humedad inicial higroscópica (ec. 3), y la desviación del valor medido experimentalmente respecto a este valor teórico. Se observa que la presión de hinchamiento aumenta hacia el calentador (Figura 31), lo que está ligado a la mayor densidad seca de la arcilla en esta zona, cuyo aumento es, a su vez, debido a la desecación. Sin embargo, la desviación respecto al valor teórico no muestra una tendencia clara en función de la posición, lo que demuestra que en realidad no se produce un aumento de la capacidad de hinchamiento por el tratamiento a temperatura más elevada.

Tabla XXV: Resultados de los ensayos de presión de hinchamiento con muestra proveniente del ensayo FQ2 saturada con agua destilada

Sección	Posición (cm)	$\rho_{d i}$ (g/cm ³)	w i (%)	P_s (MPa)	Duración (días)	w f (%)	$\rho_{d f}$ (g/cm ³)	P_s teórica (MPa)	Desviación (%)
2	56,25	1,46	29,7	1,4	7	34,1	1,45	2,1	-34
3	53,75	1,51	27,2	4,9	4	27,5	1,49	2,8	72
5	48,75	1,56	24,0	3,7	8	29,6	1,55	4,0	-9
11	33,75	1,60	18,6	6,0	7	26,8	1,59	5,3	14
13	28,75	1,66	17,0	6,3	8	26,6	1,64	7,9	-20
15	23,75	1,57	17,6	5,9	7	26,9	1,56	4,5	32
16	21,25	1,58	21,5	6,8	8	27,1	1,57	4,8	41
18	16,25	1,60	12,5	4,4	7	27,8	1,58	5,1	-13
24	1,25	1,71	6,1	7,4	8	25,2	1,71	12,0	-38

¹Distancia al calentador

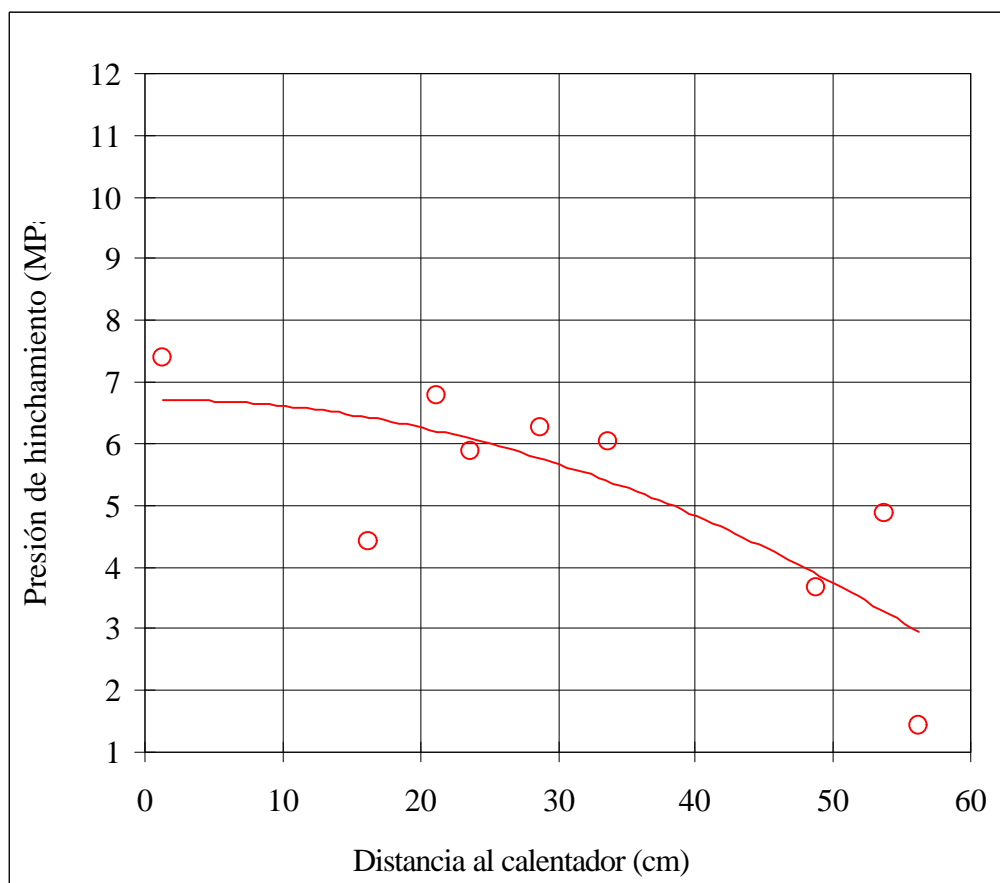


Figura 31: Presión de hinchamiento de muestra proveniente del ensayo FQ2 saturada con agua destilada

5.3.1.3. Permeabilidad

Los valores de permeabilidad al agua granítica obtenidos en muestra proveniente del ensayo de 2 años de duración se recogen en la Tabla XXVI, en la que se incluyen también los valores que se habrían obtenido en muestras de la misma densidad seca no tratadas (ec PROPIEDADES HIDRO-MECÁNICAS EN LA ARCILLA NO TRATADA). Aunque se realizaron muy pocos ensayos, se observa que la permeabilidad tiende a disminuir hacia el calentador, como se muestra en la Figura 32. Esta disminución de permeabilidad es consecuencia del aumento de densidad seca ocasionado por la desecación. En promedio, los valores determinados experimentalmente son mayores que los teóricos, un 220 %, lo que supone un aumento similar al que se observó tras el ensayo termo-hidráulico de 6 meses de duración.

	¹ (cm)	ρ_{di} (g/cm ³)	w _i (%)	Permeabilidad (m/s)	w _f (%)	ρ_{df} (g/cm ³)	Perm. Tca. (m/s)	Desviación (%)
1	58,75	1,41	33,0	$8,7 \cdot 10^{-13}$	37,5	1,34	$2,8 \cdot 10^{-13}$	207
6	46,25	1,46	26,5	$4,2 \cdot 10^{-13}$	32,0	1,48	$1,1 \cdot 10^{-13}$	290
10	36,25	1,59	22,7	$1,4 \cdot 10^{-13}$	27,2	1,59	$5,3 \cdot 10^{-14}$	162

¹Distancia al calentador

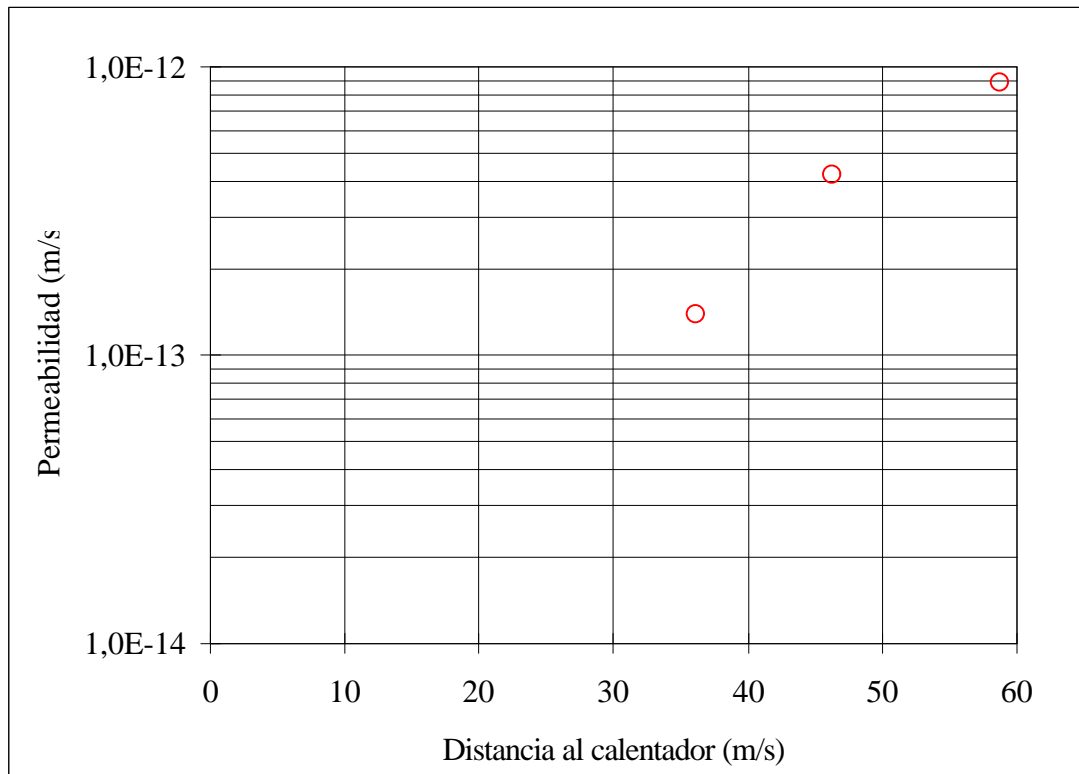


Figura 32: Permeabilidad tras tratamiento termo-hidráulico durante 24 meses (ensayo FQ2) en función de la distancia de la muestra al calentador

5.3.2. Muestra remoldeada

En esta sección se recogen los resultados obtenidos con muestra proveniente del ensayo termo-hidráulico FQ2 que posteriormente ha sido estabilizada a las condiciones del laboratorio y disgregada hasta tamaño inferior a 5 mm. Con la muestra así preparada se han fabricado las pastillas para los ensayos hidro-mecánicos, por lo que todas ellas tienen inicialmente humedad higroscópica y la misma densidad seca.

5.3.2.1. Presión de hinchamiento

Se ha determinado la presión de hinchamiento al saturar con agua destilada de la muestra procedente de distintas secciones, remoldeada y compactada a densidad seca nominal de $1,60 \text{ g/cm}^3$. La presión de hinchamiento esperada en estas condiciones para muestra no

tratada es de 5,8 MPa (ec. 3), con una gran dependencia de pequeñas variaciones en la densidad seca. Los resultados de los ensayos junto con la desviación respecto a este valor

Tabla XXVII. Los valores de presión de hinchamiento alcanzados son en todos los casos superiores a los esperables para muestra no tratada, en un promedio del 20 %. Puesto que este aumento de la capacidad de hinchamiento es bastante homogéneo e independiente de la posición durante el tratamiento termo-hidráulico que condiciona la humedad y la temperatura, este aumento podría ser consecuencia simplemente del remoldeo.

Tabla XXVII: Resultados de los ensayos de presión de hinchamiento con muestra proveniente del ensayo FQ2 remoldeada y saturada con agua destilada

Sección	Posición (cm)	$\rho_{a i}$ (g/cm ³)	w i (%)	P _s (MPa)	Duración (días)	w f (%)	$\rho_{d f}$ (g/cm ³)	Desviación (%)
1	58,75	1,64	13,2	7,0	4	25,5	1,63	1
2	56,25	1,65	9,0	6,2	8	26,1	1,64	-18
3	53,75	1,64	12,3	7,3	7	27,4	1,62	12
4	51,25	1,67	11,8	9,8	7	24,7	1,65	20
6	46,25	1,67	12,0	7,8	7	25,9	1,67	-15
9	38,75	1,64	12,9	8,6	8	25,2	1,63	18
10	36,25	1,63	13,1	8,4	7	28,3	1,61	36
11	33,75	1,63	14,4	10,0	6	23,7	1,62	51
12	31,25	1,61	15,2	6,6	6	28,1	1,59	20
13	28,75	1,60	15,3	5,9	6	26,3	1,59	8
14	26,25	1,62	14,7	7,1	7	29,7	1,59	30
15	23,75	1,62	13,9	7,1	8	25,9	1,62	6
16	21,25	1,59	12,0	6,4	8	29,6	1,58	30
17	18,75	1,61	14,7	7,9	6	28,8	1,60	39
18	16,25	1,64	11,4	6,7	8	28,5	1,61	5
19	13,75	1,62	14,5	7,6	6	28,8	1,60	33
20	11,25	1,62	14,3	7,1	7	28,5	1,60	25
21	8,75	1,61	14,0	7,1	8	25,9	1,60	21

¹Distancia al calentador

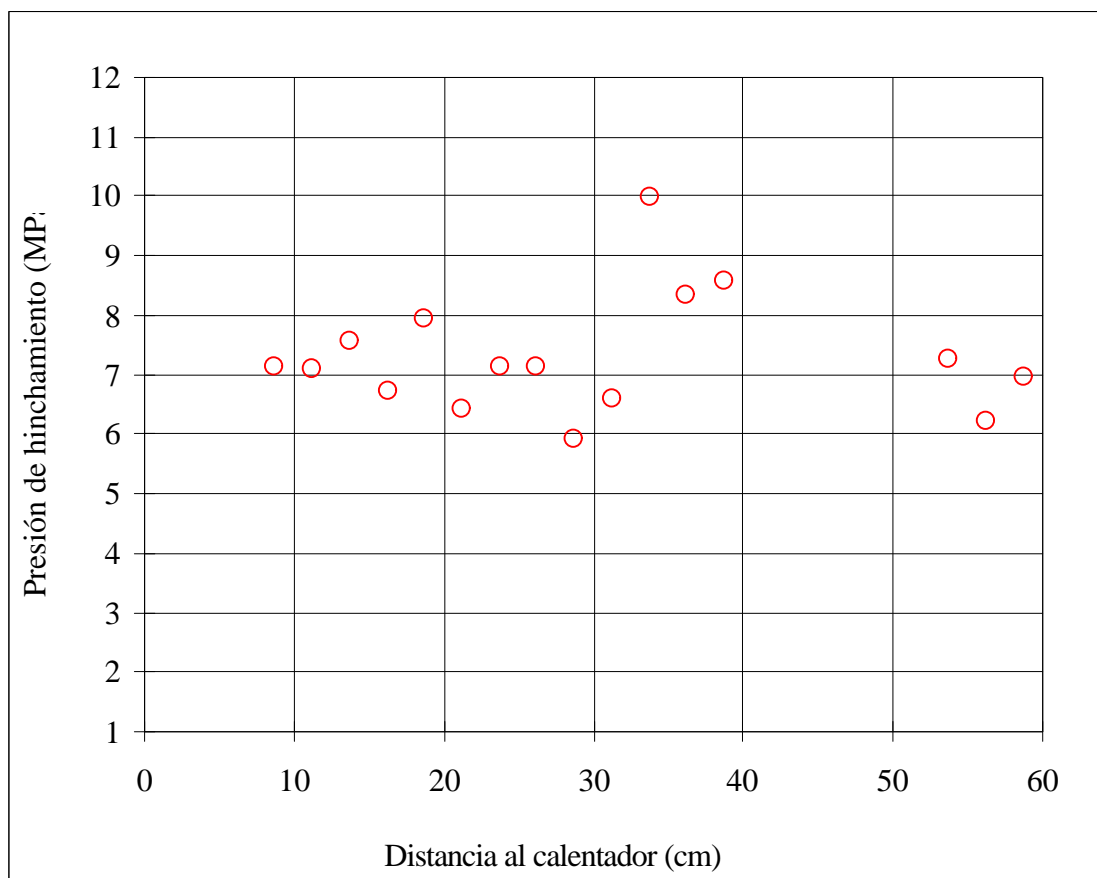


Figura 33: Presión de hinchamiento de muestra proveniente del ensayo FQ2 remoldeada y saturada con agua destilada

5.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.4.1. Porosidad

En la Tabla XXVIII se han recogido los valores medios de los datos porosimétricos obtenidos al final de los ensayos termo-hidráulicos. La diferencia más notable entre ellos es que las muestras procedentes de los ensayos de mayor duración tienen menor porcentaje de poros pequeños, con lo que su coeficiente de uniformidad es mayor, al estar más equilibrados los porcentajes de poros pertenecientes a cada familia. Es también mayor el porcentaje de poros intruido por el mercurio, lo que puede estar ligado a la disminución de la cantidad de poros pequeños, difícilmente accesibles para la capacidad del equipo. La disminución de la proporción de poros pequeños por efecto del calentamiento se ha observado en otros ensayos similares (Villar *et al.* 1997), lo que podría justificar que las muestras procedentes del ensayo FQ2 y HI2 que han estado sometidas a calentamiento durante más tiempo, tengan una proporción menor de poros pequeños. Este hecho es más marcado en las muestras procedentes del ensayo HI2, ya que las muestras más húmedas procedentes de este ensayo (secciones 1 a 10) no se han analizado (*cf.* sección 5.3.1.1). En esos mismos ensayos se comprobó que esta modificación del tamaño de poro es reversible, y que se recupera cuando se alcanzan los valores iniciales de humedad. De hecho, las determinaciones porosimétricas mediante adsorción de nitrógeno realizadas en la UAM sobre muestras procedentes de los ensayos FQ1/2 y FQ1 (Martín & Cuevas 2000) han encontrado también una disminución del porcentaje de poros menores de 60 Å hacia el

calentador. Estos autores atribuyen este hecho al aumento del tamaño de cristalito que se produce al calentar (paso de apilamientos de 7-8 láminas en la dirección [001] para las muestras próximas a la zona de hidratación a apilamientos de 10 láminas para las muestras

Por limitaciones en el número de muestras disponibles - 4 en el caso del ensayo FQ1/2, 12 en el del ensayo FQ2 y 11 en el del ensayo HI2 - la interpretación de los datos que se acaba de ofrecer es sólo tentativa.

Tabla XXVIII: Valores medios de los datos porosimétricos obtenidos en diferentes ensayos

Ensayo	total (%)	grandes (%)	Moda grandes	medios (%)	Moda medios	pequeños (%)	Moda pequeños	coef. unif.
FQ1/2	40±10	33±4	16±6	17±7	0,65±0,39	52±5	0,005±0,000	101±57
FQ2	48±8	27±7	16±9	26±6	0,82±0,17	47±5	0,007±0,001	200±153
HI2	68±16	30±7	11±6	21±5	0,39±0,08	47±10	0,009±0,004	203±190

total: total de poros intruido por mercurio; grandes, medianos o pequeños: 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 intruido; moda de poros grandes, medios o pequeños; coef. unif.: coeficiente de uniformidad de poros ϕ_{40}/ϕ_{80} .

5.4.2. Hinchamiento bajo carga

Las muestras remoldeadas hinchan más tras el tratamiento termo-hidráulico, aunque no se aprecian diferencias en función de la duración del tratamiento. En promedio, las muestras provenientes del ensayo FQ1/2 (6 meses) hinchan un 22 % más y las del ensayo FQ1 un 25 % más que las muestras no tratadas de la misma densidad seca saturadas con agua granítica bajo la misma carga (0,5 MPa). No se observa tendencia en función de la distancia al calentador ni de la duración del tratamiento (Figura 34), por lo que puede concluirse que este aumento de la capacidad de hinchamiento de la muestra tratada se debe exclusivamente al remoldeo.

Sin embargo, las muestras provenientes del ensayo FQ1/2 preparadas mediante tallado (muestra intacta) hinchan un 5 % menos que la arcilla FEBEX no tratada compactada a la misma densidad seca. Las diferencias que existen entre el método de preparación de pastillas talladas y compactadas, hacen que, por lo general, los valores de presión de hinchamiento obtenidos en muestra tallada sean entre un 6 y un 14 % superiores que los que se obtendrían en muestra compactada de densidad seca equivalente. Esto es debido a que la pastilla tallada antes de introducirse en el anillo tiene una densidad seca inicial superior a la que tiene una vez saturada. Esta densidad seca inicial es la responsable de la presión ejercida en un principio verticalmente, que es la que se ha de contrarrestar en el edómetro y, por lo tanto, la que da el valor de la presión de hinchamiento (Villar 2000b). Sin embargo, se ha observado lo contrario, lo que apuntaría a una verdadera disminución de la capacidad de hinchamiento de la muestra tras el tratamiento termo-hidráulico, en cualquier caso, muy pequeña. Pero por otra parte, la humedad inicial de las muestras provenientes del ensayo FQ1/2 es en promedio del 17 %, es decir, superior a la humedad higroscópica de la arcilla FEBEX, que es a la que se han realizado las determinaciones a partir de las que se ha hecho el ajuste teórico. En general, la capacidad de hinchamiento de un material disminuye con su humedad inicial. Aunque no se ha cuantificado este efecto en

la arcilla FEBEX, podría justificar la menor capacidad de hinchamiento de la arcilla tratada, puesto que, además, hay una tendencia a que la disminución sea mayor para las muestras con mayor humedad inicial, es decir, más alejadas del calentador.

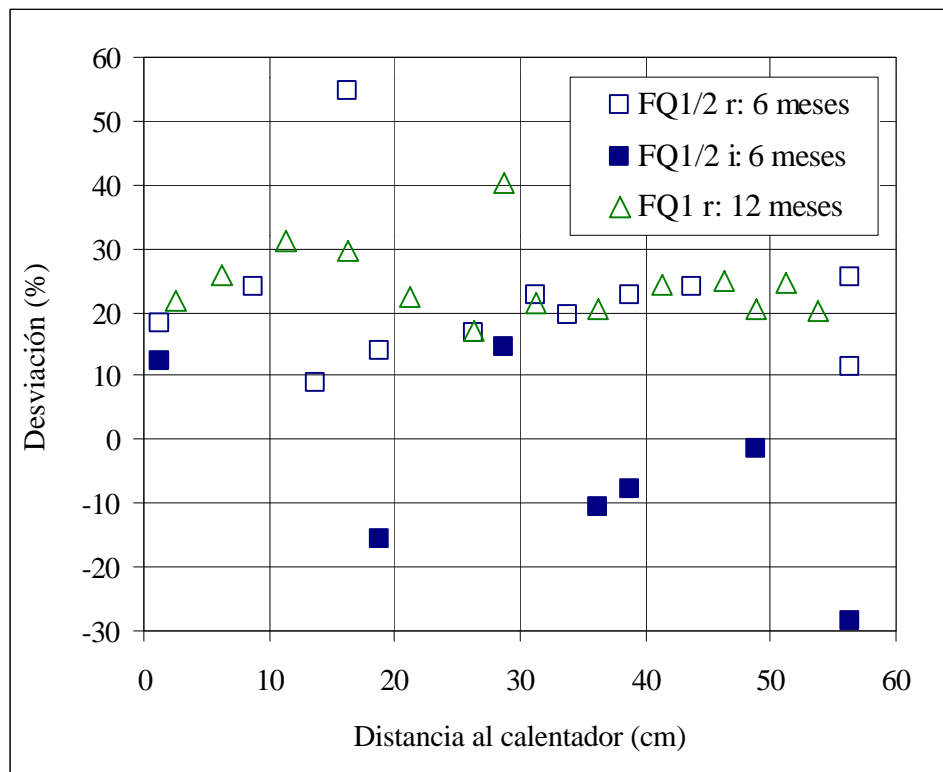


Figura 34: Desviación de los valores de deformación bajo carga de 0,5 MPa para muestra intacta (i) y remoldeada a densidad seca 1,60 g/cm³ (r) proveniente de ensayos termo-hidráulicos de diferente duración respecto a los valores esperados para muestra no tratada

5.4.3. Presión de hinchamiento

La presión de hinchamiento desarrollada por muestras sometidas a tratamiento termo-hidráulico aumenta al disminuir la distancia al calentador. Este aumento está relacionado con el aumento de densidad seca y la disminución de humedad que experimenta la arcilla que ha sufrido una desecación más intensa. Por tanto, no tiene porque suponer una modificación permanente de la capacidad de hinchamiento, ya que, al llegar el frente de hidratación a estas zonas, se producirá también una recuperación (disminución) de la densidad seca inicial, por lo que la presión de hinchamiento originada no tiene porque ser mayor que en el resto de la barrera.

La presión de hinchamiento desarrollada por las muestras tratadas durante 6 meses es similar a la esperada para muestras no tratadas de la misma densidad seca, mientras que la desarrollada por muestras tratadas durante 24 meses es un 10 % mayor en promedio, lo que está totalmente dentro de los márgenes de error inherentes a la determinación y al ajuste teórico obtenido (ec. 3, sección PROPIEDADES HIDRO-MECÁNICAS EN LA ARCILLA NO TRATADA), como se puede observar en la Figura 35.

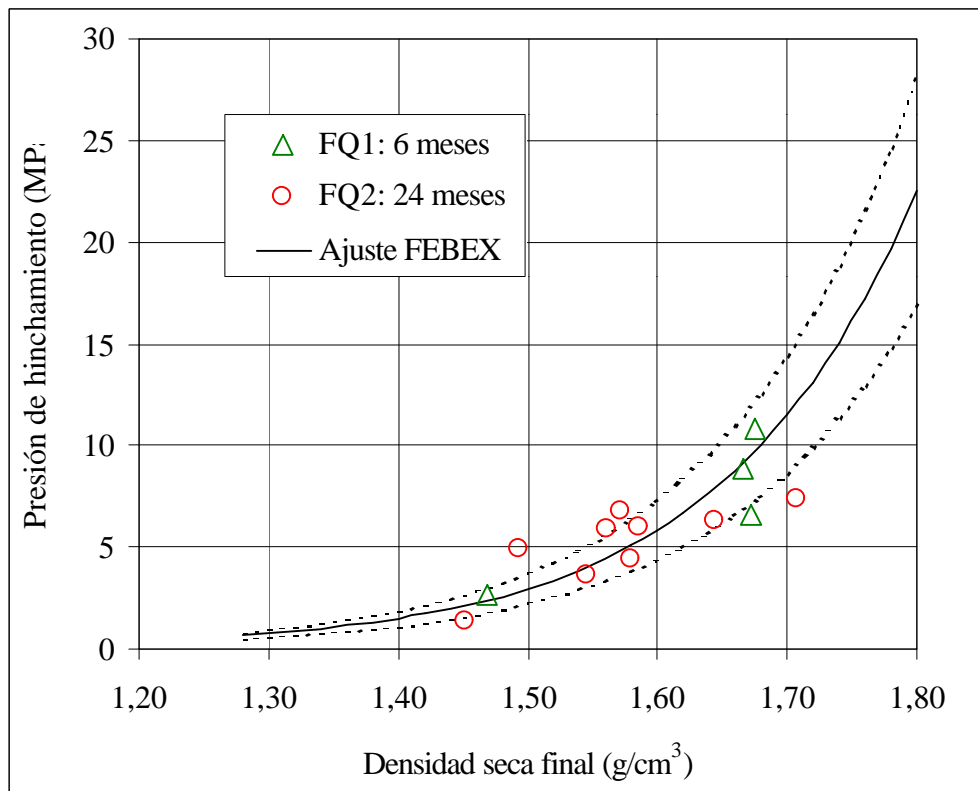


Figura 35: Valores de presión de hinchamiento de muestra no tratada (ajuste FEBEX) y de muestras sometidas a tratamiento termohidráulico durante diferentes tiempos

Por otra parte, la representación del porcentaje de desviación del valor de presión de hinchamiento obtenido respecto al teórico en función de la posición de la muestra (Figura 36), revela que la disparidad entre los valores teóricos y los observados no está relacionada con la distancia al calentador. Este dato confirma que las presiones de hinchamiento observadas están relacionadas exclusivamente, como ya se ha dicho, con la variación de densidad seca.

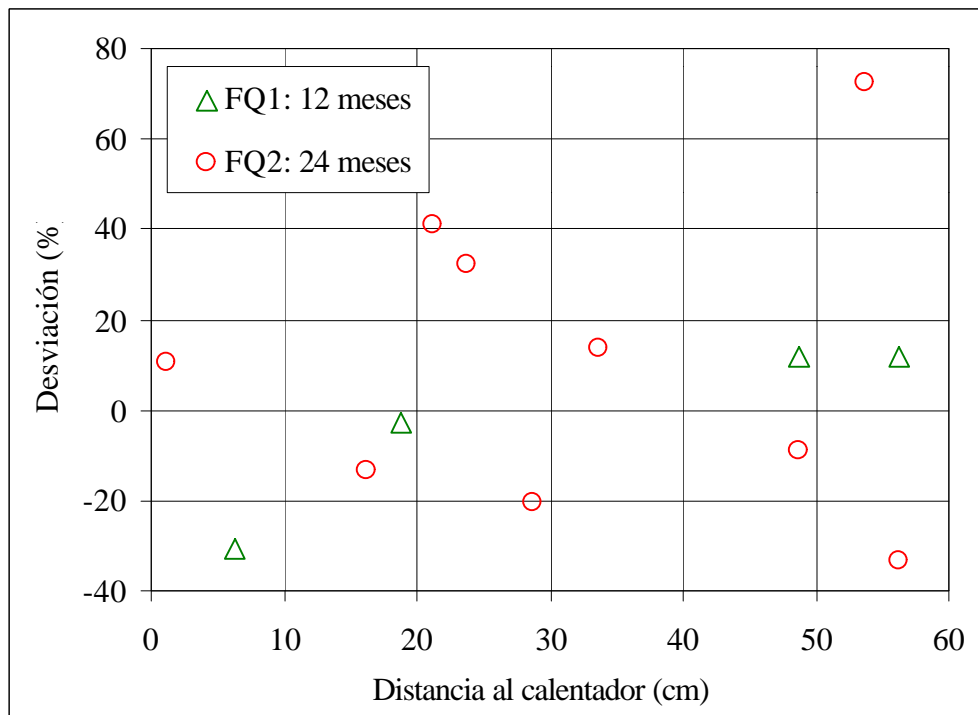


Figura 36: Desviación de los valores de presión de hinchamiento de muestra proveniente de ensayos termo-hidráulicos de diferente duración respecto a los valores esperados para muestra no tratada

La Figura 37 muestra la comparación de los valores de presión de hinchamiento obtenidos para la muestra tratada remoldeada con los valores promedio para muestra no tratada de la misma densidad (ec. 3). Se observa claramente que los valores de presión de hinchamiento de muestra tratada son superiores a los de la muestra FEBEX no tratada, incluso por encima de los límites de variación observados para esta propiedad. Como se muestra en la Figura 38, la presión de hinchamiento de las muestras provenientes del ensayo FQ1/2 (tratamiento durante 6 meses) es en conjunto un 44 % superior a la esperada para muestra no tratada de la misma densidad seca; la de la muestra tratada durante 12 meses (ensayo FQ1) es un 46 % mayor; y la de muestra tratada durante 24 meses (ensayo FQ2) es un 20 % mayor. Estos últimos datos permiten afirmar que la capacidad de hinchamiento de la muestra remoldeada no está relacionada con el tiempo de tratamiento termo-hidráulico previo.

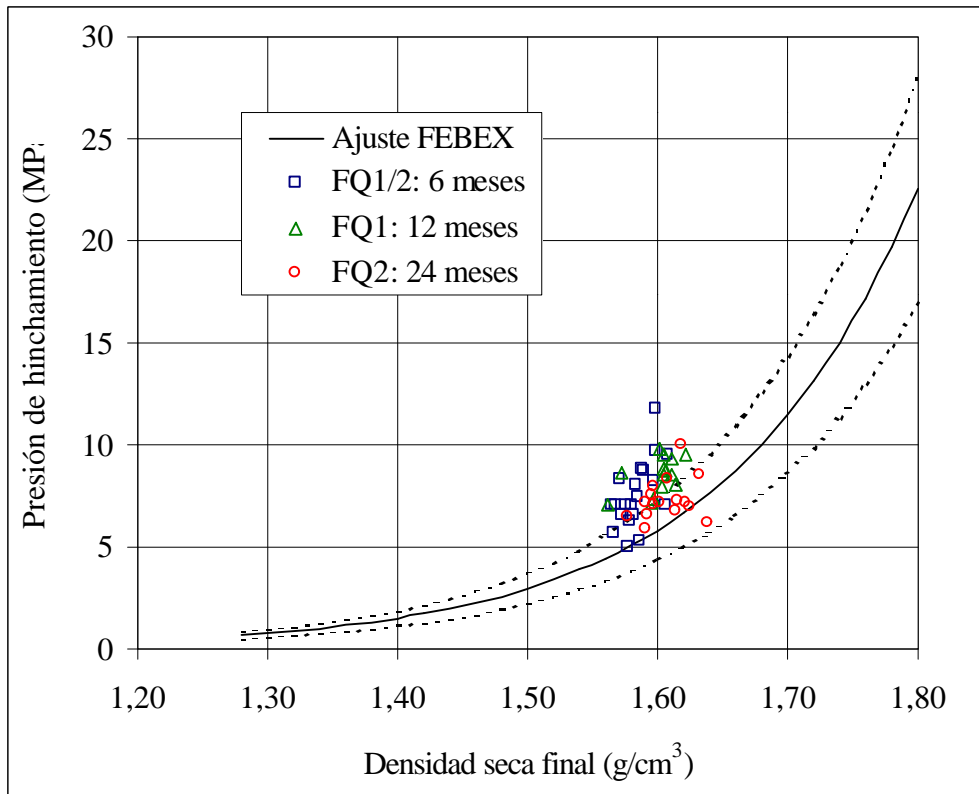


Figura 37: Comparación de la presión de hinchamiento de muestra remoldeada sometida a tratamiento termo-hidráulico durante diferentes tiempos respecto a la de muestra no tratada de la misma densidad (ajuste FEBEX)

Por otra parte, la Figura 38 muestra que este aumento de la presión de hinchamiento de la muestra tratada remoldeada respecto a la no tratada no está relacionado con la posición de la muestra durante el tratamiento termo-hidráulico, es decir, ni con la temperatura del tratamiento ni con la humedad que llegó a alcanzar durante él.

Por tanto, el remoldeo efectuado con la muestra sometida a tratamiento termo-hidráulico antes de la determinación de su presión de hinchamiento parece ser la única causa de que ésta presente valores de presión de hinchamiento superiores a los esperables para muestra no tratada.

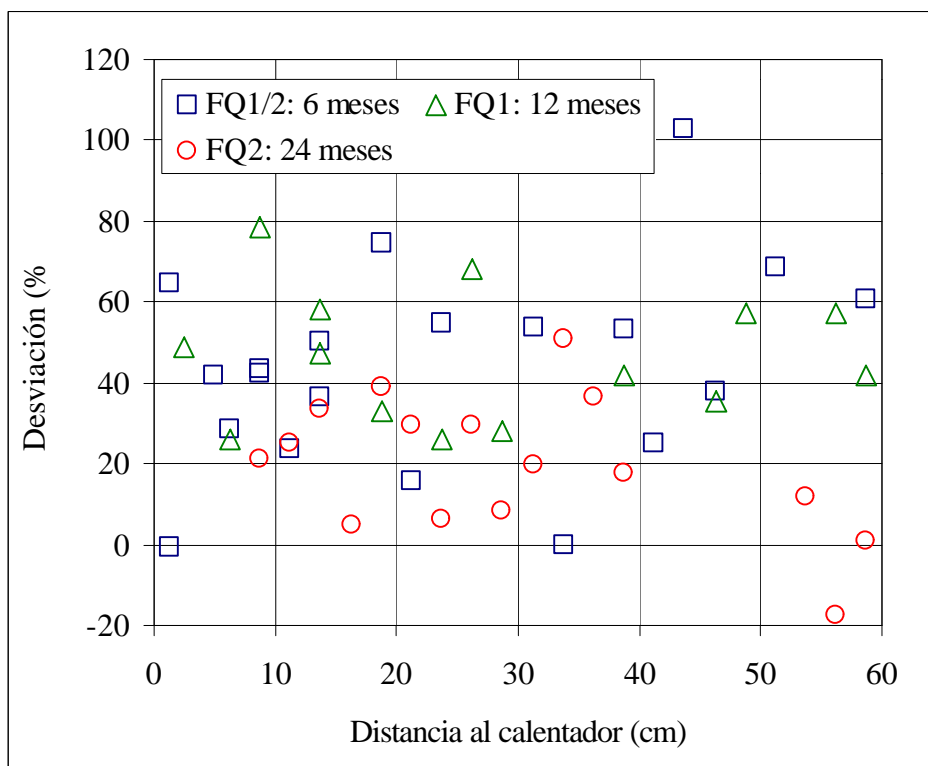


Figura 38: Desviación de los valores de presión de hinchamiento de muestra proveniente de ensayos termo-hidráulicos de diferente duración, remoldeada y compactada a densidad seca de $1,60 \text{ g/cm}^3$, respecto a los valores esperados para muestra no tratada

5.4.4. Permeabilidad

Los valores de permeabilidad de la muestra tratada están fundamentalmente correlacionados con la densidad seca, por lo que, como puede apreciarse en la Figura 39, tienden a ser menores hacia el calentador, como consecuencia del aumento de densidad seca que la desecación produce en esta zona. En la situación real de la barrera, esta disminución de permeabilidad debida al aumento de densidad hacia el contenedor tendrá poca repercusión, puesto que, durante la fase no saturada, la permeabilidad depende fundamentalmente del grado de saturación, y sólo en menor medida de la densidad seca. Una vez alcanzada la saturación, la densidad seca en las proximidades del contenedor habrá vuelto a disminuir debido al hinchamiento de la bentonita, y por tanto, la permeabilidad saturada aumentará hasta valores similares a los del resto de la barrera. Es decir, esta disminución de permeabilidad observada es transitoria y tiene escasa repercusión sobre la dinámica de saturación de la barrera.

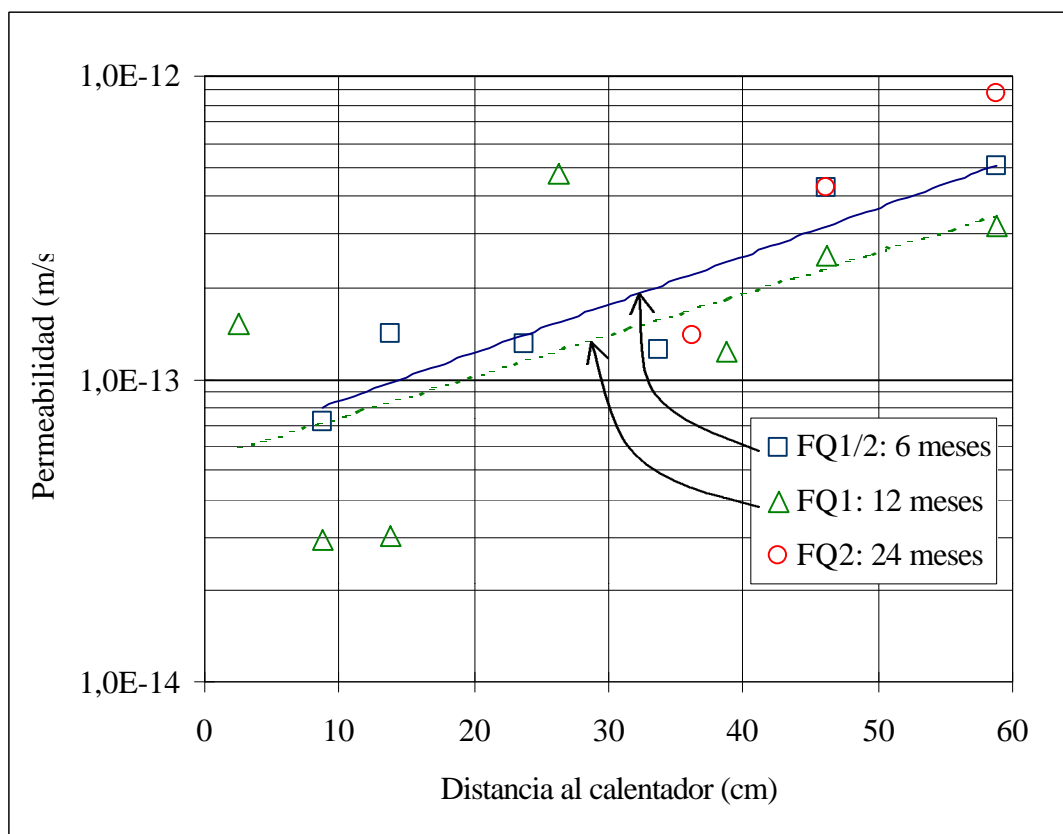


Figura 39: Valores de permeabilidad obtenidos en muestra sometida a tratamiento termo-hidráulico durante diferentes tiempos en función de la distancia al calentador

Por otra parte, los valores de permeabilidad obtenidos para la muestra sometida a tratamiento termo-hidráulico de cualquier duración son superiores a los esperables para muestra no tratada de la misma densidad seca, como puede observarse en la Figura 40. Este incremento respecto al valor teórico es independiente de la posición ocupada por la muestra durante el tratamiento (Figura 41), es decir, de su proximidad al calentador, y por tanto, de si la muestra ha sido previamente desecada o no. Así mismo, no se observa que el incremento esté relacionado con la duración del tratamiento termo-hidráulico, ya que los valores obtenidos para el ensayo de 6 meses de duración son un 218 % superiores a los teóricos, los obtenidos en el ensayo de 12 meses de duración un 59 % superiores y los obtenidos en el ensayo de 24 meses de duración un 220 % superiores a los teóricos. El método de preparación de las pastillas para realizar la medida tampoco justifica este aumento (*cf.* sección 5.1.1.3). Por tanto, este aspecto cuya importancia podría ser significativa, puesto que condiciona la cinética hidráulica de la barrera – queda sin interpretar.

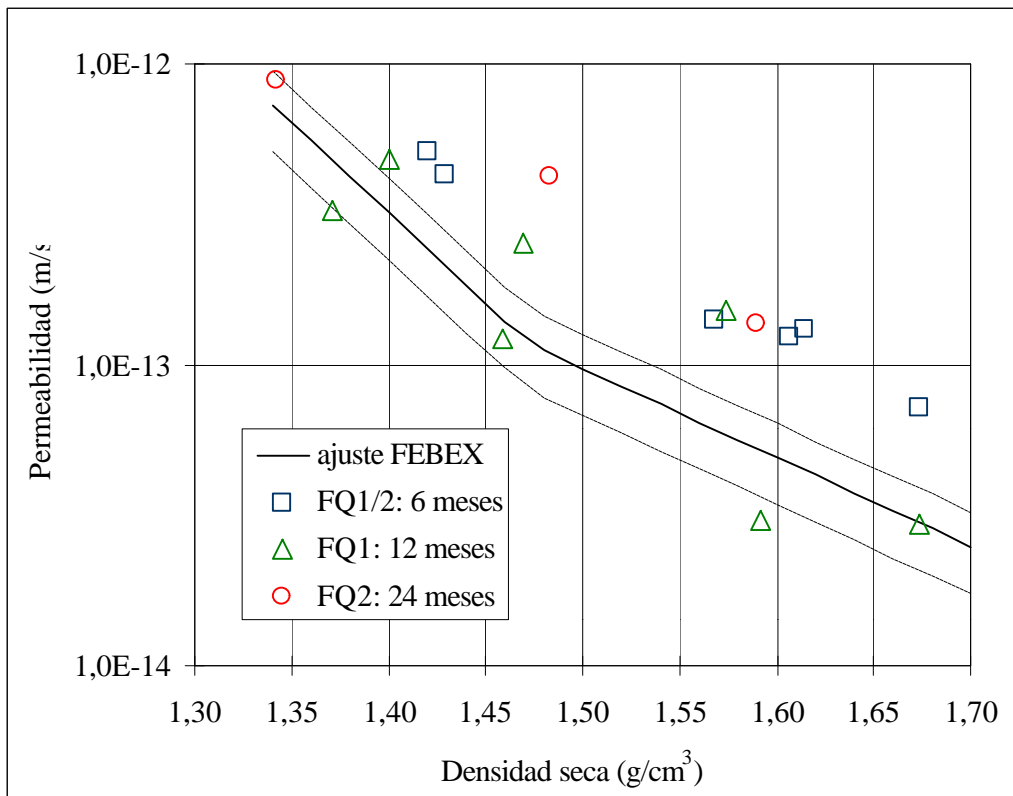


Figura 40: Valores de permeabilidad obtenidos en muestra no tratada (ajuste FEBEX) y sometida a tratamiento termo-hidráulico durante diferentes tiempos

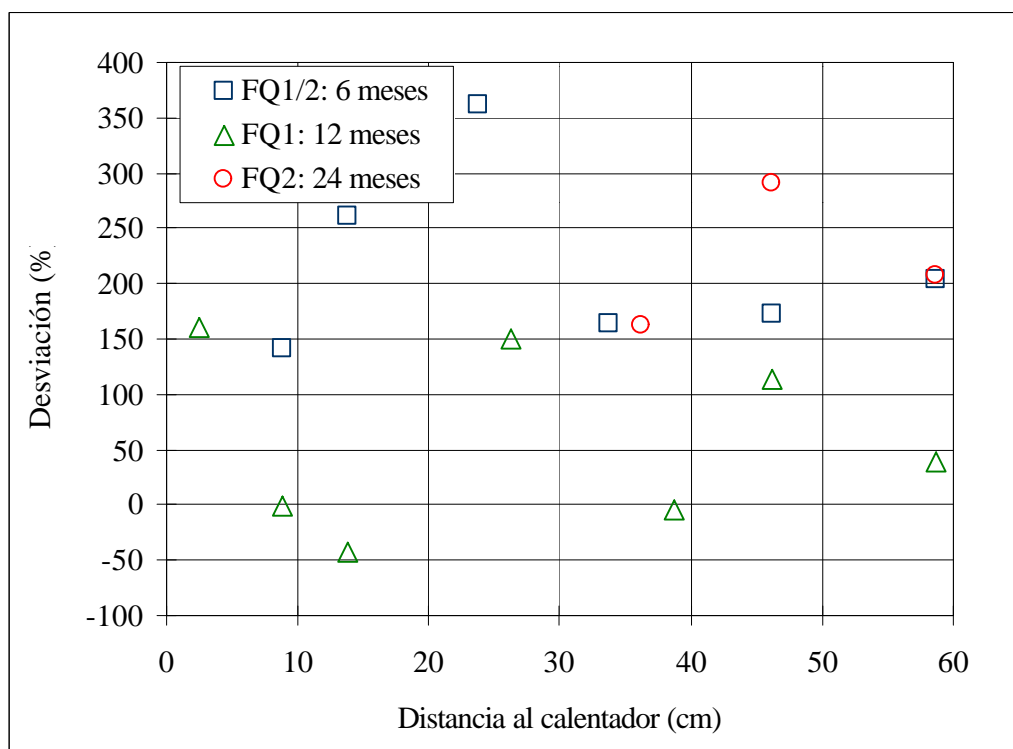


Figura 41: Desviación de los valores de permeabilidad de muestra proveniente de ensayos termo-hidráulicos de diferente duración respecto a los valores esperados para muestra no tratada

6. CONCLUSIONES

En el contexto del Proyecto FEBEX se han llevado a cabo ensayo termo-hidráulicos en celdas, en los que se ha sometido la bentonita compactada a condiciones similares a las de la barrera arcillosa de ingeniería en un almacenamiento de residuos radiactivos de alta actividad según el concepto AGP español (ENRESA 1995). En concreto se han pretendido simular las condiciones de contorno del ensayo en maqueta del Proyecto FEBEX. Para ello, en celdas herméticas se han apilado bloques de bentonita compactada con su humedad higroscópica a densidad seca de $1,65 \text{ g/cm}^3$, hasta conseguir una altura de 60 cm (6 bloques de 10 cm de altura), equivalente al espesor de la barrera en el ensayo en maqueta. El diámetro de estas probetas ha sido de 7 cm. La bentonita ha estado en contacto con un calentador metálico a $100 \text{ }^\circ\text{C}$ por un extremo, mientras que por el otro se ha mantenido una temperatura constante próxima a la ambiente. Se ha hidratado la bentonita con agua granítica inyectada a una presión de 1,2 MPa por el extremo contrario al del calentamiento. En este informe se han analizado tres ensayos de duración de 6, 12 y 24 meses (ensayos FQ1/2, FQ1 y FQ2). Del estudio de los resultados obtenidos se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- La distribución de temperaturas en el interior de la bentonita revela que la duración del tratamiento termo-hidráulico hace disminuir la temperatura de la bentonita, como consecuencia del aumento de conductividad térmica asociado al aumento de humedad. Por otra parte, debido a la geometría de las celdas y al tipo de material utilizado en su fabricación, se ha producido una disipación de calor que hace que las temperaturas medidas sean en general menores que las que se están registrando en la maqueta (la relación superficie/masa de la columna de bentonita en estos ensayos es mucho mayor que la del ensayo en maqueta).
- A los seis meses de tratamiento, los 20 cm más próximos al calentador han sufrido una disminución de humedad y un incremento de la densidad seca que no se recuperan tras dos años de tratamiento, puesto que el frente de hidratación no llega a afectar a estas zonas. Sin embargo, en ninguno de los ensayos se han observado grietas de retracción al desmontarlos.
- Tras dos años de tratamiento, la hidratación sólo ha producido aumento de humedad en un frente de 40 cm, y sólo se ha producido el sellado de los dos primeros bloques, es decir, de una interfase situada a 10 cm de la superficie de hidratación. Esta interfase queda también sellada tras sólo un año de tratamiento. El aumento de humedad lleva asociada una disminución de densidad seca. Esto contribuye a que los grados de saturación no alcancen el 100 % en ninguna sección. En concreto, sólo se registran grados de saturación mayores del 90 % en los 3 cm más próximos al frente de hidratación en el ensayo de 6 meses de duración, en los 8 cm primeros en el de 12 meses de duración, y en los 10 cm primeros en el de 24 meses de duración.
- La holgura entre los bloques de bentonita y la pared de teflón ha permitido el flujo preferente de agua por esta interfase, con lo que la periferia de los bloques tiene una humedad algo mayor que su interior, aunque la diferencia no es significativa. Una situación análoga se dará en la barrera, debido al hueco inicial entre bloques y pared de la galería y entre los bloques entre sí. Así mismo, debido a la deformabilidad de las celdas (que están fabricadas en teflón) se ha producido una disminución generalizada

de la densidad seca de la bentonita, mayor en los ensayos más largos, en los que se alcanza mayor humedad y hay mayor hinchamiento.

- La disminución de humedad en las zonas más calientes no afectadas por el frente de hidratación conlleva una disminución de la permeabilidad no saturada, lo que podría retardar el proceso de saturación. El aumento de la densidad seca en estas zonas contribuye en menor medida a esta disminución de permeabilidad.
- Esta disminución de permeabilidad en las zonas desecadas es sólo transitoria, puesto que una vez que se haya producido la saturación y que la densidad seca haya disminuido hasta valores similares a los iniciales por el hinchamiento asociado a la saturación, la permeabilidad volverá a aumentar. Las medidas de conductividad hidráulica realizadas en la muestra tratada revelan incluso una mayor permeabilidad que en la muestra no tratada, y una fuerte dependencia de la densidad seca.
- La capacidad de hinchamiento de la muestra está condicionada por su densidad y humedad inicial, manteniéndose en valores similares a los esperados para muestra no tratada.
- El remoldeo de la muestra (es decir, su estabilización de humedad en las condiciones del laboratorio, desagregación y compactación posterior) produce un aumento de su capacidad de hinchamiento y de su presión de hinchamiento, por lo que esta práctica se desaconseja como método para comprobar las variaciones ocasionadas por el tratamiento termo-hidráulico en estas propiedades.

7. BIBLIOGRAFÍA

- ENRESA (1995): Almacenamiento geológico profundo de residuos radiactivos de alta actividad (AGP). Diseños conceptuales genéricos. 11/95. Madrid. 105 pp.
- ENRESA (1998): FEBEX. Bentonite: origin, properties and fabrication of blocks. *Publicación Técnica* 4/98. Madrid.
- MARTÍN, M. & CUEVAS, J.(2000): Ensayos THG en celdas. Resultados de los ensayos en celdas grandes de transporte con agua granítica (celdas FQ). UAM. Madrid. 24 pp.
- PUSCH, R.(1994): Waste disposal in rock. *Developments in Geotechnical Engineering* 76. Elsevier. Amsterdam. 490 pp.
- UNE 7045 (1952): Determinación de la porosidad de un terreno.
- UNE 103-300-93: Determinación de la humedad de un suelo mediante secado en estufa. AENOR.
- VILLAR, M.V.(1996): Presión de hinchamiento en edómetro. *Procedimiento específico CIEMAT IMA/X8/BI-F21*. (70-IMA-G-0-21).
- VILLAR, M.V.(1997): Permeabilidad de materiales expansivos. *Procedimiento específico CIEMAT IMA/X8/BI-F14*. (70-IMA-G-0-14).
- VILLAR, M.V.; MARTÍN, P.L.; CUEVAS, J. & BARCALA, J.M.(1998): Diseño, fabricación y montaje de las celdas grandes para ensayos termohidráulicos. *Informe Técnico CIEMAT/DIAE/54111/12/98*. 70-IMA-L-0-57. Madrid. 12 pp.
- VILLAR, M.V.(1999): Ensayos THM para el Proyecto FEBEX. Versión 0. CIEMAT/DIAE/54111/9/99. FEBEX report 70-IMA-L-0-66.
- VILLAR, M.V. (2000a): Hinchamiento bajo carga. *Procedimiento específico CIEMAT PE-IA-CH-03*. (70-IMA-G-0-20).
- VILLAR, M.V.(2000b): Caracterización termo-hidro-mecánica de una bentonita de Cabo de Gata. *Tesis Doctoral*. Universidad Complutense de Madrid.