

FEBEX

**FULL-SCALE ENGINEERED BARRIERS EXPERIMENT
IN CRYSTALLINE HOST ROCK**

BENTONITA: ORIGEN, PROPIEDADES Y FABRICACION DE BLOQUES



FEBEX

**FULL-SCALE ENGINEERED BARRIERS EXPERIMENT
IN CRYSTALLINE HOST ROCK**

BENTONITA: ORIGEN, PROPIEDADES Y FABRICACION DE BLOQUES



AUTORES

*CENTRO DE INVESTIGACIONES ENERGÉTICAS, MEDIOAMBIENTALES
Y TECNOLÓGICAS (CIEMAT)*

M.V. Villar, P.L. Martín, M. Pelayo, B. Ruiz, P. Rivas

*UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA. DEPARTAMENTO
DE INGENIERÍA DEL TERRENO (UPC-DIT)*

E. Alonso, A. Lloret, X. Pintado, A. Gens

*CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS.
ESTACIÓN EXPERIMENTAL DEL ZAIDÍN (CSIC - Zaidín)*

J. Linares, F. Huertas, E. Caballero, C. Jiménez de Cisneros

*ASOCIACIÓN PARA LA INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO INDUSTRIAL
DE LOS RECURSOS NATURALES (AITEMIN)*

J. Obis, A. Pérez, J. Velasco

INDICE



ABSTRACT 1

RESUMEN 5

1. INTRODUCCIÓN 9

2. ESTUDIOS ANTERIORES AL FEBEX 13

 2.1. Estudio de arcillas españolas potencialmente utilizables en barreras de ingeniería 15

 2.2. Estudio de las zonas de cabo de gata y cuenca terciaria de Madrid 15

 2.3. Estudios de longevidad 17

 2.4. Estudio del comportamiento THM de la bentonita S-2 (1991-1995) 17

 2.5. Resumen de los ensayos de caracterización de la bentonita S-2, anteriores al FEBEX 17

 2.5.1. Origen 18

 2.5.2. Composición mineralógica y química 18

 2.5.3. Propiedades de identificación 18

 2.5.4. Parámetros de resistencia 18

 2.5.5. Ensayos edométricos 20

 2.5.6. Ensayos edométricos con succión controlada 20

 2.5.7. Presión de hinchamiento 21

 2.5.8. Conductividad hidráulica saturada 21

 2.5.9. Permeabilidad relativa 23

 2.5.10. Relación succión/humedad 23

 2.5.11. Calor específico y conductividad térmica 24

 2.5.12. Efecto del tamaño máximo de grano en el comportamiento de la bentonita 25

 2.5.13. Agua intersticial 25

 2.5.14. Porosidad 26

 2.5.15. Sorción de cesio 26

 2.5.16. Análisis bacteriológico 27

- 3. SELECCIÓN Y TRATAMIENTO DE LA BENTONITA FEBEX. 29
 - 3.1. Selección 31
 - 3.1.1. Características de la corta. 31
 - 3.1.2. Muestreo de la bentonita en la corta y en la pila de acopio 31
 - 3.1.3. Ensayos de laboratorio. 33
 - 3.1.3.1. Preparación de las muestras 33
 - 3.1.3.2. Procedimientos de ensayo 33
 - 3.1.3.3. Resultados de los ensayos y selección de la bentonita 33
 - 3.2. HOMogeneización y secado en la cantera 33
 - 3.2.1. Homogeneización, secado y muestreo 33
 - 3.2.2. Ensayos de laboratorio. 36
 - 3.3. Tratamiento en la fábrica, envasado y muestreo 37
 - 3.3.1. Desmenuzado 37
 - 3.3.2. Secado 37
 - 3.3.3. Clasificación 39
 - 3.3.4. Envasado y muestreo 39
- 4. ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN 41
 - 4.1. Muestras para los ensayos de laboratorio. 43
 - 4.2. Propiedades de identificación 43
 - 4.2.1. Humedad. 43
 - 4.2.2. Límites de Atterberg 43
 - 4.2.3. Granulometría. 45
 - 4.2.4. Superficie específica externa. 45
 - 4.2.5. Peso específico 47
 - 4.3. Caracterización mineralógica y química 47
 - 4.3.1. Caracterización mineralógica. 47
 - 4.3.1.1. Difracción de rayos X 47
 - 4.3.1.2. Análisis térmico diferencial y termogravimetría (ATD y TG) 48
 - 4.3.2. Caracterización química 63
 - 4.3.3. Fórmula estructural 65
 - 4.3.4. Sales solubles, conductividad, pH y fases amorfas 65
 - 4.3.5. Complejo de cationes de cambio 68
 - 4.3.6. Superficie específica total. 69
 - 4.4. Ensayos mecánicos, hidráulicos y térmicos 70
 - 4.4.1. Ensayos mecánicos 70

4.4.2. Ensayos hidráulicos 85

4.4.3. Ensayos térmicos 96

4.5. Capacidad de sorción 101

4.6. Caracterización microbiológica 102

5. DISEÑO, FABRICACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LOS BLOQUES DE BENTONITA..... 107

5.1. General 109

5.2. Ensayo en “maqueta” 109

5.2.1. Diseño de los bloques 109

5.2.2. Fabricación de los moldes..... 111

5.2.3. Fabricación de los bloques 112

5.2.3.1. Pruebas previas 112

5.2.3.2. Fabricación 113

5.2.4. Embalaje y almacenamiento de los bloques 114

5.2.5. Caracterización de los bloques 115

5.3. Ensayo “in situ” 115

5.3.1. Diseño de los bloques y de los moldes 116

5.3.2. Fabricación de los moldes..... 119

5.3.3. Fabricación de los bloques 120

5.3.3.1. Proceso de fabricación 120

5.3.3.2. Control de calidad y características de los bloques de bentonita 122

5.3.4. Embalaje y almacenamiento de los bloques 126

6. CONCLUSIONES..... 129

6.1. Origen y aspectos generales de la bentonita FEBEX..... 131

6.2. Composición mineralógica y química 131

6.3. Propiedades de identificación 132

6.4. Presión de hinchamiento 134

6.5. Relación succión/humedad 134

6.6. Superficie de estado 136

6.7. Conductividad hidráulica saturada 136

6.8. Conductividad térmica..... 136

6.9. Bloques de bentonita 138

6.10. Líneas generales de la caracterización en la etapa operacional 138

7. REFERENCIAS 141

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1	Valores experimentales y curva de regresión de la presión de hinchamiento en función de la densidad seca de la bentonita S-2 mezclada con diferentes proporciones de arena de cuarzo	23
Figura 2.2	Valores experimentales y rectas de regresión entre el logaritmo de la conductividad hidráulica (en m/s) y la densidad seca (g/cm ³) de la bentonita S-2	24
Figura 2.3	Curva succión/humedad para la bentonita S-2	25
Figura 2.4	Conductividad térmica de la bentonita S-2 en función del grado de saturación	26
Figura 3.1	Esquema de la Corta Cortijo de Archidona con indicación de la posición de las calicatas de muestreo	32
Figura 3.2	Aspecto de la parva el segundo día del proceso de homogeneización	36
Figura 3.3	Aspecto de la parva una vez pasado el rotavátor.	37
Figura 4.1	Curva granulométrica media, con indicación de las desviaciones estándar, para las 11 muestras analizadas	46
Figura 4.2	Curvas granulométricas	46
Figura 4.3	Diagrama de difracción de rayos X (DRX) de la muestra A-1 (muestra total)	50
Figura 4.4	Diagrama de difracción de rayos X (DRX) de la muestra A-5 (muestra total)	50
Figura 4.5	Diagrama de difracción de rayos X (DRX) de la muestra F-2 (muestra total)	51
Figura 4.6	Diagrama de difracción de rayos X (DRX) de la muestra F-65 (muestra total)	51
Figura 4.7	Diagrama de difracción de rayos X (DRX) de la muestra F-119 (muestra total)	52
Figura 4.8	Diagrama de difracción de rayos X (DRX). Muestra E-1 ([*]) (muestra total)	52
Figura 4.9	Diagrama de difracción de rayos X (DRX) de la muestra E-2 (muestra total)	53
Figura 4.10	Diagrama de difracción de rayos X (DRX) de la muestra E-3 (muestra total)	53
Figura 4.11	Diagramas de difracción de rayos X (DRX) de la muestra A-1 (Agregado orientado de la fracción <2µm)	54
Figura 4.12	Diagramas de difracción de rayos X (DRX) de la muestra F-2 (Agregado orientado de la fracción <2µm)	55
Figura 4.13	Diagramas de difracción de rayos X (DRX) de la muestra F-65 (Agregado orientado de la fracción <2µm)	56
Figura 4.14	Diagramas de difracción de rayos X (DRX) de la muestra A-1 realizadas en la UAM (Agregado orientado y glicolado de la fracción <2µm)	57
Figura 4.15	Diagramas de difracción de rayos X (DRX) de la muestra F-2 realizadas en la UAM (Agregado orientado y glicolado de la fracción <2µm)	57
Figura 4.16	Diagramas de difracción de rayos X (DRX) de la muestra F-65 realizadas en la UAM (Agregado orientado y glicolado de la fracción <2µm)	58
Figura 4.17	Diagrama de difracción de rayos X (DRX) de la muestra E-1 (Agregado orientado de la fracción <2µm)	58
Figura 4.18	Diagrama de difracción de rayos X (DRX) de la muestra E-1 (Agregado orientado + etilenglicol de la fracción <2µm)	59

Figura 4.19 Diagrama de difracción de rayos X (DRX) de la muestra E-2
(Agregado orientado de la fracción <2µm). 59

Figura 4.20 Diagrama de difracción de rayos X (DRX) de la muestra E-2
(Agregado orientado + etilenglicol de la fracción <2µm) 60

Figura 4.21 Diagrama de difracción de rayos X (DRX) de la muestra E-3
(Agregado orientado de la fracción <2µm). 60

Figura 4.22 Diagrama de difracción de rayos X (DRX) de la muestra E-3
(Agregado orientado + etilenglicol de la fracción <2µm) 61

Figura 4.23 Diagrama de ATD de la muestra A-1 61

Figura 4.24 Diagrama de ATD de la muestra A-5 62

Figura 4.25 Diagrama de ATD-TG de la muestra 70-IMA-3-4-0. 62

Figura 4.26 Presión de hinchamiento para muestras F y A y curva ajustada previamente para la bentonita S-2 71

Figura 4.27 Hinchamiento en función del tiempo para una carga vertical de 0,5 MPa (70-IMA-3-4-0, muestras A) 74

Figura 4.28 Evolución en el tiempo de las deformaciones por hinchamiento durante los ensayos
de humectación bajo carga. Tensión vertical = 0,01 Mpa. 74

Figura 4.29 Evolución en el tiempo de las deformaciones por hinchamiento durante los ensayos
de humectación bajo carga. Tensión vertical = 0,05 Mpa. 75

Figura 4.30 Evolución en el tiempo de las deformaciones por hinchamiento durante los ensayos
de humectación bajo carga. Tensión vertical = 0,1 Mpa. 75

Figura 4.31 Evolución en el tiempo de las deformaciones por hinchamiento durante los ensayos
de humectación bajo carga. Tensión vertical = 0,2; 0,5 Mpa 76

Figura 4.32 Evolución en el tiempo de las deformaciones por hinchamiento durante los ensayos
de humectación bajo carga. Tensión vertical = 1; 1,2; 2,0 Mpa 76

Figura 4.33 Evolución en el tiempo de las deformaciones por hinchamiento durante los ensayos
de humectación bajo carga. Tensión vertical = 5; 10 Mpa. 77

Figura 4.34 Deformaciones por hinchamiento para diferentes cargas verticales aplicadas.
El valor de la densidad seca inicial se indica cerca de cada punto. 77

Figura 4.35 Deformaciones por hinchamiento para diferentes cargas verticales aplicadas
y densidades secas iniciales 78

Figura 4.36 Índice de poros final después de los ensayos de humectación bajo carga 78

Figura 4.37 Evolución en el tiempo de las deformaciones por cambio de succión.
Desde la inicial (130 MPa) a 97 Mpa. 79

Figura 4.38 Evolución en el tiempo de las deformaciones por cambio de succión. Desde 97 a 360 Mpa 80

Figura 4.39 Evolución en el tiempo de las deformaciones por cambio de succión. Desde 360 a 135 Mpa 80

Figura 4.40 Evolución en el tiempo de las deformaciones por cambio de succión. Desde 135 a 22 Mpa 81

Figura 4.41 Evolución en el tiempo de las deformaciones por cambio de succión. Desde 22 a 0 Mpa 81

Figura 4.42 Relación succión-índice de poros en los ensayos edométricos. Carga vertical de 0,03 Mpa. 82

Figura 4.43 Relación succión-índice de poros en los ensayos edométricos. Carga vertical 0,21 Mpa. 82

Figura 4.44 Relación succión-índice de poros en los ensayos edométricos. Carga vertical 1,21 Mpa. 83

Figura 4.45	Resultados de todos los ensayos de humectación mostrando la variación del índice de poros con las cargas verticales aplicadas para diferentes valores de succión de equilibrio. También se indican los ensayos de inundación en edómetro convencional	83
Figura 4.46	Módulo elástico de corte para varias cargas de confinamiento y deformaciones tangenciales	84
Figura 4.47	Módulo de corte a pequeñas deformaciones tangenciales para varios grados de saturación y densidades secas	86
Figura 4.48	Relación entre la carga normal-desplazamiento en una muestra de bentonita compactada a un grado de saturación de 0,15.	87
Figura 4.49	Relación entre la carga normal-desplazamiento en una muestra de bentonita compactada a un grado de saturación de 0,45.	88
Figura 4.50	Relación entre la carga normal-desplazamiento en una muestra de bentonita compactada a un grado de saturación de 0,85.	89
Figura 4.51	Valores de conductividad hidráulica de las probetas ensayadas y líneas de regresión previamente obtenidas para la bentonita S-2	91
Figura 4.52	Evolución de los flujos de agua durante el ensayo de permeabilidad.	92
Figura 4.53	Evolución en el tiempo de las deformaciones verticales en los ensayos edométricos	93
Figura 4.54	Relación entre la permeabilidad saturada obtenida mediante ensayos edométricos y la densidad seca	94
Figura 4.55	Relación succión / humedad	96
Figura 4.56	Curvas succión/humedad para diferentes densidades y temperaturas.	97
Figura 4.57	Curva de succión/humedad para varias densidades y temperaturas	98
Figura 4.58	Conductividad térmica en función de la humedad, muestras F.	100
Figura 4.59	Conductividad térmica, medida en dirección paralela y perpendicular al esfuerzo de compactación, para la muestra 70-IMA-3-4-0	100
Figura 4.60	Conductividad térmica en función del grado de saturación para las muestras F y 70-IMA-3-4-0 y correlación obtenida previamente para la bentonita S-2.	102
Figura 4.61	Resultados de los ensayos de dilatación térmica	103
Figura 5.1	“Maqueta”: sección longitudinal.	110
Figura 5.2	“Maqueta”: sección transversal	110
Figura 5.3	Representación esquemática de los bloques A, B, C y E	111
Figura 5.4	Ensayo de ajuste entre piezas para definir dimensiones de los moldes	113
Figura 5.5	Densidad seca media en función de la humedad de compactación obtenida en las pruebas previas de compactación de bloques	114
Figura 5.6	Distribución del tamaño de poros en las secciones superior (1), media (2) e inferior (3) de los bloques muestreados.	117
Figura 5.7	Ensayo “in situ”, sección longitudinal	117
Figura 5.8	Disposición de los bloques en zonas con y sin calentador	118
Figura 5.9	Dimensiones y forma de los bloques de bentonita	119
Figura 5.10	Vista de la matriz de un molde. Sobre la matriz están situados los dos punzones del molde	121
Figura 5.11	Vista de la caja portamatriz de un molde	121

Figura 5.12 Vista frontal de un molde montado en la prensa 122

Figura 5.13 Primer plano de bloque (BB-G-01) fabricado. 123

Figura 5.14 Primer plano de bloque (BB-G-04) fabricado. 123

Figura 5.15 Primer plano de cuatro bloques del tipo BB-G-05 dispuestos según su (futuro) montaje
después de haber sido cortados 124

Figura 5.16 Instantánea del proceso de embalaje de los bloques 127

Figura 5.17 Embalaje de bloques terminado. Obsérvese la base del embalaje (pallet), los protectores
de aristas superiores, el flejado, el etiquetado y el recubrimiento termorretráctil del conjunto. 128

Figura 6.1 Presión de hinchamiento en función de la densidad seca 135

Figura 6.2 Relación succión / humedad 135

Figura 6.3 Conductividad hidráulica saturada en función de la densidad seca 137

Figura 6.4 Conductividad térmica en función del grado de saturación. 137

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Fórmula estructural de la esmectita S-2 18

Tabla 2.2 Composición química y elementos traza de la muestra total de la bentonita S-2 19

Tabla 2.3 Capacidad de cambio y cationes intercambiables de la bentonita S-2, en meq/100 g 19

Tabla 2.4 Contenido en sílice, aluminio y hierro amorfos de la bentonita S-2..... 20

Tabla 2.5 Análisis de extractos acuosos de la bentonita S-2 20

Tabla 2.6 Propiedades de identificación de la bentonita S-2 20

Tabla 2.7 Parámetros de resistencia obtenidos en los ensayos triaxiales realizados en probetas
de bentonita S-2 saturadas de $p_d=1,60\text{ g/cm}^3$ 21

Tabla 2.8 Parámetros de resistencia obtenidos en ensayos triaxiales con probetas de bentonita S-2
no saturadas de $p_d=1,65\text{ g/cm}^3$ y diferentes humedades 22

Tabla 2.9 Parámetros de resistencia obtenidos en ensayos triaxiales con probetas no saturadas de bentonita
S-2 fabricadas con la humedad de equilibrio en las condiciones de laboratorio de la arcilla
y diferentes densidades iniciales 22

Tabla 2.10 Parámetros edométricos. Bentonita S-2 22

Tabla 2.11 Composición química del agua intersticial de la bentonita S-2 27

Tabla 2.12 Valores de K_d (ml/g) en función del pH y de la concentración de Cs en los ensayos
a fuerza iónica 0,004 M. Bentonita S-2 28

Tabla 2.13 Valores de K_d (ml/g) obtenidos para la bentonita S-2 en los ensayos a fuerzas iónicas
de 0,01 M y 0,1 M 28

Tabla 2.14 Análisis bacteriológico preliminar de la bentonita S-2 28

Tabla 3.1 Resultados de ensayos en muestras de la corta..... 34

Tabla 3.2 Resultados de ensayos en muestras de calicata central de la corta..... 35

Tabla 3.3 Resultados de ensayos en muestras de la pila de acopio 35

Tabla 3.4 Resultados de ensayos en muestras de la pila de acopio después de su homogeneización..... 38

Tabla 4.1 Propiedades de identificación 44

Tabla 4.2 Límites de Atterberg 45

Tabla 4.3 Reflexiones y factores reflectantes 47

Tabla 4.4 Composición mineralógica semicuantitativa de la muestra total..... 49

Tabla 4.5 Composición química de la muestra total (CIEMAT) 64

Tabla 4.6 Análisis químico (CSIC-Zaidín) 65

Tabla 4.7 Elementos traza en la muestra total (CIEMAT) 66

Tabla 4.8 Composición química de la fracción menor de $2\text{ }\mu\text{m}$ homoionizada en Ca 67

Tabla 4.9 Fórmula estructural de la esmectita..... 67

Tabla 4.10 Análisis del extracto acuoso 1:4 68

Tabla 4.11	Sílice libre en la fase sólida	69
Tabla 4.12	Fases amorfas	69
Tabla 4.13	Valores del complejo de cambio (CIEMAT)	70
Tabla 4.14	Valores del complejo de cambio (CSIC-Zaidín)	70
Tabla 4.15	Presiones de hinchamiento para densidades secas nominales de 1,60 y 1,70 g/cm ³	72
Tabla 4.16	Hinchamiento bajo carga vertical (muestra 70-IMA-3-4-0)	73
Tabla 4.17	Módulo elástico de corte obtenido en los ensayos en columna resonante	85
Tabla 4.18	Resistencia y rigidez en las muestras de bentonita compactadas a una densidad seca de 1,63 g/cm ³	85
Tabla 4.19	Valores de la conductividad hidráulica de las probetas ensayadas.	90
Tabla 4.20	Ensayos edométricos.	93
Tabla 4.21	Relación succión / humedad	95
Tabla 4.22	Conductividad térmica (M) en dirección paralela al esfuerzo de compactación	99
Tabla 4.23	Conductividad térmica, medida en dirección paralela y perpendicular al esfuerzo de compactación, de probetas compactadas de la muestra 70-IMA-3-4-0	101
Tabla 4.24	Ensayos de dilatación térmica.	103
Tabla 4.25	Resultados de sorción en “batch” y R _d	104
Tabla 4.26	Recuento de los diferentes grupos de bacterias encontrados en la muestra de bentonita 70-IMA-3-4-0	105
Tabla 5.1	Dimensiones nominales de los bloques (*)	112
Tabla 5.2	Humedades de la bentonita utilizada para las pruebas previas de compactación (en %)	113
Tabla 5.3	Características de los bloques (*)	115
Tabla 5.4	Resultados de caracterización de bloques.	116
Tabla 5.5	Dimensiones constructivas de los bloques.	119
Tabla 5.6	Número de bloques fabricados	125
Tabla 5.7	Lotes y muestras de inspección ejecutadas por AITEMIN	125
Tabla 5.8	Resultados de las pruebas no destructivas realizadas por AITEMIN	125
Tabla 5.9	Resultado de los ensayos destructivos realizados por AITEMIN.	126
Tabla 5.10	Embalajes utilizados para los distintos tipos de bloques	127
Tabla 6.1	Composición química de las bentonitas S-2 y FEBEX	132
Tabla 6.2	Valores medios del complejo de cambio.	133
Tabla 6.3	Propiedades de identificación	133

SIGLAS MAS UTILIZADAS

AITEMIN	Asociación para la Investigación y Desarrollo Industrial de los Recursos Naturales
AO	Agregado Orientado
AO+E	Agregado Orientado solvatado con Etilenglicol
ATD	Análisis Térmico Diferencial
CCC	Capacidad de Cambio de Cationes
CD	Consolidado Drenado (en ensayo triaxial)
C.E.	Conductividad Eléctrica
CEA	Commissariat à l'Énergie Atomique (Comisariado para la energía atómica)
CIEMAT	Centro de Investigaciones Energéticas, Medio Ambientales y Tecnológicas
CSIC-Barcelona	Consejo Superior de Investigaciones Científicas - Instituto Jaume Almera
CSIC-Zaidín	Consejo Superior de Investigaciones Científicas - Estación experimental del Zaidín
CU	Consolidado no drenado (Undrained) (en ensayo triaxial)
DRX	Difracción de Rayos X
ENRESA	Empresa Nacional de Residuos Radiactivos
EDTA	Acido Etilendiamino Tetracético
FEBEX	Full-Scale Engineered Barrier Experiment in Crystalline Host Rock (Experimento a escala real de barreras de ingeniería en roca cristalina)
FRX	Fluorescencia de Rayos X
HR	Humedad Relativa
I+D	Investigación y Desarrollo
MPN	Número más probable (Most Probable Number)
NAGRA	Nationale Genossenschaft für die Lagerung Radioaktiver Abfälle (Asociación cooperativa nacional para el almacenamiento de residuos radiactivos, Suiza)
RAA	Residuos radiactivos de Alta Actividad
RCS	Resistencia a la Compresión Simple
S-2	Muestra de bentonita proveniente del mismo yacimiento que la utilizada en el proyecto FEBEX (Cortijo de Archidona, Almería, España) pero que fue extraída entre 1989 y 1990
TG	Termogravimetría
THG	Termo-Hidro-Geoquímico
THM	Termo-Hidro-Mecánico
UAM	Universidad Autónoma de Madrid
UE	Unión Europea
UPC-DIT	Universidad Politécnica de Cataluña - Departamento de Ingeniería del Terreno

ABSTRACT

The aim of the FEBEX (Full-scale Engineered Barriers Experiment) Project is to study the behaviour of the near field components of a high-level radioactive waste (HLW) repository in crystalline rock, in accordance with a concept in which the canisters are surrounded by a clay barrier constructed of highly-compacted bentonite blocks. The FEBEX consists of a full scale "in situ" test (Grimsel, Switzerland) performed under natural conditions; a "mock-up" test (CIEMAT, Madrid), at almost full scale; and a series of laboratory tests designed to complement the information from the two large-scale tests.

During the pre-operational stage of the Project, the planning, design and installation of the two large-scale tests was accomplished, as well as the predictive modelling of their behaviour and the basic characterisation of the bentonite. This report is one of those concerning the pre-operational stage of the Project, and refers to the selection and characterisation of the FEBEX bentonite, and to the fabrication of the blocks used in the "in situ" and "mock-up" tests.

The clay utilised comes from the Cortijo de Archidona deposit (Almería), from where the S-2 clay used in previous ENRESA R&D Projects was also extracted. The results obtained in these Projects are summarised in Chapter 2, as some of the parameters considered in the predictive modelling were taken from the S-2 bentonite database, due to their not having yet been determined for the FEBEX clay.

For the FEBEX Project, about 300 tons of bentonite have been selected, homogenised and treated. At the factory, the clay was disaggregated and gently dried to a water content of around 14 %, all the material of particle size greater than 5 mm being rejected. The processed material was used for fabrication of the blocks for the two large-scale tests and for the laboratory tests. Samples of each processing lot were taken, and were mixed to obtain a single sample, whose reference is 70-IMA-3-4-0, which is the one used by all the participant laboratories. Mineralogical and chemical characterisation was performed at CIEMAT and CSIC-Zaidín, and the mechanical, hydraulic and thermal characterisation was carried out by CIEMAT and

UPC-DIT; the results obtained at each laboratory were consistent with the rest of the laboratories.

The FEBEX bentonite has a montmorillonite content greater than 90 %, with quartz, plagioclase, potassic feldspar, calcite and trydimite as accessory minerals. There may be illite/smectite interstratifications up to 15 %. The cation exchange capacity is higher than 100 meq/100g, and in the exchange complex 42 % Ca, 33 % Mg, 23 % Na and 2 % K are present.

The identification properties are not exactly those expected for a material with this mineralogy. Both the liquid limit (100 %) and the external specific surface (32 m²/g) are rather low, and the less than 2 µm fraction obtained after intense dispersion amounts to only 65 %. This might mean that the particles are agglutinated in a certain way (possibly by a siliceous cement), although the consequences of this on the behaviour of the clay have not been evaluated.

Swelling pressure and saturated hydraulic conductivity were obtained for specimens compacted to dry densities of 1.60 y 1.70 g/cm³, along with the thermal conductivity for these densities and different degrees of saturation. The suction/water content relationship and a preliminary state surface for decreasing suctions and small stress changes were determined.

The results obtained show slight variations with respect to the values obtained for the S-2 clay, with a tendency of the FEBEX clay to be more impervious and to develop a higher swelling pressure. However, for the performance assessment of a repository (PA), these differences are considered to be in the expected range of variation of the bentonite properties.

Two sets of blocks have been manufactured: one for the "mock-up" test, under the management and supervision of CIEMAT, and another for the "in situ" tests, under the management and supervision of AITEMIN. In both cases a crown design has been adopted, in order to minimise the void volume of the barrier. The blocks have been uniaxially compacted to pressures of 40 to 50 MPa, the resulting dry density being 1.77 g/cm³ for the blocks for the "mock-up" test and 1.70 g/cm³ for the blocks for the "in situ" test. Consequently, the average dry density of the installed barrier is 1.65 and 1.60 g/cm³, respectively.

RESUMEN

El Proyecto FEBEX (*Full-scale Engineered Barriers Experiment*) tiene como propósito el estudio del comportamiento de componentes del campo próximo de un almacenamiento de residuos radioactivos de alta actividad en roca cristalina, según un concepto en el que la barrera de ingeniería entre el contenedor de residuos y la roca almacén está constituida por bloques de bentonita compactada. El FEBEX consta de un ensayo "in situ", en condiciones naturales y escala real (Grimsel, Suiza); un ensayo en "maqueta" (CIEMAT, Madrid), a escala casi real; y una serie de ensayos de laboratorio para complementar la información de los dos ensayos a gran escala. Durante la etapa preoperacional del Proyecto se ha realizado la planificación, diseño e instalación de los ensayos a gran escala, la modelación predictiva de su comportamiento y la caracterización básica de la bentonita.

Este informe es uno de los correspondientes a la fase preoperacional del Proyecto FEBEX, y se refiere a la selección y caracterización de la bentonita FEBEX, así como a la fabricación de los bloques que se han utilizado en los ensayos "in situ" y en "maqueta".

La arcilla utilizada proviene del yacimiento Cortijo de Archidona (Almería), de donde también se extrajo la arcilla S-2, utilizada en otros proyectos de I+D de ENRESA anteriores al FEBEX. Los resultados obtenidos en estos proyectos se resumen en el capítulo 2, ya que algunos parámetros utilizados en la modelización predictiva se han tomado de los de la arcilla S-2, por no haberse determinado todavía para la arcilla FEBEX.

Para el Proyecto FEBEX se han seleccionado, homogeneizado y procesado unas 300 toneladas de bentonita, cuyo tratamiento en fábrica ha consistido en disgregación mecánica y secado suave hasta humedades alrededor del 14 %, rechazándose todo el material de tamaño superior a 5 mm. Este material se ha utilizado para la fabricación de los bloques de los dos ensayos a gran escala y en los ensayos de laboratorio. Se han tomado varias muestras de cada lote de procesado, por mezcla de las cuales se ha obtenido una muestra única, de referencia 70-IMA-3-4-0, con la que se ha trabajado en los laboratorios participantes. La caracterización mineralógica y química se ha llevado a cabo en CIEMAT y CSIC-Zaidín, y la caracterización mecánica, hidráulica y térmica se ha realizado en CIEMAT y UPC-DIT, habiéndose obtenido resultados concordantes entre todos los laboratorios.

La bentonita FEBEX tiene un contenido en montmorillonita superior al 90 %, con cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico, calcita y tridimita como minerales accesorios. Es posible que existan interstratificados illita/esmectita en proporciones de hasta el 15 %. La capacidad de cambio catiónico es superior a 100 meq/100g, y en el complejo de cambio aparece 42 % de Ca, 33 % de Mg, 23 % de Na y 2 % de K.

Las propiedades de identificación no corresponden a las esperadas para un material de esta mineralogía, ya que tanto el límite líquido (100 %) como la superficie específica externa (32 m²/g) son algo bajos y la proporción de fracción menor de 2 μm obtenida después de una dispersión intensa es sólo del 65 %, lo que hace suponer que se produce algún tipo de aglutinación de las partículas (quizá por cemento silíceo), cuyas consecuencias sobre el comportamiento de la arcilla no han sido evaluadas.

Se ha determinado la presión de hinchamiento y la conductividad hidráulica saturada de pastillas compactadas a densidad seca de 1,60 y 1,70 g/cm³, así como la conductividad térmica para estas densidades y diferentes grados de saturación. Se ha determinado también la relación succión/humedad y una superficie de estado preliminar para succiones decrecientes y con cambios pequeños de tensiones.

Los resultados obtenidos muestran ligeras variaciones respecto a los valores obtenidos para la arcilla S-2, con una tendencia de la arcilla FEBEX a ser más impermeable y desarrollar mayor presión de hinchamiento. Sin embargo, de cara a la evaluación del comportamiento de un almacenamiento (PA), se considera que estas diferencias entran dentro del intervalo de variación esperado para las propiedades de la bentonita.

Se han fabricado dos conjuntos de bloques: uno para el ensayo en "maqueta", bajo la dirección y control de CIEMAT, y otro para el ensayo "in situ", bajo la dirección y control de AITEMIN. En ambos casos se ha recurrido a un diseño en coronas concéntricas que redujera al mínimo el volumen de huecos de la barrera. Los bloques se han fabricado mediante compactación uniaxial a presiones de 40 a 50 MPa, obteniéndose una densidad seca media de los bloques para el ensayo en "maqueta" en torno a 1,77 g/cm³ y de los bloques para el ensayo "in situ" en torno a 1,70 g/cm³. Esto da lugar a una densidad seca media de la barrera instalada de 1,65 y 1,60 g/cm³, respectivamente.

1

INTRODUCCION

El propósito del FEBEX (Full-scale Engineered Barriers Experiment) es el estudio del comportamiento de componentes del campo próximo de 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 naturales y escala real [1]; 2) un ensayo en "maqueta", a escala casi real [2]; y 3) un conjunto de ensayos de laboratorio para complementar la información de los dos ensayos a gran escala [3 y 4]. El experimento está basado en el concepto de almacenamiento español en roca cristalina: las cápsulas con el residuo se depositan horizontalmente en galerías, rodeadas por una barrera de arcilla formada por bloques fabricados con bentonita compactada a alta densidad [5].

La duración del proyecto será de unos 7 años (1994-2001) y su ejecución se ha dividido en cuatro etapas sucesivas, definidas por las tareas principales a realizar en los dos ensayos a gran escala. Estas etapas son las siguientes: preoperacional (planificación, diseño, caracterización de la arcilla, instalación y modelación); operacional (calentamiento, monitorización, enfriamiento y verificación de predicciones); desmantelamiento (extracción, inspección, muestreo y estudio de los materiales); evaluación final de los resultados y verificación de los modelos.

En este documento se recoge una síntesis de los trabajos realizados en la etapa preoperacional (1994-1996).

Las barreras de ingeniería (residuo, cápsula y barrera de arcilla) son elementos clave en el concepto de almacenamiento final de los RAA. La matriz del residuo actúa como barrera reductora que minimiza la solubilidad y la cápsula aísla el residuo durante un cierto tiempo y contribuye al ambiente reductor. La barrera de arcilla tiene el propósito múltiple de proporcionar estabilidad mecánica a la cápsula, absorbiendo tensiones y deformaciones; de sellar las discontinuidades de la roca alojante y de retardar la llegada del agua a la cápsula; y de retener/retardar la migración de los radionucleidos liberados, una vez producido el fallo de la cápsula y la oxidación/disolución de matriz combustible.

El comportamiento de un almacenamiento de RAA debe estar determinado, en gran medida, por los procedimientos de diseño y construcción de la barrera de ingeniería y especialmente por los cambios que pueden producirse en las propiedades mecánicas, hidráulicas y geoquímicas debidos a los efectos combinados del calor generado por

desintegración radiactiva y al aporte de agua y de solutos desde la roca de alojamiento. Se considera, por tanto, fundamental comprender y cuantificar los procesos que tienen lugar en el campo próximo para evaluar el comportamiento a largo plazo.

En planes de I+D de años anteriores, ENRESA ha estudiado fuentes de aprovisionamiento de materiales a utilizar en la barrera arcillosa, así como el comportamiento térmico, hidráulico, mecánico y geoquímico de estos materiales. Ha realizado también estudios de caracterización integral de macizos graníticos. Como consecuencia de estos estudios, y debido a que hasta ahora no se ha realizado ningún experimento a gran escala, en granito, sobre la disposición horizontal de las cápsulas de residuos en galerías, ENRESA ha llegado a la conclusión de que el siguiente paso, para conocer la viabilidad del concepto y 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.

El experimento FEBEX tiene, por tanto, el múltiple objetivo de demostrar la factibilidad de fabricar y ensamblar las barreras de ingeniería y de desarrollar metodologías y modelos para evaluar el comportamiento termo-hidro-mecánico (THM) y termo-hidro-geoquímico (THG) del campo próximo. Estos objetivos deberán ser cumplidos en los ensayos "in situ", en "maqueta" y de laboratorio, que constituyen las partes principales del experimento, de acuerdo con el programa diseñado por ENRESA.

El objetivo de demostración se pretende conseguir fundamentalmente en el ensayo "in situ" al tener que operar en condiciones naturales y con componentes contruidos con las dimensiones reales del diseño de una galería de almacenamiento. Este objetivo de demostración tiene menor entidad en el ensayo en maqueta.

El objetivo de comprobación de la capacidad predictiva de los modelos numéricos THM y THG deberá ser soportado por el programa de ensayos de laboratorio dirigido a conocer y ponderar los procesos que tienen lugar en la barrera de arcilla bajo condiciones simples y controladas, y a desarrollar las ecuaciones que los gobiernan. El ensayo en "maqueta", con dimensiones próximas a las reales y condiciones iniciales y de contorno bien definidas, servirá para verificar la capacidad predictiva de los modelos numéricos acoplados y como término de referencia que permita evaluar las discrepancias, si existen, y ajustar los modelos

para predecir el comportamiento de la barrera de arcilla en las condiciones más heterogéneas del sistema natural en el que se realiza el ensayo "in situ".

Para la realización del ensayo "in situ" se ha elegido el laboratorio subterráneo gestionado por NAGRA en Grimsel (Suiza), debido a la semejanza de los conceptos de almacenamiento español y suizo y a las condiciones adecuadas del laboratorio. El ensayo en "maqueta" se está realizando en las instalaciones de CIEMAT (Madrid, España) y los programas de laboratorio se desarrollan en varios centros de investigación españoles (UPC-DIT, CSIC-Zaidín y CIEMAT).

Como se ha dicho anteriormente, durante los planes de I+D de ENRESA realizados durante años anteriores al proyecto FEBEX, se estudiaron una serie de yacimientos españoles de bentonita para su utilización en las barreras de arcilla de un repositorio. Como resultado de estos estudios se llegó a la conclusión de que el yacimiento más adecuado era el llamado Cortijo de Archidona, situado en la Serrata de Níjar, provincia de Almería (Sudeste de España), explotado por Minas de Gádor, S.A. La bentonita de este yacimiento (con la denominación de muestra o bentonita S-2) ha sido utilizada durante los años anteriores al FEBEX en las investigaciones del comportamiento térmico, hidráulico, mecánico y geoquímico mencionadas anteriormente. Existe, por consiguiente, una extensa información de las propiedades de esta bentonita. Consecuentemente, se decidió extraer de este yacimiento la bentonita FEBEX.

Por los estudios realizados con anterioridad, se sabe que existe una cierta heterogeneidad en las características de la bentonita del yacimiento. Por ello, con el objeto de reducir los problemas de evaluación de los resultados de los diferentes ensayos FEBEX, se decidió seleccionar, homogeneizar y procesar una cantidad suficiente (unas 300 toneladas) para ser usada en la fabricación de los bloques de los dos ensayos a gran escala y en todos los ensayos experimentales de laboratorio. Es decir, se puede suponer que toda la bentonita utilizada en las diferentes partes del FEBEX tiene las mismas propiedades. En el presente documento se describen todas las actividades, estudios y ensayos de laboratorio realizados en la etapa pre-operacional, con el propósito de seleccionar, homogeneizar, procesar y caracterizar la bentonita que se

está utilizando en el FEBEX, desde su extracción en el yacimiento hasta la fabricación, manipulación y almacenaje de los bloques con los que se han construido las barreras de arcilla de los dos ensayos de gran escala. Incluye también un resumen de los resultados obtenidos en los estudios de caracterización anteriores al FEBEX, hechos sobre muestras de bentonita del mismo yacimiento. Los ensayos de laboratorio a los que se refiere este documento son ensayos para caracterización de la bentonita y no deben confundirse con el conjunto de ensayos de investigación de laboratorio, que se están haciendo para investigar procesos y variables.

El documento se ha dividido en 7 capítulos, incluida esta introducción como Capítulo 1. En el Capítulo 2 se hace un resumen y se presentan los resultados fundamentales de los trabajos anteriores al FEBEX. El Capítulo 3 se refiere a la selección y tratamiento de la bentonita FEBEX. La caracterización de la bentonita finalmente preparada para la fabricación de los bloques y para el conjunto de ensayos experimentales de laboratorio, es el objeto del Capítulo 4. En el Capítulo 5 se describen las actividades de diseño, fabricación y control de los bloques para el ensayo "in situ" y la "maqueta" y se presentan las características finales de los bloques antes de su colocación en las barreras respectivas. En el Capítulo 6 se hace un resumen de las conclusiones obtenidas acerca de las propiedades de la bentonita como material y de los bloques fabricados con esa bentonita. En el Capítulo 7 se incluyen las referencias bibliográficas.

A este trabajo han contribuido varias instituciones participantes en el proyecto FEBEX: CIEMAT, CSIC-Zaidín, UPC-DIT y AITEMIN. Sin embargo, CIEMAT ha contribuido con una participación mayoritaria, por lo que el documento se ha escrito tomando como base su trabajo y, en cada tema, se han insertado las contribuciones de los otros participantes, con indicación del nombre de la organización correspondiente. Es decir, donde no se menciona el nombre de la institución, se entiende que la contribución es de CIEMAT. Esta forma de presentación del trabajo obliga a una cierta repetición del nombre de los participantes, pero tiene la ventaja de que, para los numerosos ensayos o estudios del mismo tipo realizados por dos instituciones, facilita la comparación y discusión de los resultados.



2

ESTUDIOS ANTERIORES AL FEBEX

Como se ha dicho en el Capítulo 1, en planes de I+D anteriores al FEBEX, ENRESA ha estudiado una serie de yacimientos españoles de arcillas esmectíticas potencialmente utilizables para la construcción de las barreras de arcilla de un repositorio de RAA. Entre todos ellos se eligió finalmente el yacimiento Cortijo de Archidona, situado en la Serrata de Níjar (provincia de Almería) y explotado por Minas de Gádor, S.A.

Durante varios años anteriores al FEBEX, ENRESA ha realizado estudios detallados de caracterización y comportamiento mecánico, hidráulico, térmico y geoquímico de la bentonita de este yacimiento.

Este capítulo contiene una descripción esquemática de los estudios realizados, y se presenta un resumen detallado de los resultados de los ensayos de caracterización de la bentonita del yacimiento Cortijo de Archidona, de donde se ha obtenido la bentonita para el FEBEX.

2.1 Estudio de arcillas españolas potencialmente utilizables en barreras de ingeniería

El estudio de materiales para el relleno y sellado de un repositorio de RAA se comienza en España en 1987, con un Proyecto financiado por la UE (FI-IW-0191E), realizado por CIEMAT y participado por ENRESA. En este estudio se plantearon tres objetivos:

- ❑ Conocer la disponibilidad en España de arcillas idóneas como material de relleno y sellado.
- ❑ Estudiar la posibilidad de utilizar arcillas illíticas como alternativa a las esmectíticas, para minimizar el desequilibrio mineralógico con el ambiente granítico.
- ❑ Estudiar mezclas de arcilla y roca granítica molturada para material de relleno, lo que podría reducir costes y contribuir a la reconstitución del ambiente granítico del entorno del almacenamiento.

Realizado un inventario de materiales arcillosos en España, se inició el estudio de 30 muestras provenientes de siete suministradores ubicados en Gerona, Barcelona, Zaragoza, Segovia, Toledo, Jaén y Almería. Una primera determinación semicuantitativa de la mineralogía permitió excluir el 50 % de las muestras recibidas debido a su bajo

contenido en filosilicatos (<65 %). De acuerdo con la mineralogía de la fracción <2 μm , se seleccionaron siete de las muestras restantes: dos de ellas estaban constituidas mayoritariamente por illita, y las otras cinco eran esmectitas suministradas por Minas de Gádor, provenientes de la región de Cabo de Gata (Almería) y de la Cuenca de Madrid (Yuncos, Toledo). Finalmente, entre ellas, se seleccionaron (por su bajo contenido en carbonatos y minerales coloidales, por su elevada plasticidad y por su buena compactabilidad) dos arcillas: una bentonita denominada "Serrata natural" del yacimiento Cortijo de Archidona (Cabo de Gata, Almería) y una illita procedente de Zaragoza. El análisis de las propiedades mecánicas, hidráulicas, térmicas y físico-químicas de ambas y su comportamiento al ser mezcladas con granito molido [6], permitieron llegar a las siguientes conclusiones:

- ❑ Existen arcillas en España que podrían utilizarse como material de relleno y sellado.
- ❑ Es aconsejable la utilización de la arcilla esmectítica y no la de la arcilla illítica como material de relleno y sellado.
- ❑ Puede utilizarse granito molturado mezclado con esmectita en el material de relleno, pero sin sobrepasar el 25% de la mezcla.

2.2 Estudio de las zonas de Cabo de Gata y cuenca terciaria de Madrid

Coincidiendo parcialmente con el desarrollo del estudio descrito en el apartado anterior, ENRESA promovió el estudio de dos zonas con yacimientos importantes de arcillas esmectíticas, que podían ser utilizadas como materiales de relleno y sellado: Cabo de Gata en Almería y Cuenca Terciaria de Madrid en la provincia de Toledo. De cada una de ellas se seleccionaron tres yacimientos, considerados como fuentes potenciales de aprovisionamiento de material por sus características, que ya se conocían, y por las reservas estimadas: para la zona de Cabo de Gata los yacimientos seleccionados fueron Cortijo de Archidona (en la Serrata de Níjar), Morrón de Mateo (en la Rambla de los Escullos) y Los Trancos (en la zona norte de la Sierra de Gata); de la Cuenca de Madrid se seleccionaron los yacimientos de Cerro del Águila-Cerro del Monte, Santa Bárbara y Yuncos. Estos yacimientos fueron estudiados en detalle conjuntamente por CIEMAT y CSIC-Zaidín —zona del Cabo de Gata— y CIEMAT y Universidad Autóno-

ma de Madrid (UAM) —zona de la Cuenca de Madrid. Además CIEMAT contó con la colaboración del Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA).

Durante este estudio, ENRESA tuvo el asesoramiento de R. Pusch (de Clay Technology, Suecia).

En el CIEMAT se recibieron dos muestras por yacimiento, de 200 kg cada una. De cada una de estas muestras se determinó: granulometría, límites de Atterberg, peso específico, superficie específica total y externa, y composición mineralógica y química. Se realizaron también ensayos de compactación de tipo dinámico y estático, y en el laboratorio de CEA se determinó la conductividad térmica superficial en muestras compactadas [7, 8 y 9].

Por su parte, CSIC-Zaidín (para la zona de Cabo de Gata) y la UAM (para la zona de la Cuenca de Madrid) realizaron una completa caracterización mineralógica y química y un estudio de alterabilidad y estabilidad, sobre varias muestras recogidas en los mismos yacimientos. Los resultados obtenidos se recogen en informes publicados por ENRESA y por la EC [10, 11 y 12].

Atendiendo a los resultados obtenidos por todos los laboratorios, se seleccionó un yacimiento de cada zona: Cortijo de Archidona (formado mayoritariamente por esmectita de tipo montmorillonita) en Cabo de Gata; y Cerro del Águila-Cerro del Monte (constituido fundamentalmente por esmectita trioctaédrica de tipo saponita acompañada de proporciones variables de illita y sepiolita) en la Cuenca Terciaria de Madrid. Estos yacimientos se seleccionaron porque cumplían los requisitos exigidos al material de relleno y sellado de un almacenamiento de RAA: pureza mineralógica, elevada superficie específica, límite líquido elevado, proporción alta de fracción $< 2 \mu\text{m}$ y elevada conductividad térmica; y además buena compactabilidad, como requisito añadido para la fabricación de bloques de alta densidad [7].

Selección del yacimiento Cortijo de Archidona (Cabo de Gata)

La investigación de los dos yacimientos seleccionados continuó mediante estudios más específicos, realizados por CIEMAT, dirigidos a determinar el más idóneo para obtención del material de relleno y sellado de un repositorio. Finalmente fue elegido el yacimiento Cortijo de Archidona, ubicado en la Serrata de Níjar (zona de Cabo de Gata, Almería).

Para estos estudios, CIEMAT adquirió una muestra de cada yacimiento. Ambas muestras, de 5000

kg cada una, fueron preparadas en las instalaciones de la empresa Minas de Gádor, mediante secado a 60°C hasta una humedad aproximada del 10% y molido hasta tamaño máximo de 5 mm.

La muestra procedente del Cortijo de Archidona se denominó S-2; y con esta denominación aparece en todos los informes y publicaciones (anteriores al FEBEX) relacionados con el estudio de la arcilla esmectítica (bentonita) de este yacimiento. La muestra procedente del yacimiento Cerro del Águila-Cerro del Monte, se denominó MCA-C.

Previamente a la ejecución de los ensayos, las arcillas se molían hasta un tamaño máximo de 2 mm (excepto en los casos en que se investigaba el efecto de la granulometría en alguna propiedad) y se dejaban en las condiciones de temperatura y humedad del laboratorio (20 a 25°C y 60% de HR) hasta su estabilización.

El estudio realizado por CIEMAT incluyó no sólo ensayos para determinar las propiedades de las arcillas, sino también para investigar la variación de sus propiedades en función de: la densidad seca y la humedad de los bloques compactados, de la temperatura durante el ensayo, de la granulometría empleada, de la adición de arena de cuarzo en diferentes proporciones y del precalentamiento a diferentes temperaturas de la arcilla utilizada. En las muestras de ambos yacimientos se realizaron ensayos de: compactación dinámica, resistencia a compresión simple, hinchamiento libre, presión de hinchamiento, conductividad hidráulica saturada, conductividad térmica, consolidación y resistencia triaxial de tipo CD y CU. Además se hicieron estudios de difusión de iones, alterabilidad hidrotermal y determinación de las isothermas de adsorción-desorción. También se determinaron las modificaciones que el calentamiento produce en la mineralogía, el peso específico, la superficie específica externa y la textura observada al microscopio electrónico. Simultáneamente, bajo contrato con CEA, se realizaron ensayos de compactación uniaxial de tipo industrial con las arcillas de ambos yacimientos, en colaboración con la sociedad Constructions Thermiques Européennes (Montsempron-Libos, Francia).

Estos estudios y sus resultados se recogen en las referencias [7, 13, 14, 15, 16], y condujeron a la selección definitiva de la bentonita del Cortijo de Archidona, de referencia S-2, por su mejor compactabilidad y menor sensibilidad a los efectos térmicos, aunque ambas arcillas satisfacen los requisitos para ser utilizadas como material de barrera. Se llegó además a la conclusión de que una den-

sidad seca de $1,6 \text{ g/cm}^3$ satisface los requerimientos hidráulicos de la barrera y que la adición de arena de cuarzo no introduce grandes mejoras en las propiedades del material.

La evaluación de la fabricación y construcción de la barrera hecha con la bentonita S-2 (Cortijo de Archidona) se hizo en colaboración entre EN-RESA, CIEMAT y CEA. El molde y el sistema de fabricación de los bloques de arcilla compactada, así como el método de instalación, se diseñaron de la forma empleada por los franceses. El ensayo "in situ" se hizo en la vieja mina de Cogema (Fanay-Silord, Francia) en pozos perforados con un diámetro de 1,50 m y 6,00 m de profundidad [12].

2.3 Estudios de longevidad

Para el comportamiento a largo plazo de un repositorio, la integridad de la barrera de arcilla es fundamental; por ello, tienen que ser estudiados los cambios que puede sufrir la arcilla durante la vida de un almacenamiento. Los cambios están controlados por el impacto térmico, por el agua de hidratación, y por el ambiente químico. Un efecto importante sobre la barrera de arcilla es la posible transformación de montmorillonita en illita y el deterioro resultante de sus propiedades mecánicas, de hinchamiento y de retención.

Durante el período 1992-1995, CSIC-Zaidín, UAM y CIEMAT ensayaron los materiales a varias concentraciones salinas, temperaturas e intervalos de tiempo, con el objeto de determinar la cinética de las reacciones. CSIC-Zaidín ha establecido una ecuación que gobierna la transformación de la montmorillonita en illita y que indica que a temperaturas inferiores a 120°C la transformación duraría de cientos de miles a millones de años, dependiendo de la cantidad de potasio disponible en el medio [17]. Los estudios realizados en la UAM no encontraron transformaciones relevantes que afecten a la saponita hasta 200°C , pero establecieron ecuaciones cinéticas que controlan la transformación de los minerales accesorios (sepiolita) en saponita y que indican que ésta se produciría en decenas de años.

CSIC-Barcelona ha estudiado la bentonita de Almería para obtener información termodinámica y cinética sobre el proceso de disolución/precipitación.

2.4 Estudio del comportamiento THM de la bentonita S-2 (1991-1995)

En 1991 se inició otro estudio de la bentonita de referencia S-2, procedente del yacimiento Cortijo de Archidona. Este estudio se encuadra dentro del Anexo V del Convenio de Asociación CIEMAT-EN-RESA "Investigación y desarrollo tecnológico en el campo de la migración de radionucleidos y comportamiento de barreras naturales y artificiales frente a la migración" en su Anexo C: "Estudios básicos de comportamiento térmico, hidráulico y mecánico de materiales de barreras artificiales". Para ello se dispuso de 24 toneladas de material que, suministrado por Minas de Gádor en octubre de 1990, había sido preparado en su planta de Almería mediante secado a 60°C y molido a tamaño máximo de 5 mm. Para su uso en el laboratorio de CIEMAT el material se volvía a moler a tamaño máximo de 2 mm.

El estudio tenía por objeto analizar las propiedades y el comportamiento de la bentonita en las condiciones a las que será sometida en un almacenamiento; es decir, al ser sometida durante períodos de tiempo largos a calentamiento e hidratación simultáneos por frentes opuestos. Esto incluye el estudio de los efectos producidos por los flujos térmicos e hidráulicos en bloques compactados y el estudio del comportamiento del material en condiciones subsaturadas. Además, se prosiguió la caracterización de la bentonita, abordando nuevos aspectos como la determinación de la porosimetría y del calor específico en función de la temperatura, y haciendo más determinaciones de peso específico, capacidad de cambio catiónico y cationes intercambiables, conductividad térmica, etc. Otros aspectos abordados por primera vez fueron la extracción y análisis del agua intersticial y de aniones solubles, así como el análisis bacteriológico.

2.5 Resumen de los ensayos de caracterización de la bentonita S-2, anteriores al FEBEX

En este apartado se presenta un resumen de las propiedades de la bentonita S-2, procedente del yacimiento Cortijo de Archidona, obtenidas en los estudios que se han descrito en los dos apartados anteriores.

2.5.1 Origen

Durante el Neógeno, la zona del Cabo de Gata sufrió una intensa actividad volcánica, que se encuadra dentro del marco geotectónico del Mediterráneo occidental. Estas rocas volcánicas han sufrido un proceso de transformación provocado por fluidos hidrotermales, que circulaban debido a la existencia de una fracturación intensa. Parece que la bentonita del yacimiento Cortijo de Archidona se ha originado a partir de tobas poligénicas y aglomerados vitrificados de carácter dacítico, que sufrieron un proceso inicial de desvitrificación por hidrotermalismo (a temperaturas entre 75 y 100°C) y posteriormente se alteraron (a temperaturas próximas a los 40°C) por la acción de aguas meteóricas infiltradas a través de fracturas [18].

2.5.2 Composición mineralógica y química

La bentonita S-2 está constituida mayoritariamente por esmectitas ($92\pm4\%$), con proporciones siempre inferiores al 5% de cristobalita, cuarzo, plagioclasa y calcita. La fracción inferior a $2\text{ }\mu\text{m}$ está formada mayoritariamente por esmectitas dioctaédricas de tipo montmorillonita, cuya fórmula estructural se muestra en la Tabla 2.1.

Los análisis químicos de la muestra total, incluyendo elementos traza, realizados por CSIC-Zaidín [10] y CIEMAT [13] son coherentes entre sí y se muestran en la Tabla 2.2.

La capacidad de cambio y los cationes intercambiables determinados en ambos laboratorios se resumen en la Tabla 2.3.

Además se encuentran en el complejo de cambio Sr, Ba, Mn y en ocasiones Al.

Los contenidos en amorfos se indican en la Tabla 2.4. El procedimiento de ataque de la sílice coloidal utilizado en el laboratorio del CSIC-Zaidín [10] es más intenso que el utilizado en CIE-

MAT, lo que explica la gran diferencia observada entre los respectivos valores.

Las características de extractos acuosos de relación sólido:líquido 1:4 (CIEMAT) y 1:10 (CSIC-Zaidín) se muestran en la Tabla 2.5.

2.5.3 Propiedades de identificación

Las propiedades de identificación de la bentonita S-2 se resumen en la Tabla 2.6 e incluyen valores obtenidos por CIEMAT y CSIC-Zaidín, en los años anteriores al FEBEX, y no publicados.

La determinación granulométrica de esta arcilla presenta complicaciones debido a la dificultad de conseguir una suspensión en que las partículas estén totalmente dispersas. Esta dificultad se ha atribuido a la aglutinación o cementación producida por sílice coloidal [9 y 10]. La dispersión se ha realizado, en el laboratorio del CSIC-Zaidín, utilizando Na_2CO_3 y ciclos de ultrasonido; en CIEMAT, con hexametáfosfato sódico y ciclos de ultrasonido y agitación.

2.5.4 Parámetros de resistencia

Resistencia a la compresión simple (RCS)

Los ensayos de RCS se realizaron sobre probetas cilíndricas de 38 mm de diámetro y 78 mm de altura, con una velocidad de carga ajustada al 2% de deformación por minuto. Se analizó la incidencia sobre esta propiedad del sistema de compactación (golpeo o uniaxial), la humedad y densidad seca de fabricación, la granulometría del molido y la adición de arena de cuarzo en diferentes proporciones. Se comprobó que la RCS aumenta de manera exponencial al aumentar la densidad seca, y tiene un valor de 25 kg/cm^2 para densidad seca de $1,70\text{ g/cm}^3$ y humedad de equilibrio de laboratorio. Las mayores resistencias se obtie-

Tabla 2.1
Fórmula estructural de la esmectita S-2

	Tetraédrica		Octaédrica			
	Si ⁴⁺	Al ³⁺	Al ³⁺	Fe ³⁺ , Fe ²⁺	Mg ²⁺	Ti ⁺
CSIC- Zaidín [10]	7,76±0,10	0,24±0,10	2,79±0,05	0,33±0,05	1,03±0,10	
CIEMAT [13]	7,97	0,03	2,74	0,43	0,89	0,02

Tabla 2.2
Composición química y elementos traza de la muestra total de la bentonita S-2

Óxidos %	CSIC-Zaidín	CIEMAT	Elementos traza, en ppm	CSIC-Zaidín	CIEMAT
SiO ₂	59,9±1,7	57,3	B	53±38	
Al ₂ O ₃	18,7±1,1	19,6	Ba	110±63	195
Fe ₂ O ₃	3,6±0,4	3,9	Be		<5
FeO		0,4	Cl ⁻		552
MnO		<0,03	Co		5,3
MgO	5,8±0,4	4,7	Cr	15±11	15
CaO	2,0±1,1	2,9	Cu	5±2	<5
Na ₂ O	2,2±0,2	1,9	La		26
K ₂ O	0,7±0,3	1,4	Mo	7±3	<5
TiO ₂		0,3	Ni	16±5	20
P ₂ O ₅		0,1	Pb	41±22	
H ₂ O ⁺	6,7±0,9	5,7	Rb		52
CO ₂ orgánico	0,7±0,3	0,6	Sn	41±30	
CO ₂ inorgánico		0,1	Sr		210
SO ₂ (S ²⁻)		0,02	Th		15,7
SO ₄ ²⁻		0,03	U		1,02
F ⁻		0,16	V	11±13	17
			W		<25
			Y		23
			Zn		77
			Zr	337±320	180

Tabla 2.3
Capacidad de cambio y cationes intercambiables de la bentonita S-2, en meq/100 g

	CCC	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺
CIEMAT [19]	97±17	41±7	31±7	22±3	2,5±0,4
CSIC-Zaidín [10]	92±12	31±6	33±6	30±3	3±1

Tabla 2.4
Contenido en sílice, aluminio y hierro amorfos de la bentonita S-2

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
CSIC (%)	1,92±1,38	0,09±0,05	0,11±0,02
CIEMAT (%)	0,025±0,01		

Tabla 2.5
Análisis de extractos acuosos de la bentonita S-2

	Extracto acuoso 1:4 (CIEMAT)	Extracto acuoso 1:10 (CSIC-Zaidín)
Cl ⁻ (mg/l)	299±75	
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	314±38	
C.E. mS/cm	1,884±0,241	0,792±0,151
pH		8,57±0,43

nen para humedades en torno al 20%. El aumento del tamaño de grano del molido y la adición de arena de cuarzo producen una disminución considerable de la RCS.

Ensayos triaxiales

Los parámetros de resistencia obtenidos en ensayos triaxiales de tipo CD y CU, realizados con probetas saturadas de densidad seca inicial 1,60 g/cm³ según se describe en [7], se resumen en la Tabla 2.7. En los ensayos CD la rotura se produjo para deformaciones comprendidas entre 7 y 14 % con valores del desviador comprendidos entre 1,7 y 2,7 MPa. En los ensayos CU la deformación en rotura está entre 9 y 12 % para valores del desviador entre 1,5 y 2,9 MPa y entre 8 y 11 % para valores del desviador entre 2,4 y 6,6 MPa.

Se han hecho también ensayos triaxiales con el material sin saturar, cuyos resultados se presentan en las Tablas 2.8 y 2.9. Para los valores bajos de σ_3 , la rotura es frágil y se produce para deformaciones por debajo del 8 % y con un pico de resistencia, mientras que para los valores altos de σ_3 , la rotura es dúctil y se produce para una deformación del orden del 20 %.

2.5.5 Ensayos edométricos

Se realizaron ensayos edométricos con ciclo de carga y descarga en probetas compactadas con densidad seca inicial de 1,4 y 1,6 g/cm³. Para el análisis de resultados se aplicó la teoría de la consolidación de Terzaghi y las curvas de consolidación se analizaron por el procedimiento empírico de Casagrande. Los parámetros obtenidos se reflejan en la Tabla 2.10.

2.5.6 Ensayos edométricos con succión controlada

Se han realizado en edómetros con succión controlada a temperatura de 20°C, mediante disoluciones de ácido sulfúrico o presión de nitrógeno [20, 21, 22]. Los ensayos se han hecho sobre probetas compactadas a densidad seca de 1,6 g/cm³, con la humedad de equilibrio en el laboratorio. Mediante ajuste de los datos experimentales se obtuvo la superficie de estado preliminar [23]:

$$e = 3,642 - 0,197 \ln p - 0,13 \ln s + 0,009 \ln p \ln s$$

donde e es el índice de poros, s la succión en MPa y p la tensión neta media en MPa.

2.5.7 Presión de hinchamiento

Se ha determinado en edómetro, mediante saturación a volumen constante mantenido por adición de cargas sucesivas. Se han utilizado mezclas de arcilla y arena de cuarzo en las que la densidad seca de la arcilla estaba comprendida entre 1,3 y 2,0 g/cm³. La curva de ajuste obtenida se muestra en la Figura 2.1, y su ecuación es

$$\ln P_s = 5,9 \rho_d - 7,9 \quad r^2 = 0,93 \quad 17 \text{ puntos}$$

donde P_s es la presión de hinchamiento en MPa y ρ_d la densidad seca de la arcilla en g/cm³ [24].

2.5.8 Conductividad hidráulica saturada

La conductividad hidráulica saturada de probetas de distinta densidad seca se ha determinado, mediante la ley de Darcy, a partir de ensayos en que se aplica un gradiente hidráulico entre los dos extremos de una probeta de dimensiones conoci-

Tabla 2.6
Propiedades de identificación de la bentonita S-2

PROPIEDAD	LABORATORIO	
	CIEMAT	CSIC-Zaidín
Humedad de equilibrio en las condiciones del laboratorio, en %	10 a 13	
Límite líquido, en %	215±55 (*)	
	105±10 (**)	
Peso específico	2,78	
Granulometría, en %:	<2µm	82±6
	<74µm	93±3
Superficie específica total, en m²/g	516±37	614±74
Superficie específica externa BET, en m²/g	37	

(*) Es el valor obtenido en las primeras muestras tomadas del yacimiento.
(**) Es el valor obtenido en muestras del yacimiento tomadas en años posteriores.

Tabla 2.7
Parámetros de resistencia obtenidos en los ensayos triaxiales realizados en probetas de bentonita S-2 saturadas de $p_d = 1,60 \text{ g/cm}^3$

Tipo de ensayo	Intervalo de σ_3 MPa	Cohesión MPa	Ángulo de rozamiento en grados
CD	3-10	0,0	7
CD	10-30	0,2	4
CU	3-10	0,2	8
CU	10-30	0,2	5

Tabla 2.8:
Parámetros de resistencia obtenidos en ensayos triaxiales con probetas de bentonita S-2 no saturadas de $p_d=1,65\text{ g/cm}^3$ y diferentes humedades

w %	S _r inicial %	Intervalo de σ_3 MPa	Cohesión MPa	Ángulo de rozamiento en grados
10	41	0,5-3,0	0,1	33
10	41	10,0-30,0	7,0	8
15	61	0,5-3,0	0,8	31
20	81	0,5-3,0	1,2	21
20	81	10,0-30,0	3,0	2

Tabla 2.9
Parámetros de resistencia obtenidos en ensayos triaxiales con probetas no saturadas de bentonita S-2 fabricadas con la humedad de equilibrio en las condiciones de laboratorio de la arcilla y diferentes densidades iniciales

ρ_d g/cm ³	S _r inicial %	Intervalo de σ_3 MPa	Cohesión MPa	Ángulo de rozamiento en grados
1,6	41 - 47	0,5-3,0	0,7	25
1,6	41 - 47	3,0-10,0	2,8	14
1,6	41 - 47	10,0-30,0	4,4	14
1,7	49 - 60	0,5-3,0	0,8	30
1,7	49 - 60	3,0-10,0	1,0	26
1,7	49 - 60	10,0-30,0	3,5	16
1,8	53 - 59	3,0-10,0	4,3	16
1,8	53 - 59	10,0-30,0	3,6	18
1,9	65 - 79	3,0-10,0	4,5	19

Tabla 2.10
Parámetros edométricos. Bentonita S-2

ρ_d g/cm ³	C _c	C _s	a_v m ² /kN	m_v m ² /kN	k m/s
1,4	0,38	0,20	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$1,7 \cdot 10^{-5}$	$4,7 \cdot 10^{-12}$
1,6	0,38	0,33	$2,3 \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-5}$	$1,3 \cdot 10^{-13}$

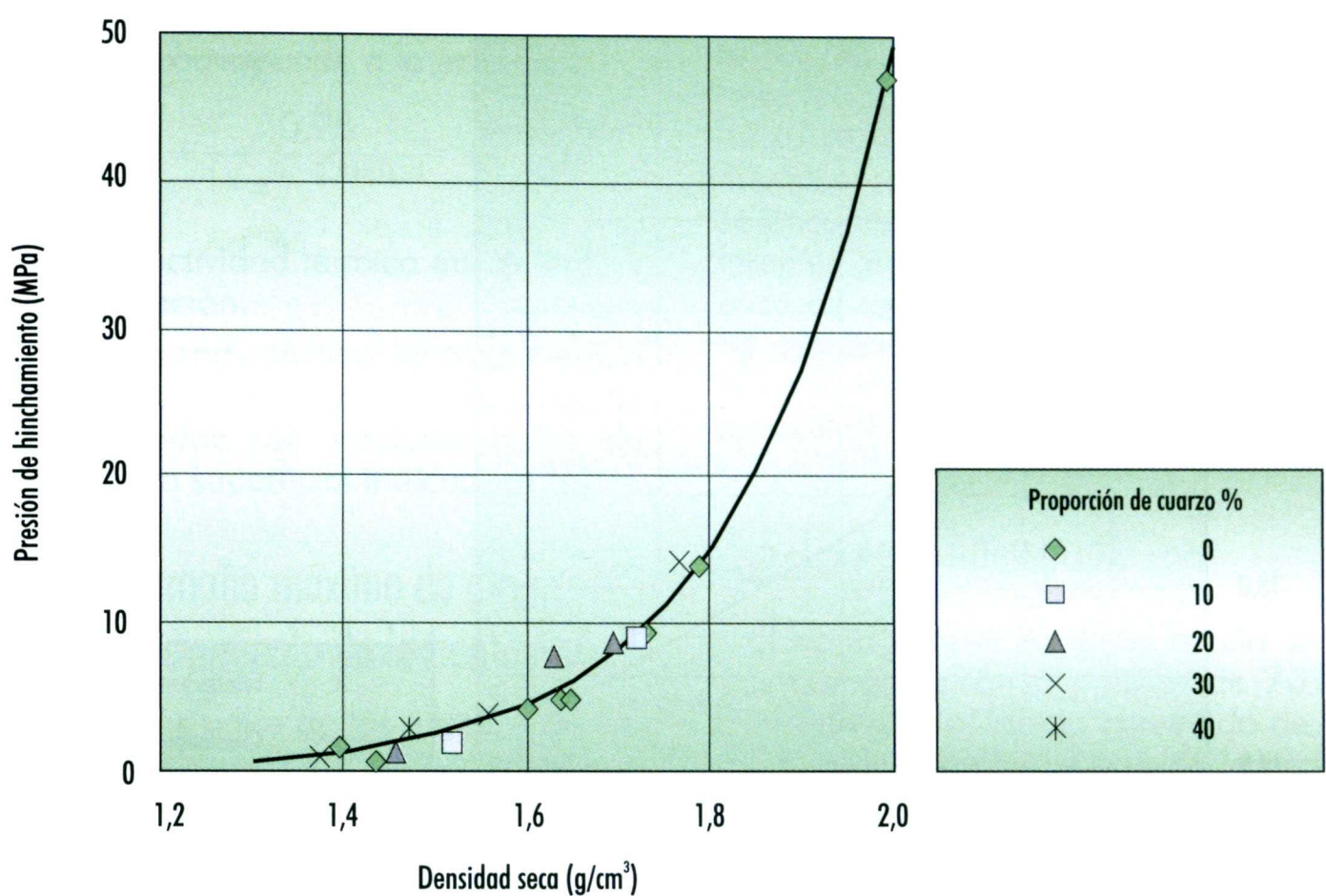


Figura 2.1: Valores experimentales y curva de regresión de la presión de hinchamiento en función de la densidad seca de la bentonita S-2 mezclada con diferentes proporciones de arena de cuarzo.

das y se mide el volumen de agua que atraviesa la muestra en función del tiempo. En la Figura 2.2 se ha representado el logaritmo de los valores obtenidos de la conductividad hidráulica (k , m/s) en función de la densidad seca (ρ_d , g/cm³). Como se puede observar, los valores se pueden ajustar a dos rectas dependiendo del intervalo de densidad seca considerado [24]. Las líneas de regresión corresponden a las ecuaciones:

Para ρ_d entre 1,4 y 1,9 g/cm³:

$$\log k = -2,97 \rho_d - 8,29 \quad (r^2=0,80) \text{ 9 puntos}$$

Para ρ_d entre 1,1 y 1,4 g/cm³:

$$\log k = -8,14 \rho_d - 0,72 \quad (r^2=0,88) \text{ 12 puntos}$$

2.5.9 Permeabilidad relativa

La UPC-DIT ha adoptado una ley para la permeabilidad relativa (k_{rl}) a partir del análisis inverso de datos de ensayos de infiltración realizados en CIEMAT [25], en los que se conoce el grado de saturación (S_r) en diferentes puntos y tiempos de

una probeta de arcilla compactada que está siendo saturada. La ley obtenida es:

$$k_{rl} = S_r^3$$

La realización de estos ensayos bajo gradiente térmico permite estimar también la tortuosidad.

2.5.10 Relación succión/humedad

La determinación de la relación succión/humedad se realizó en probetas compactadas a diferentes densidades secas y humedades, que son sometidas a diferentes succiones (superiores o inferiores a las iniciales de la probeta), hasta estabilización de la humedad de la arcilla [20]. La succión se impone mediante control de la humedad relativa de la atmósfera del recipiente en el que están las probetas por medio de disoluciones de ácido sulfúrico de diferente densidad o aplicando el principio de traslación de ejes en celdas de membrana. En ambos casos el volumen de la probeta (y por tanto el índice de poros) varía libremente durante el proceso de hidratación o desecación. La determinación se ha realizado a 20°C.

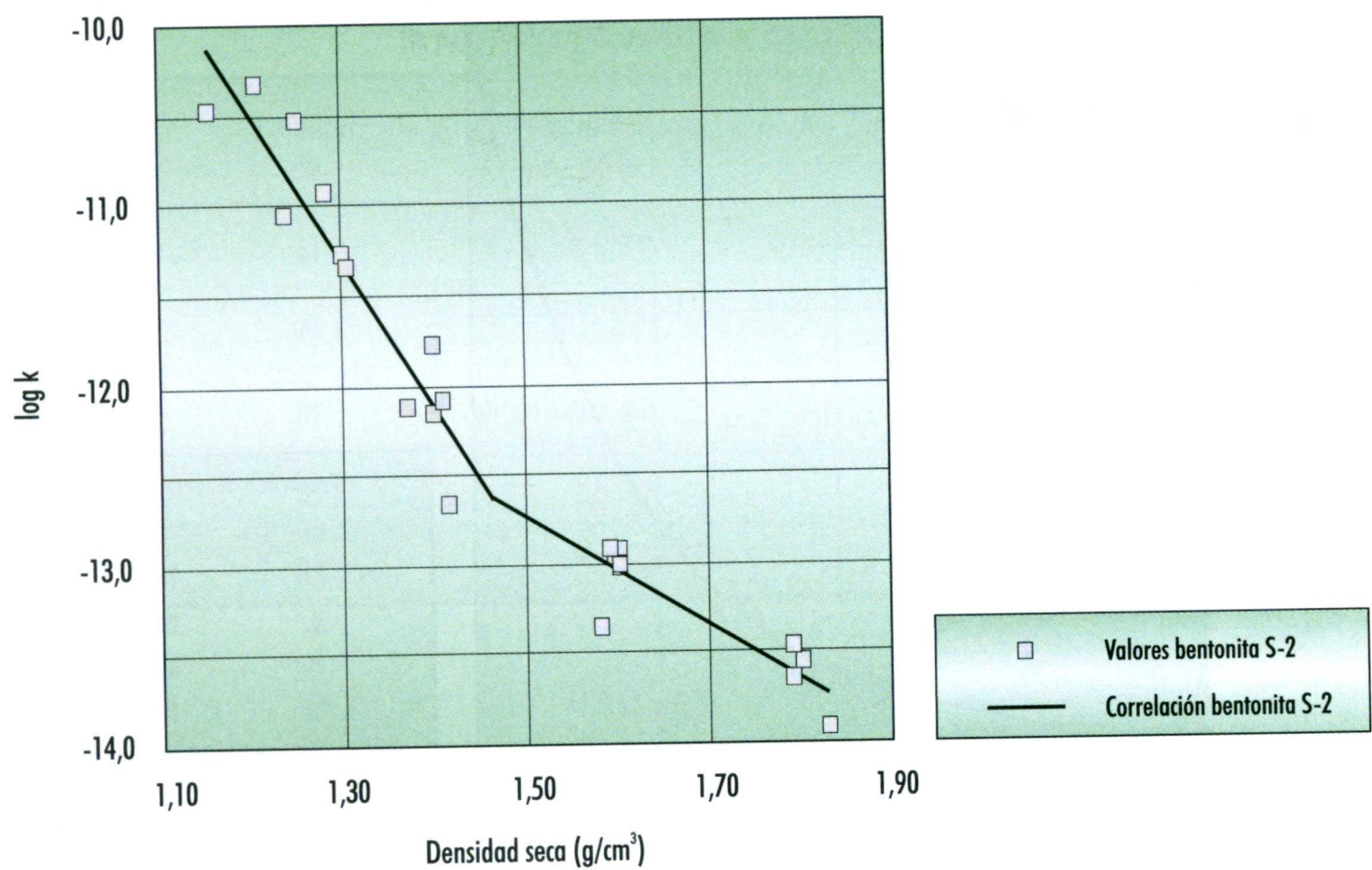


Figura 2.2: Valores experimentales y rectas de regresión entre el logaritmo de la conductividad hidráulica (en m/s) y la densidad seca (g/cm3) de la bentonita S-2.

Posteriormente, se determinaron también las curvas succión/humedad, en muestras de bentonita S-2 molidas a tamaño máximo de 2 mm y de 5 mm y compactadas con su humedad de equilibrio en las condiciones de laboratorio (10%), a densidad seca de 1,65 g/cm³, siguiendo una trayectoria de succiones que ha consistido en hidratación inicial mediante reducción de la succión a 22 MPa, seguida de secado por aumento de la succión hasta 150 MPa y nuevamente hidratación disminuyendo la succión hasta 6 MPa. Al no haber diferencias apreciables entre las dos granulometrías y entre la rama de secado y la de hidratación, se han integrado estos resultados con los obtenidos anteriormente en una única curva de regresión (Figura 2.3). La relación obtenida entre succión (s , MPa) y humedad (w , %), que es independiente de la densidad y humedad iniciales, es:

$$w=36,1-12,0 \log s \quad (r^2=0,94) \quad 191 \text{ puntos}$$

Con el fin de identificar la influencia de la carga a la que se somete la muestra en la relación succión/humedad, se realizaron varios ensayos en edómetro con control de succión a 20°C, consistentes en someter muestras compactadas con su

humedad de equilibrio en las condiciones de laboratorio a densidad seca de 1,60 g/cm³, a succiones entre 0,3 y 105,0 MPa bajo diferentes cargas verticales (de 0,3 a 5,0 MPa) [19]. Se observó una ligera disminución de humedad final para una misma succión con respecto a la alcanzada en probetas no sometidas a carga, pero sin que hubiera variación en función de la magnitud de la carga aplicada.

2.5.11 Calor específico y conductividad térmica

El calor específico se determinó sobre la muestra total molida a tamaño inferior a 50 μm mediante calorimetría diferencial de barrido. La relación entre temperatura (T , °C) y el valor del calor específico del sólido (c_s , J/kg · °C), en un intervalo de temperatura entre 45 y 150°C, se ajusta a una recta de ecuación

$$c_s = 1,38 T + 732,52$$

La conductividad térmica superficial se ha determinado a temperatura ambiente sobre probetas de arcilla compactada de diferente humedad y densidad seca. Los valores obtenidos en los últimos años,

junto con una curva de regresión de tipo sigmoideal (Boltzmann), se representan en la Figura 2.4.

La curva obtenida corresponde a la ecuación

$$\lambda = 1,34 - \frac{0,95}{1 + e^{(S_r - 0,54)/0,15}}$$

Donde λ es la conductividad térmica en W/m·K y S_r el grado de saturación.

Los valores de la conductividad térmica medida en sentido axial y radial en el interior de probetas cilíndricas compactadas son similares a los de conductividad térmica superficial indicados [26].

2.5.12 Efecto del tamaño máximo de grano en el comportamiento de la bentonita

Puesto que la mayor parte de los ensayos de caracterización de la bentonita S-2 se realizaron con tamaño máximo de grano de 2 mm y como la bentonita a utilizar en el Proyecto FEBEX se molería a tamaño máximo de 5 mm, se consideró necesario realizar una serie de ensayos para verificar si el comportamiento mecánico, térmico e hidráulico es afectado por la granulometría de molido [19]. Para ello se realizaron ensayos de hinchamiento

bajo carga, de conductividad hidráulica, de conductividad térmica y de porosimetría en el intervalo de densidad seca 1,4 a 1,8 g/cm³. También, para las dos granulometrías, se determinó la curva de succión/humedad y se realizaron ensayos edométricos con succión controlada. En ningún caso se encontraron diferencias en relación con las diferentes granulometrías. La curva de infiltración en ensayos realizados en celdas termohidráulicas tiene tendencias análogas independientemente del tamaño máximo de grano después del molido de la arcilla [25].

2-5-13 Agua intersticial

El agua intersticial de la arcilla se ha obtenido por compactación a presión de 70 MPa de una pasta de arcilla con un contenido de humedad del 25 % obtenida por mezcla de la arcilla estabilizada en las condiciones del laboratorio y agua granítica en la proporción necesaria. Varios ensayos han permitido comprobar que la química del agua obtenida está condicionada por la arcilla y no por el tipo de agua añadida [27]. El agua obtenida es de tipo clorurado-sódico-magnésico, con una fuerza iónica de 0,3 M. A partir de los análisis se

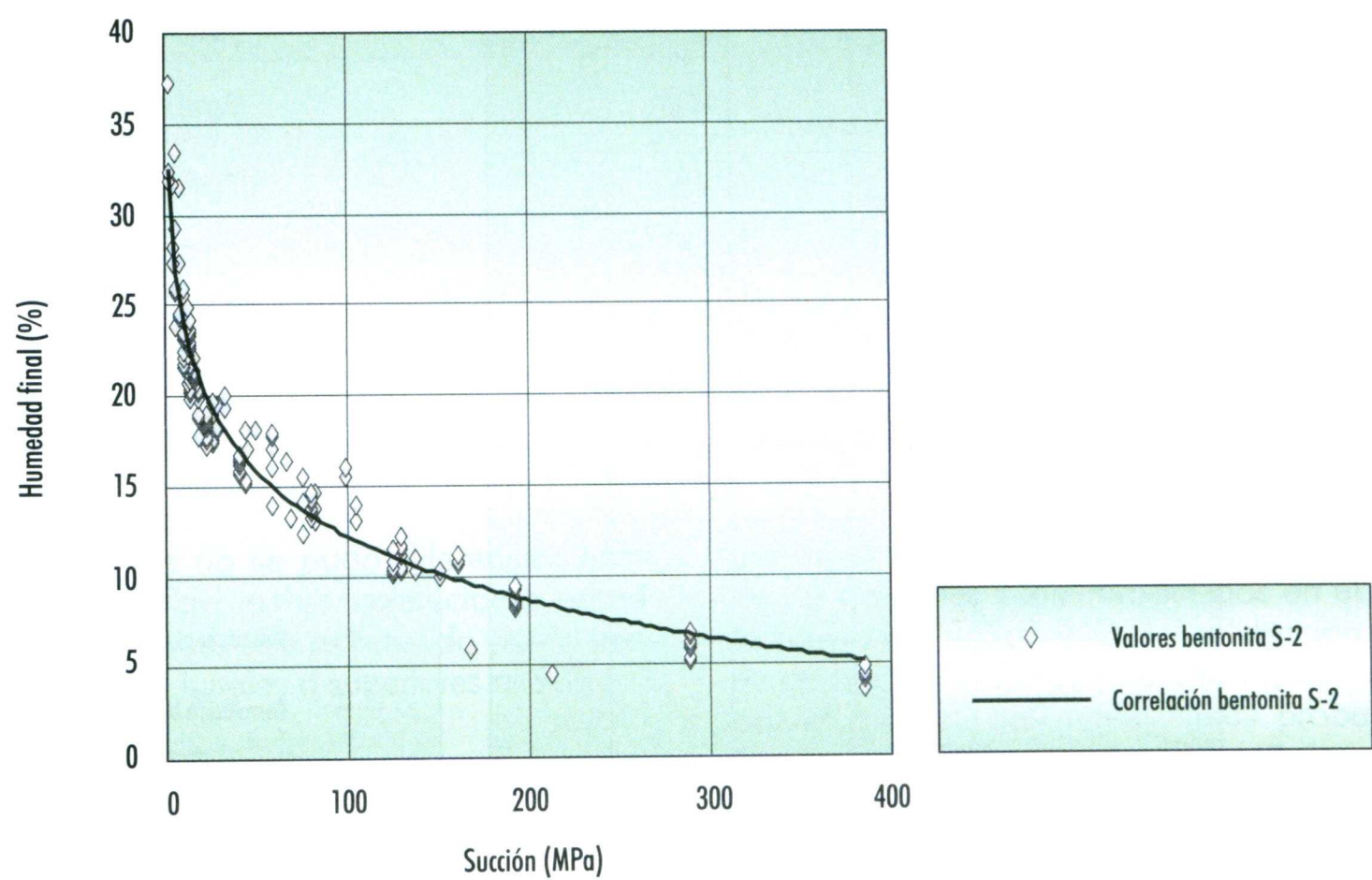


Figura 2.3: Curva succión/humedad para la bentonita S-2.

ha desarrollado un procedimiento para preparación de un agua sintética bentonítica-granítica estable para su uso en laboratorio en este y otros estudios, para simular el agua que llega a un punto de la barrera después de un recorrido por otra capa de bentonita [28]. Los resultados analíticos del agua extraída y los límites permitidos para el agua sintética se muestran en la Tabla 2.11.

2.5.14 Porosidad

El estudio mediante porosimetría de mercurio de probetas de arcilla compactadas a diferentes densidades y con diferentes humedades ha permitido identificar tres familias de poros:

- poros grandes (radio $>3\ \mu\text{m}$), con moda muy variable
- poros medios (radio entre 3 y $0,03\ \mu\text{m}$), con moda generalmente de $0,32\ \mu\text{m}$
- poros pequeños (radio entre $0,03\ \mu\text{m}$ y $0,003\ \mu\text{m}$), con moda generalmente de $0,006\ \mu\text{m}$

El porcentaje de poros pequeños es siempre mayor que el de medianos, y el de poros grandes es muy variable y está relacionado inversamente con la densidad a la que se compacta la arcilla.

2.5.15 Sorción de cesio

Mediante la técnica del ensayo en “batch”, se ha estudiado la adsorción de ^{137}Cs sobre la bentonita S-2 molida a tamaño de partícula inferior a $63\ \mu\text{m}$. Estos ensayos se han efectuado considerando diferentes parámetros para determinar su influencia en el proceso de retención: tiempo, pH inicial (de 6 a 9), fuerza iónica inicial (de 0,004 a 0,1 M) y concentración de Cs (de 10^{-3} a 10^{-9} M). Los ensayos se efectuaron en ambiente óxico. La descripción detallada se puede encontrar en la referencia [29].

En todos los experimentos se observa que la bentonita S-2 presenta un importante efecto tampón o regulador de pH. La capacidad de retención de Cs por la bentonita aumenta con el pH, con la disminución de la concentración de Cs y con la disminución de la fuerza iónica. En general, no existe una notable variación en el valor del coeficiente de distribución (K_d) con el tiempo.

Los valores obtenidos del coeficiente de distribución en los ensayos realizados a fuerza iónica 0,004 M se agrupan en la Tabla 2.12.

En la Tabla 2.13 se muestran los resultados de los ensayos realizados a fuerzas iónicas de 0,01 M y

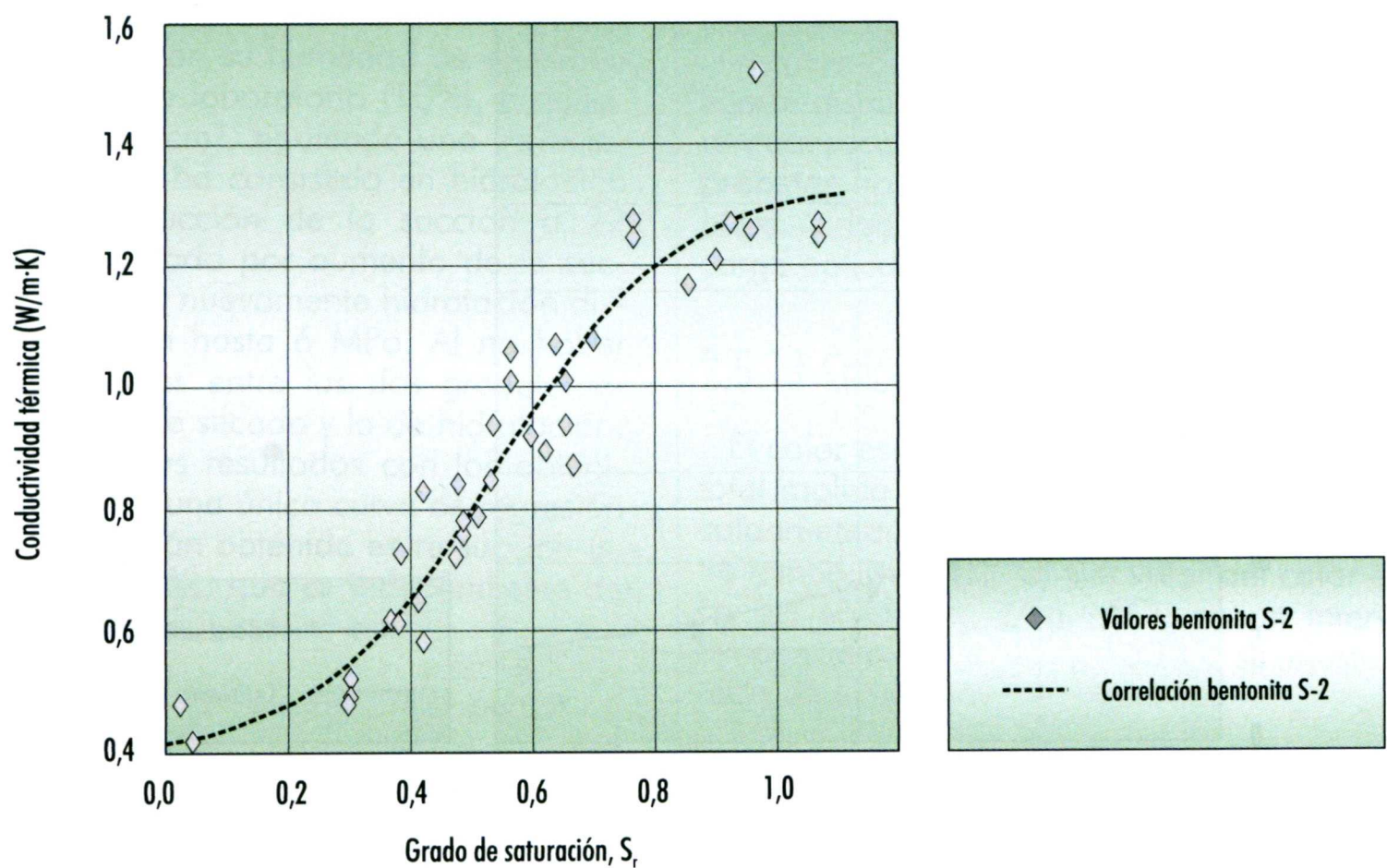


Figura 2.4: Conductividad térmica de la bentonita S-2 en función del grado de saturación.

Tabla 2.11
Composición química del agua intersticial de la bentonita S-2

	Agua intersticial	Agua sintética
Cl ⁻ (mg/l)	6570	6550±250
NO ₃ ⁻ (mg/l)	67	110±10
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	1490	1500±30
HCO ₃ ⁻ (mg/l)	170	27±5
SiO ₂ (mg/l)	12	8,3±0,5
Br (mg/l)	16	15±1
Ca ²⁺ (mg/l)	575	135±10
K ⁺ (mg/l)	11	21±1
Mg ²⁺ (mg/l)	1 100	600±30
Na ⁺ (mg/l)	2425	3750±100
Mo (mg/l)	0,13	
Sr (mg/l)	12	
B (mg/l)	0,38	
Ni (mg/l)	0,73	
Cu (mg/l)	0,37	
Zn (mg/l)	4,8	
pH	7,2	7,3±0,2
Conductividad eléctrica (C.E.) (mS/cm)	18	18,5±0,2
Eh (mV)		430±30

0,10 M, en los que no se pudo diferenciar entre los valores de K_d para las concentraciones experimentales de Cesio, pues éste es retenido por la bentonita en porcentajes iguales o superiores al 98%.

2.5.16 Análisis bacteriológico

Sólo se realizó un estudio bacteriológico preliminar sobre una muestra de bentonita S-2 [30]. Como tanto la extracción de la muestra como su posterior tratamiento (secado y molido), no se realizaron en condiciones de esterilidad, los microor-

ganismos presentes en la muestra son una mezcla de los naturales y los introducidos en el tratamiento previo de la bentonita. La estimación del número de bacterias de los diferentes grupos se realizó por el método del número más probable (MPN) (Tabla 2.14). El número de bacterias aerobias y sulfuro oxidantes fue mayor del esperado, no pudiéndose estimar su número correctamente. Únicamente se realizaron análisis de presencia o ausencia de determinados grupos de bacterias, sin realizar estimaciones de su número.

Tabla 2.12
Valores de K_d (ml/g) en función del pH y de la concentración de Cs en los ensayos a fuerza iónica 0,004 M. Bentonita S-2

pH _{final}	[Cs] = 10 ⁻³ M	[Cs] = 10 ⁻⁵ M	[Cs] = 10 ⁻⁷ – 10 ⁻⁹ M
7,25	425 ± 20	910 ± 155	11550 ± 290
↓	485 ± 15	975 ± 190	↓
↓	560 ± 15	1270 ± 220	↓
8,34	730 ± 70	1390 ± 290	15000 ± 1120

Tabla 2.13
Valores de K_d (ml/g) obtenidos para la bentonita S-2 en los ensayos a fuerzas iónicas de 0,01 M y 0,1 M

	[Cs] = 10 ⁻⁷ – 10 ⁻⁹ M
Fuerza iónica 0,01 M	9400 – 11600
Fuerza iónica 0,1 M	4700 – 5800

Tabla 2.14
Análisis bacteriológico preliminar de la bentonita S-2

Tipo de bacteria	Número Más Probable (MPN) por gramo
Aerobias	> 2500
Anaerobias	+
Azufre oxidantes	> 2500
Sulfato reductoras	+

El signo + indica presencia de bacterias

3

SELECCION Y TRATAMIENTO DE LA BENTONITA FEBEX

3.1 Selección

Como se ha dicho en el Capítulo 2, en estudios anteriores al proyecto FEBEX se seleccionó el yacimiento de bentonita Cortijo de Archidona (Serrata de Níjar, Almería), explotado por Minas de Gádor, S.A., como material de referencia para relleno y sellado de almacenamientos de residuos radiactivos de alta actividad. Consecuentemente, se decidió utilizar la bentonita de este yacimiento para el proyecto FEBEX.

Dada la variabilidad textural y cromática que se observa en la bentonita del yacimiento, se decidió investigar en detalle una zona, dentro de la explotación, con el objeto de extraer y tratar la cantidad requerida (unas 300 toneladas) para el proyecto FEBEX de bentonita homogénea y con las propiedades exigidas. Posteriormente a la investigación del yacimiento, Minas de Gádor propuso utilizar una pila de acopio de unas 900 toneladas de bentonita rosada, que había sido extraída previamente de la zona investigada. Después de su análisis, se decidió utilizar la bentonita de la pila puesto que cumplía con las características técnicas exigidas y se evitaba la fase de extracción.

En el informe 70-IMA-L-3-1 *Selección, homogeneización y análisis de una partida de bentonita procedente de la cantera "La Serrata" (Almería) para el proyecto FEBEX* [31], se describe en detalle el proceso completo de selección y tratamiento de la bentonita.

3.1.1 Características de la corta

El yacimiento está situado en una zona afectada por el vulcanismo cenozoico de tipo andesítico-dacítico. La mayor parte de los materiales volcánicos están afectados por procesos de alteración epigenética posteriores al vulcanismo, de carácter neumatolítico e hidrotermal, en relación con una intensa fracturación.

La explotación se configura como una corta cuyos hastiales están compuestos por rocas volcánicas estériles y la bentonita aflora exclusivamente en la base de la corta. El material de mejor calidad está situado en el centro de la misma. En rasgos generales, el yacimiento tiene las características siguientes:

- La presencia de bentonita coincide con la dirección de las fallas de distensión de la cizalla de La Serrata. El plano de falla del yaci-

miento es subvertical, con buzamiento al norte o al sur.

- La falla marca el límite entre la roca de techo y la bentonita.
- La roca a techo es riodacita compacta de color gris claro.
- La roca a muro es toba volcánica formada por abundantes cantos volcánicos de distinta naturaleza.
- La composición de las rocas encajantes es de gran importancia, puesto que parece existir correspondencia entre la calidad de la bentonita y la naturaleza de dichas rocas.
- La bentonita más limpia se localiza siempre en el techo y en el centro, donde predominan los materiales blancos y rosados, mientras que en el muro la bentonita es más impura.
- De la disposición de la bentonita parece deducirse que las fracturas han favorecido la circulación de fluidos para la alteración hidrotermal de las rocas asociadas.

En la Figura 3.1 se muestra un esquema de la corta.

3.1.2 Muestreo de la bentonita en la corta y en la pila de acopio

De acuerdo con las características de la explotación, se seleccionó en el centro de la corta (Figura 3.1) una superficie de 1800 m² sobre la que se señalaron 6 perfiles (P0 a P5), con dirección norte-sur, en los que se tomaron, en calicatas, 22 muestras de aproximadamente 2 kg, con las referencias C-0.1 a C-0.7, C-1.1 a C-1.5, C-2.1 a C-2.3, C-3.1 a C-3.3, C-4.1 a C-4.3 y C-5.2. (La letra C indica corta, la primera cifra responde al perfil del muestreo, y la segunda al número de la calicata dentro del perfil, tal como se explica en el Procedimiento 70-IMA-G-3-70 [32]). En un punto intermedio entre los perfiles 1 y 2 se tomó una muestra con la referencia C-A y en una calicata de mayores dimensiones, situada en la parte central de la zona investigada, se tomaron otras 5 muestras, denominadas CC0-1 a CC0-5.

Para evaluar las características de la bentonita de la pila de acopio, se tomaron 8 muestras repartidas a lo largo del contorno de la misma, que se denominaron PI-1 a PI-8.

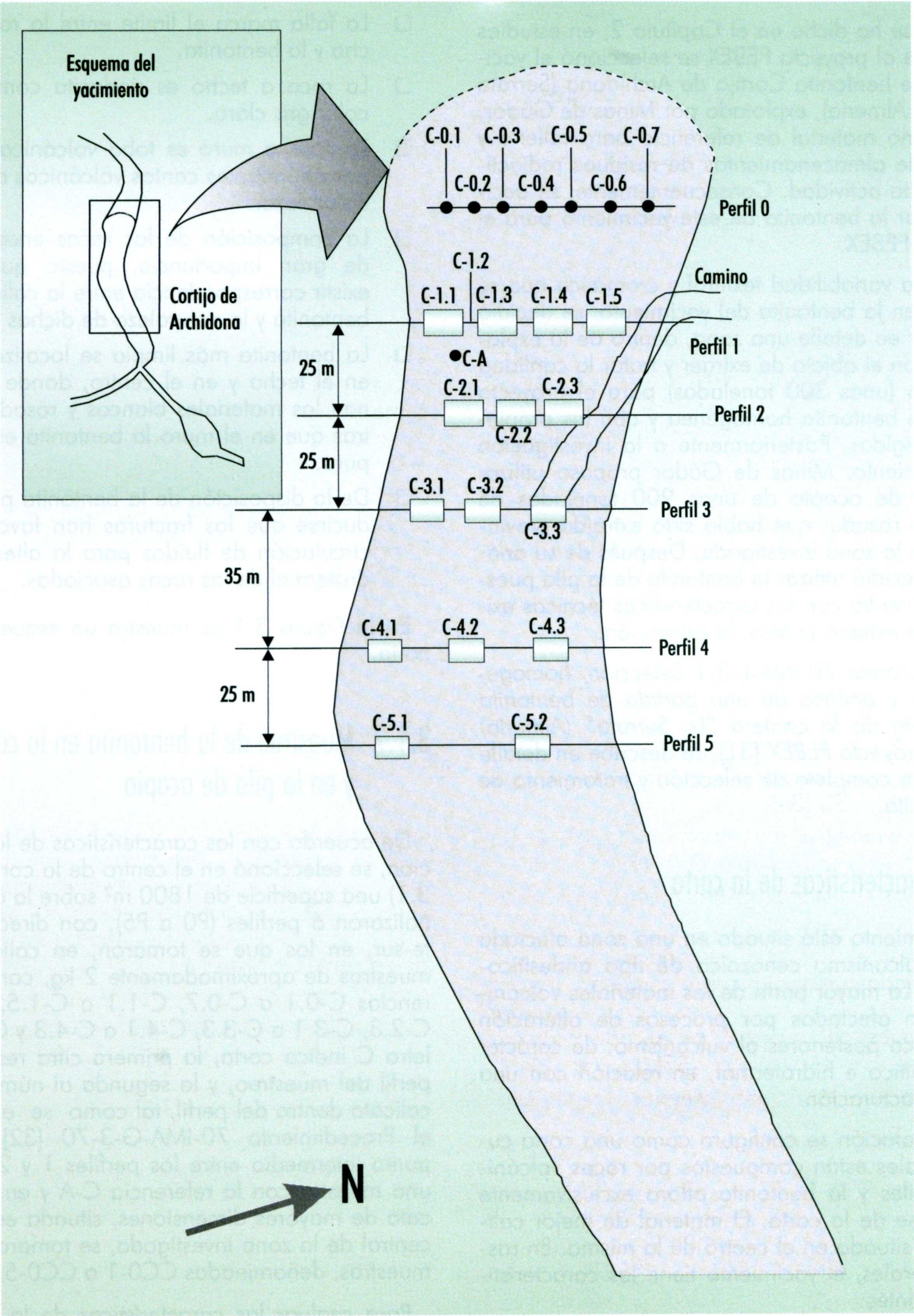


Figura 3.1: Esquema de la Corta Cortijo de Archidona con indicación de la posición de las calicatas de muestreo.

3.1.3 Ensayos de laboratorio

Las propiedades de la bentonita se han determinado mediante ensayos de laboratorio realizados en CIEMAT, sobre las muestras procedentes del muestreo indicado en el apéndice cartado anterior.

3.1.3.1 Preparación de las muestras

De acuerdo con los Procedimientos 70-IMA-G-3-70 [32] y 70-IMA-G-3-71 [33], antes de su ensayo, las muestras se prepararon mediante los procesos siguientes:

- ❑ Extendido de las muestras en bandejas y secado al aire de las muestras C-2.1, C-3.2 y C-4.3. Las demás muestras se secaron en estufa, a 60° C, durante 48 horas.
- ❑ Disgregación de terrones con mazo de goma y rodillo de madera.
- ❑ Cribado de las muestras para determinar el porcentaje de partículas menores de 5 mm en la muestra después del secado y disgregación de terrones.

3.1.3.2 Procedimientos de ensayo

Sobre la fracción menor de 5 mm, se han realizado los ensayos siguientes, conforme a los procedimientos que se indican:

- ❑ Determinación de la humedad: Norma UNE 103-300-93 [34].
- ❑ Granulometría por tamizado hasta 74 μm : Procedimiento 70-IMA-G-0-05 [35].
- ❑ Límites de Atterberg: Procedimiento 70-IMA-G-0-12 [36].
- ❑ Presión de hinchamiento de probetas compactadas uniaxialmente a densidad seca de 1,6 g/cm³ y con la humedad alcanzada después del proceso de secado: Procedimiento 70-IMA-G-0-21 [37].
- ❑ Superficie específica externa, BET: Procedimiento 70-IMA-G-0-11 [38].

3.1.3.3 Resultados de los ensayos y selección de la bentonita

Los resultados de los ensayos se incluyen en las Tablas 3.1, 3.2 y 3.3.

Para la selección de la bentonita se establecieron las tres especificaciones siguientes (Procedimiento 70-IMA-G-3-70 [32]):

- ❑ El contenido de partículas mayores de 5 mm tiene que ser inferior al 5% y la fracción de partículas menores de 74 μm tiene que ser superior al 85%.
- ❑ El límite líquido tiene que ser superior al 90%.
- ❑ La presión de hinchamiento tiene que estar comprendida entre 30 y 70 kg/cm², para una densidad seca de 1,60 g/cm³.

Como se puede observar en la Tabla 3.3, para los ensayos de muestras de la pila de acopio, los valores medios del límite líquido y de la presión de hinchamiento cumplen las condiciones exigidas para la bentonita. El porcentaje de partículas mayores de 5 mm es superior al especificado, pero esta especificación se cumple fácilmente pasando el material por un tamiz de 5 mm. Por consiguiente, se eligió la bentonita de la pila puesto que podía cumplir las especificaciones técnicas exigidas. No obstante, era necesario un tratamiento de homogeneización, secado y clasificación para obtener el material final a utilizar en la fabricación de los bloques.

3.2 Homogeneización y secado en la cantera

3.2.1 Homogeneización, secado y muestreo

El primer tratamiento de la bentonita se realizó en la corta y consistió básicamente en homogeneización y secado, siguiendo el Procedimiento 70-IMA-G-3-71 [33]. A continuación se reseña brevemente este tratamiento, que se describe en detalle en los siguientes informes de CIEMAT y AITEMIN:

- ❑ 70-IMA-L-3-1 Selección, homogeneización y análisis de una partida de bentonita procedente de la cantera "La Serrata" (Almería), para el Proyecto FEBEX [31].
- ❑ 70-AIT-L-3-01 Proceso de homogeneización, oreo, secado y muestreo de una pila de bentonita en la mina "La Serrata" (Almería) [39].

En primer lugar se acondicionó y allanó una superficie utilizada frecuentemente para la homogeneización y secado de la bentonita, por lo que la base estaba cubierta por una capa de bentonita compactada, lo que facilitó la preparación de una explanada idónea para realizar las operaciones siguientes.

Tabla 3.1
Resultados de ensayos en muestras de la corta

Referencia muestra	w %	<5 mm %	<2 mm %	<74 μm %	w _L %	w _P %	I _P %	ρ _d g/cm ³	P _s kg/cm ²	SE(*) m ² /g
C-0.1	14,1	98	98	83	93			1,60	10	
C-0.2	16,9	82	98	81	81			1,59	49	
C-0.3	16,3	85	96	85	118			1,59	18	
C-0.4	21,3	100	100	96	92			1,60	77	
C-0.5	21,4	100	100	96	91			1,61	56	
C-0.6	23,0	100	100	96	95			1,57	63	
C-0.7	20,7	100	100	94	109			1,61	64	
C-1.1	16,0	100	100	97	96			1,61	56	
C-1.1.2	16,0	100	100	97	101			1,60	>62	19
C-1.3	16,0	100	100	97	102			1,58	53	19
C-1.4	14,0	95	100	91	108			1,58	>68	29
C-1.5	12,0	98	100	90	104			1,57	51	
C-A	12,0	100	100	90	88			1,61 1,60	>68 59	
C-2.1	20,0	76	99	90	101 104	52	52	1,61	43	28
C-2.2	12,0	100	99	87	99			1,60	38	32
C-2.3	17,0	99	99	93	100			1,62 1,59	>68 30	40
C-3.1	16,0	100	100	95	93			1,58	40	34
C-3.2	19,0	100	100	94	99			1,54 1,61	51 54	22
C-3.3	11,0	91	100	94	94			1,60	24	46
C-4.1	9,0	94	100	84	86			1,59	9	48
C-4.2	14,0	47	75	31	68			1,62 1,60	53 33	56
C-4.3	20,0	100	100	95	106			1,61	>57	34
C-5.2	9,0	100	100	53	65			1,59	13	51
MEDIA	15,9	94	98	87	96	52	52	1,60	43	35
DESV. EST.	4,0	12	5	15	12			0,02	19	12

(*) SE: Superficie específica externa BET

Tabla 3.2
Resultados de ensayos en muestras de calicata central de la corta

Referencia muestra	w %	<5 mm %	<2 mm %	<74 μm %	w _L %	ρ _d g/cm ³	P _s kg/cm ²
CCO-1	22,3	100	98	71	68	1,64	18
CCO-2	28,1	100	100	92	81	1,62	42
CCO-3	30,5	98	99	89	87	1,65	>71
CCO-4	29,4	96	97	87	78	1,60	40
CCO-5	27,4	99	98	95	96	1,69	77
MEDIA	27,5	99	98	87	82	1,64	44
DESV. EST.	3,2	2	1	9	10	0,03	24

Tabla 3.3
Resultados de ensayos en muestras de la pila de acopio

Referencia muestra	w %	<5 mm %	<2 mm %	<74 μm %	w _L %	ρ _d g/cm ³	P _s kg/cm ²
PI-1	22,9	77,0	99,5	81,5	75	1,59	48
PI-2	19,1	75,5	97,7	87,1	94	1,60	56
PI-3	21,6	88,3	97,6	86,4	92	1,56	55
PI-4	25,5	100,0	100,0	94,2	104	1,59	60
PI-5	21,3	83,5	99,4	85,6	90	1,61	48
PI-6	19,1	99,6	98,6	89,6	96	1,61	48
PI-7	26,0	98,6	99,6	80,9	80	1,60	50
PI-8	18,8	100,0	98,9	90,3	90	1,60	38
MEDIA	21,8	90,3	98,9	87,0	90	1,60	50
DESV. EST.	2,8	10,6	0,9	4,5	9	0,02	7

En segundo lugar, el material de la pila de acopio se transportó a la explanada, donde se extendió en una sola parva con espesor uniforme de unos 0,30 m.

La homogeneización se efectuó por el método habitualmente empleado por Minas de Gádor, que consta de las operaciones siguientes:

- ❑ Arado y volteo del material mediante máquinas de cadenas.
- ❑ Desmenuzado de terrones y homogeneización por medio de rotavátor.
- ❑ Retirada manual de los cantos volcánicos.
- ❑ Secado natural durante un día aproximadamente.

En las Figuras 3.2 y 3.3 se puede ver el aspecto de la parva durante estas operaciones.

Cada ciclo de secado y homogeneización reduce el tamaño de los terrones en la parva. Después de cuatro ciclos de tratamiento, los técnicos encargados consideraron que se había obtenido el resultado requerido.

Después de estos cuatro ciclos de secado y homogeneización, se tomaron muestras de la parva para comprobar, mediante ensayos de laboratorio, las características medias y homogeneidad de la bentonita tratada. Para ello se desecharon los bordes de la parva y se delimitó con estaquillas una superficie de 1 200 m² con un espesor medio de 0,30 m. Esta superficie se dividió en 48 cuadrículas de 25 m² cada una, de acuerdo con el Procedimiento 70-IMA-G-3-71 [33], y de cada cuadrícula se tomó una muestra de 3 a 4 kg. Las muestras, numeradas de P-1 a P-48, se empaquetaron en bolsas de plástico para su envío al laboratorio de CIEMAT.

Después del muestreo, la parva se recogió formando una pila, en espera de los resultados de los ensayos de laboratorio. Si los resultados indicaban que la homogeneización era la requerida, la bentonita se podría transportar a la fábrica para

continuar el tratamiento; en caso contrario se debía continuar la homogeneización en la parva.

3.2.2 Ensayos de laboratorio

De cada una de las muestras P-1 a P-48, se tomó la mitad y se mezclaron todas ellas para formar una muestra única, de la que por cuarteos sucesivos se obtuvieron 10 alícuotas, denominadas H-1 a H-10. En estas 10 muestras y en otras 11 tomadas de entre las mitades no mezcladas de las 48 muestras P, se realizaron los ensayos de laboratorio siguientes: determinación de la humedad, granulometría, límites de Atterberg y presión de hinchamiento. Los resultados de los ensayos se muestran en la Tabla 3.4.

Como se puede ver en la tabla, los valores medios de las distintas propiedades son muy similares en las dos series de muestras (H y P) y además cumplen las especificaciones exigidas. La desviación estándar es menor para las muestras procedentes de la mezcla; es decir, en el laboratorio se ha incrementado la homogeneidad. Sin embargo, se consideró que la bentonita apilada tenía un grado de homogeneidad adecuado a los efectos prácticos de un proceso in-



Figura 3.2: Aspecto de la parva el segundo día del proceso de homogeneización.

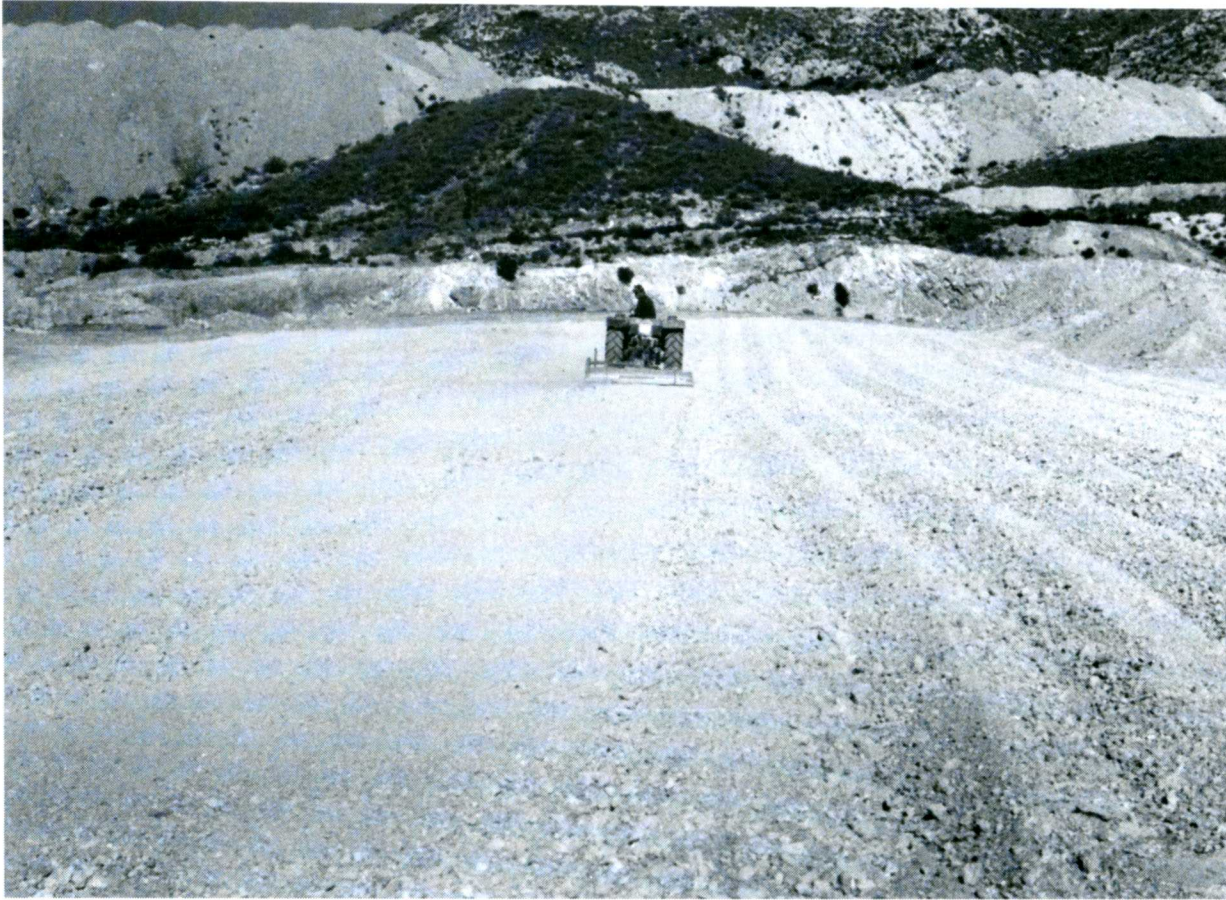


Figura 3.3: Aspecto de la parva una vez pasado el rotavátor.

dustrial, por lo que se decidió pasar a la fase prevista de tratamiento en la fábrica.

3.3 Tratamiento en la fábrica, envasado y muestreo

En la fábrica se trataron unas 600 toneladas de bentonita. Para el tratamiento se ha seguido el Procedimiento 70-IMA-G-3-71 [33]. El conjunto de operaciones y controles realizados se describe en los informes siguientes:

- ❑ 70-IMA-L-3-10 *Proceso de una partida de bentonita en Fábrica de Minas de Gádor (Almería) para el Proyecto FEBEX* [40].
- ❑ 70-AIT-L-3-02 *Procesado de bentonita en la planta de Minas de Gádor* [41].

Esta fase de tratamiento comprende las operaciones siguientes: desmenuzado de la arcilla, secado, clasificación, envasado y muestreo.

Antes de iniciar el tratamiento, se adaptaron las instalaciones de la fábrica al procesado a efectuar y se realizó una prueba con el fin de establecer el régimen de tratamiento óptimo.

3.3.1 Desmenuzado

Mediante un desmenuzador de palas, se fraccionó el material hasta obtener un tamaño máximo de salida de 10 cm. El desmenuzador se alimentaba mediante cinta transportadora a partir de una pila de bentonita situada junto a la instalación.

El material ya fraccionado se transportó, mediante un alimentador lineal, a un desintegrador de rodillos lisos y de rodillos con cuchillas, en el que se obtuvo un producto granulado con tamaño máximo de 5 cm.

El procedimiento establece que si, después del proceso anterior, la humedad está comprendida entre 13% y 15%, el material puede pasar directamente a la clasificación, pero el valor medio de la humedad era del 21%, por lo que la bentonita pasó al circuito de secado.

3.3.2 Secado

El material pasa por medio de una cinta transportadora regulable a un desecador rotatorio de 20 m de longitud y 1,5 m de diámetro. La arcilla recorre la longitud del desecador por efecto de la

Tabla 3.4
Resultados de ensayos en muestras de la pila de acopio después de su homogeneización

Referencia muestra	W %	<5 mm %	<2 mm %	<74 μm %	w _L %	w _P %	I _P %	ρ _d g/cm ³	P _s kg/cm ²	SE(*) m ² /g
H-1	22,2	94,1	98,5	85,6	99	50	49	1,63	54	
H-2	22,5	95,3	98,1	86,1	98	50	48	1,60	44	
H-3	22,1	98,8	97,0	85,2	97	51	46	1,60	48	
H-4	21,8	98,3	98,2	89,2	96	47	48	1,59	>58	
H-5	21,8	98,7	97,8	85,8	101	50	51	1,59	45	
H-6	22,2	94,2	98,9	87,5	101	50	51	1,60	47	
H-7	21,7	97,9	98,6	86,9	96	49	47	1,60	57	
H-8	21,6	97,4	97,5	88,9	103	50	53	1,61	32	
H-9	21,5	98,9	99,0	85,6	97	51	46	1,61	36	
H-10	21,4	98,6	98,6	88,1	95	48	47	1,62	>54	
MEDIA	21,9	97,2	98,2	86,9	98	50	49	1,61	45	
DESV. EST.	0,4	1,9	0,6	1,5	3	1	2	0,01	8	
P-1	21,7	98,4	98,8	88,3	93	49	44	1,61	39	33
P-10	20,5	92,7	96,6	87,5	104	52	52	1,60	34	37
P-16	20,3	98,4	98,7	87,0	97	50	47	1,59	59	38
P-18	22,4	96,3	97,4	85,5	104	54	50	1,60	46	34
P-24	19,5	100,0	97,3	86,6	98	56	42	1,60	40	40
P-26	21,8	100,0	97,1	84,3	100	56	44	1,61	60	40
P-31	25,5	96,9	98,8	80,3	93	51	42	1,60	40	39
P-38	25,9	99,5	97,1	81,3	89	48	41	1,59	52	35
P-40	24,8	98,6	98,1	85,0	91	51	40	1,61	>54	38
P-47	19,8	96,8	98,1	84,0	97	49	47	1,62	>67	41
P-7	23,4	97,7	97,2	84,1	100	50	50	1,63	>62	39
MEDIA	22,3	97,8	97,7	84,9	97	51	45	1,61	46	38
DESV. EST.	2,3	2,1	0,8	2,5	5	3	4	0,01	10	3

(*) SE: Superficie específica externa BET.

gravedad, la rotación y la acción de las paletas volteadoras, hasta alcanzar la salida.

El desecador se mantiene a una temperatura comprendida entre 50° y 60°C. La humedad después del secado fue del $13 \pm 2\%$, de acuerdo con la especificación, lo que se comprobó mediante un control sistemático.

También se realizaron controles para determinar la absorción de humedad por la bentonita durante el tiempo que transcurre entre la salida del desecador y el envasado. Los resultados obtenidos indicaron que cada 12 horas el porcentaje de humedad aumenta en dos unidades.

A la salida del desecador rotatorio, la bentonita se eleva hasta un silo de almacenamiento por medio de un elevador de cangilones.

3.3.3 Clasificación

El sistema de clasificación consta de dos partes: alimentación y cribado. La alimentación se efectúa mediante elevador de cangilones y tolva con trampilla regulable; es necesario mantener constante el volumen de material que llega a la criba para evitar que los finos sean parcialmente arrastrados con el rechazo. El cribado se efectúa por medio de un tamiz con malla de 5 mm y de inclinación controlada; el producto final (<5 mm) cae directamente por gravedad a la tolva de envasado.

3.3.4 Envasado y muestreo

El sistema de envasado consiste en una tolva de recepción del material, desde donde se realiza el llenado de grandes bolsas impermeables con capacidad para 1300 kg. Las bolsas son retiradas por medio de una carretilla elevadora hasta su lugar de almacenamiento. Se llenaron 233 bolsas, con un peso medio de 1280 kg; es decir, 298 toneladas de bentonita debidamente procesada de acuerdo con las especificaciones establecidas.

A causa de la absorción de humedad indicada en el Apartado 3.3.2, se estableció, como uno de los parámetros para el control de calidad, que el tiempo de permanencia del producto en el silo, al aire, a temperatura ambiente, no debía ser superior a 4 horas. También se estableció que la humedad del material en el momento del envasado debería estar comprendida entre el 12,5% y el 15,5%. La humedad se determinó en un 27% de las bolsas, sobre muestras de 0,5 kg tomadas durante el envasado.

Además, durante el envasado, se tomó una muestra de 8 a 10 kg por cada 2,5 toneladas, aproximadamente; en total 119 muestras, denominadas 70-IMA-3-4-1 a 70-IMA-3-4-119. Estas muestras serán utilizadas para la caracterización detallada de la bentonita y para la realización de ensayos experimentales de laboratorio.

4

ENSAYOS DE CARACTERIZACION

Como se ha dicho en el Apartado 3.3.4, después del tratamiento-procesado de la masa de bentonita, se tomaron muestras del producto final obtenido. El material de estas muestras es el destinado para realizar los ensayos de caracterización completa de la bentonita a emplear en la fabricación de bloques y para realizar los ensayos experimentales de laboratorio.

Los ensayos de caracterización a los que se refiere este informe han sido hechos por CIEMAT, UPC-DIT y CSIC-Zaidín, y los resultados se han presentado en los documentos siguientes:

- ❑ CIEMAT: 70-IMA-L-3-15 *Characterisation of "La Serrata" clay used in the FEBEX Project* [42].
- ❑ UPC-DIT: 70-UPC-L-3-01 *THM laboratory tests in FEBEX Phase 3* [43]
- ❑ CSIC-Zaidín: 70-ZAI-L-03-02 *Caracterización mineralógica y geoquímica de la bentonita inicial. Proyecto FEBEX* [44]

4.1 Muestras para los ensayos de laboratorio

Las muestras tomadas durante el envasado del producto final, a las que se asignó la referencia 70-IMA-3-4-1 a 70-IMA-3-4-119, empaquetadas en bolsas de plástico, se enviaron al laboratorio de CIEMAT. Mezclando la mitad de cada una de estas muestras se formó una muestra homogénea denominada 70-IMA-3-4-0.

A los laboratorios de las otras dos instituciones participantes (UPC-DIT y CSIC-Zaidín) se han enviado fracciones de la muestra homogénea.

En el laboratorio de CIEMAT se han hecho ensayos con un número variable de muestras sin mezclar (70-IMA-3-4-1 a 70-IMA-3-4-119), con objeto de verificar la variabilidad de los parámetros. Para simplificar la referencia, las muestras ensayadas se denominan muestras F- α , en que α es el número de la muestra 70-IMA-3-4- α de la que proviene; por ejemplo, la muestra F-17 es la 70-IMA-3-4-17. Además, se han hecho ensayos con cinco alícuotas de la muestra homogénea 70-IMA-3-4-0, con referencias A-1 a A-5, para contraste con los resultados de muestras F y de los otros laboratorios para los ensayos del mismo tipo. En consecuencia, en los ensayos del CIEMAT se distinguen ensayos sobre muestras sin mezclar (muestras F) y sobre la muestra homogénea (muestras A), mientras que en los otros dos laboratorios se

han utilizado siempre alícuotas de la muestra homogénea.

4.2 Propiedades de identificación

Los datos que se presentan en esta sección se han llamado propiedades de identificación (siguiendo la terminología de la ingeniería geotécnica) porque permiten obtener una primera idea del tipo de comportamiento físico-químico de una arcilla mediante ensayos sencillos.

4.2.1 Humedad

Se determinaron primeramente las humedades, pero las muestras se siguen conservando en sacos de plástico cerrados. Los resultados se presentan en la Tabla 4.1. Como se puede observar, la humedad media de las muestras sin mezclar (muestras F) es ligeramente inferior a la media de las determinaciones hechas sobre las alícuotas de la muestra homogénea (muestras A), 13,4% y 14,5%, respectivamente.

4.2.2 Límites de Atterberg

Se han realizado en 14 muestras sin mezclar (muestras F) y en 5 de la muestra homogénea (A-1 a A-5). Para su determinación se ha seguido el Procedimiento 70-IMA-G-0-12 [36]. Los resultados se presentan en la Tabla 4.1.

Los límites de Atterberg también han sido determinados por la UPC-DIT, siguiendo las normas de ensayo del Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo (CEDEX NLT/105/72 [45] y NLT 106/72 [46]). Los resultados se presentan en la Tabla 4.2.

El valor medio del límite líquido obtenido por la UPC-DIT es algo inferior (5%) al valor medio obtenido por CIEMAT en la muestra homogénea. No obstante, las determinaciones del límite líquido para una arcilla tan plástica como la bentonita pueden variar dependiendo de algunas modificaciones del método estándar para suelos normales. Por otra parte, la UPC-DIT ha realizado sólo 5 determinaciones, mientras que CIEMAT tiene gran experiencia en la determinación de los límites de Atterberg en la bentonita de este yacimiento, por lo que se considera que los resultados obtenidos por CIEMAT son más representativos.

En cualquier caso, el límite líquido del orden de 100 parece muy bajo para una bentonita con un contenido de montmorillonita superior al 90%

Tabla 4.1
Propiedades de identificación

Referencia muestra	w %	<74 μm %	<2 μm %	w _L %	w _P %	I _P	Peso específico	SE (*) m ² /g
F-2	14,8	93	65	103	52	49	2,75	28
F-4	15,1			105	53	48		31
F-17	16,0	92	69	100	53	46		34
F-18	15,0	92	67	111	53	48	2,62	38
F-22	15,1			110	52	51		35
F-37	13,3	93	69	100	52	51	2,67	35
F-58	11,9	92	59	101	54	47	2,75	30
F-59	12,7	92	66					31
F-65	11,9			108	51	47	2,77	26
F-75	11,7	92	63	96	51	45	2,68	32
F-79	12,3			101	50	51		33
F-93	13,1	93	64	104	47	57	2,73	26
F-102	14,1	93	66	103	52	51	2,65	33
F-109	11,9	93	66	100	47	53	2,72	34
F-119	12,3	93	67	103	51	52	2,70	35
MEDIA	13,4	93	65	103	51	50	2,70	32
DESV. EST.	1,5	1	3	4	2	3	0,05	3
A-1	14,4			98	54	44		28
A-2	14,7			98	55	52	2,68	30
A-3	14,4			98	55	47	2,75	32
A-4	14,3			100	60	50	2,72	32
A-5	14,5			98	58	42		29
MEDIA	14,5			98	56	47	2,72	30
DESV. EST.	0,2			1	3	4	0,04	2

(*) SE: Superficie específica externa BET.

Tabla 4.2
Límites de Atterberg

Muestra	Límite líquido	Límite plástico	Índice de plasticidad
n-1 (*)	94,5	46,4	48,1
n-2	92,5	46,8	45,7
n-3	92,0	48,4	43,6
n-4	91,5	45,3	46,2
n-5	94,2	46,3	47,9
MEDIA	92,94	46,64	46,30
DESV. EST.	1,34	1,13	1,83

(*) Denominación de UPC-DIT para las muestras ensayadas que son alícuotas de la muestra 70-IMA-3-4-0 recibida de CIEMAT

(como se muestra en el apartado 4.3) y con gran proporción de sodio como catión de cambio.

4.2.3 Granulometría

Los ensayos se han efectuado en 11 muestras sin mezclar (muestras F). Para la fracción superior a 74 μm , la granulometría se ha hecho por tamizado, según el Procedimiento 70-IMA-G-0-05 [35]. Para la fracción inferior a 74 μm se ha hecho por sedimentación, siguiendo el Procedimiento 70-IMA-G-0-06 [47]. Previamente a la determinación granulométrica, las muestras se hidrataron con una disolución de agua destilada y hexametáfosfato sódico durante 18 horas; y para favorecer la dispersión, se sometían a ciclos alternativos de agitación y ultrasonidos.

En la Figura 4.1 se muestra la curva granulométrica media con indicación de las desviaciones estándar; en la Tabla 4.1 se incluye el contenido de las fracciones de partículas inferiores a 74 μm y 2 μm . Las determinaciones granulométricas indican que la fracción inferior a 2 μm (tamaño arcilla) es del 65% en promedio; el 28% es de tamaño limo (tamaño de partículas entre 2 μm y 74 μm); y el 7% restante es de tamaño arena (superior a 74 μm).

También en el laboratorio de la UPC-DIT se ha realizado la granulometría en 5 muestras (n-1 a n-5, alícuotas de la 70-IMA-3-4-0, recibida de CIEMAT), por tamizado para las partículas superiores a 74 μm siguiendo la Norma NLT 104/72

[48] y por medio de técnicas de sedimentación para las partículas menores de 74 μm , según el Procedimiento British Standards 1377:1975 [49].

Las curvas obtenidas para las cinco muestras utilizadas se representan en la Figura 4.2. Como se puede observar en la figura, el porcentaje medio estimado de tamaño inferior a 2 μm es del orden del 45%; el contenido medio de tamaño limo (entre 2 y 74 μm) del orden del 42%; y el porcentaje medio de tamaño arena es del 13%.

Los resultados de ambos laboratorios son muy distintos. Las diferencias se deben a la forma de preparación de la muestra antes de realizar la determinación granulométrica. La granulometría de una arcilla de alta plasticidad es muy dependiente del grado de dispersión que se consiga en el tratamiento previo. Sin embargo, la sensibilidad de la granulometría y de los límites de Atterberg (especialmente el límite líquido) al tratamiento de la muestra son indicadores del comportamiento físico de la bentonita. El comportamiento puede variar para muestras del mismo depósito, con igual composición mineralógica, pero diferente estado de agregación.

4.2.4 Superficie específica externa

Los ensayos se han realizado en 15 muestras sin mezclar (muestras F) y en 5 de la muestra homogénea (muestras A), siguiendo el Procedimiento 70-IMA-G-0-11 [38]. En este método se usa nitrógeno como gas absorbente, que no ocupa el es-

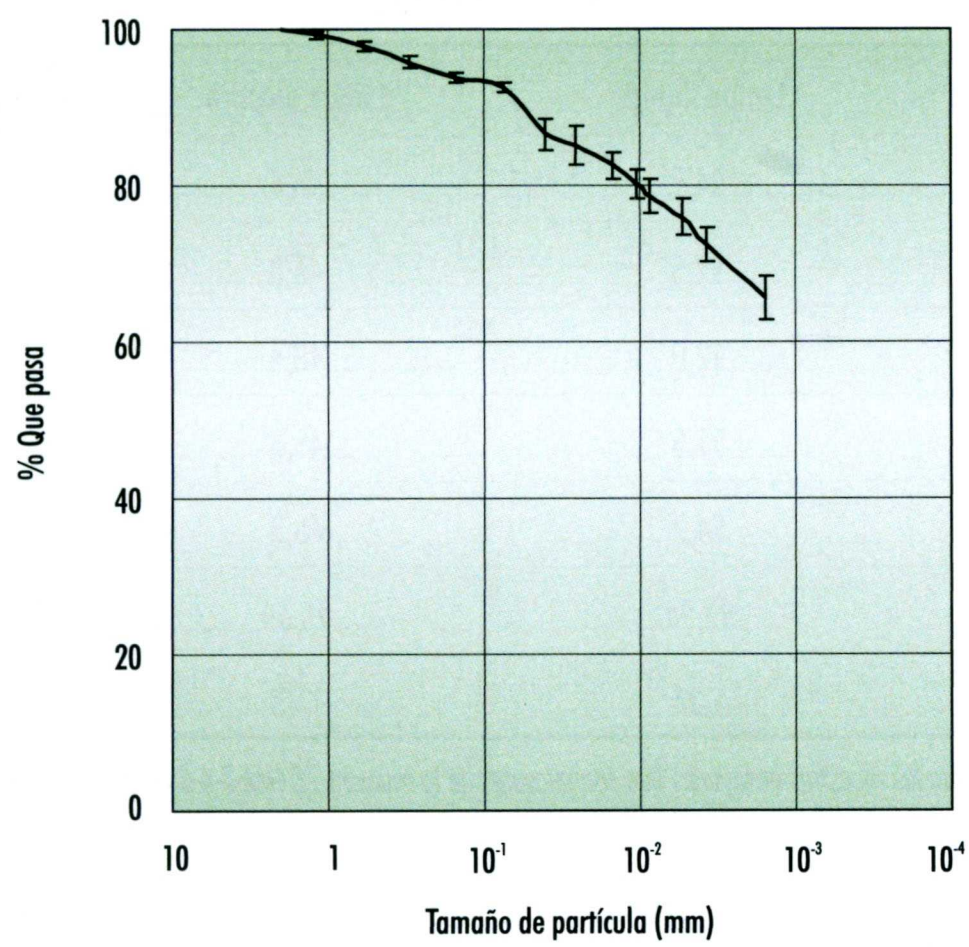


Figura 4.1: Curva granulométrica media, con indicación de las desviaciones estándar, para las 11 muestras analizadas.

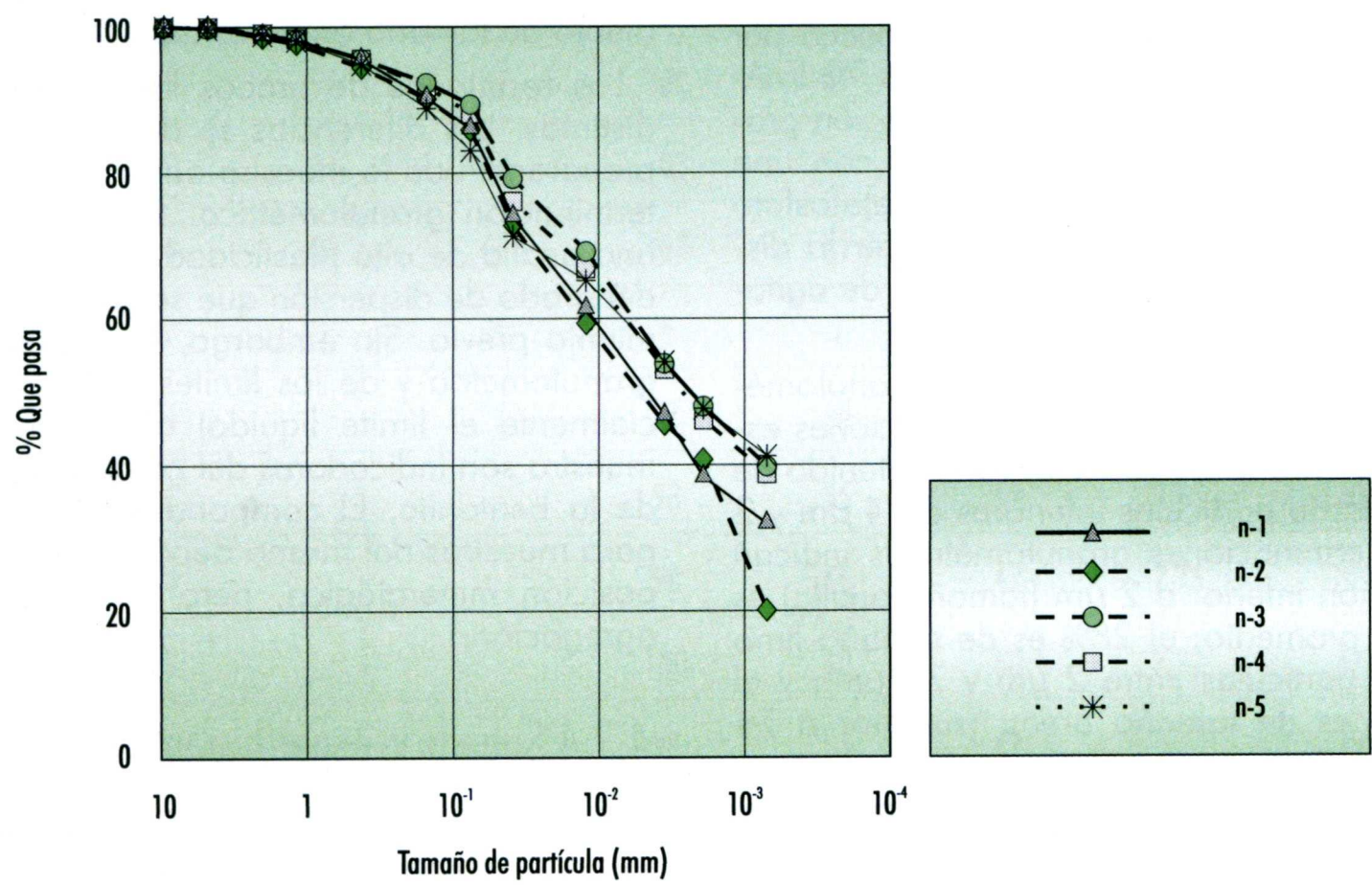


Figura 4.2: Curvas granulométricas.

pacio interlaminar, por lo que la medida se refiere sólo a la superficie externa. El cálculo se ha realizado mediante el método BET del punto único.

Los resultados obtenidos figuran en la Tabla 4.1. Los valores medios de la superficie específica externa (BET) son de 32 m²/g y 30 m²/g para las series de muestras F y A, respectivamente. Este valor de la superficie externa es muy bajo para una bentonita con un contenido de montmorillonita superior al 90%, como se indica en el Apartado 4.3.

4.2.5 Peso específico

Se determinó en 10 muestras sin mezclar (muestras F) y en 3 de la muestra homogénea (muestras A). Para la determinación se utilizaron los picnómetros clásicos y agua bidestilada como medio de suspensión, según el Procedimiento 70-IMA-G-0-9 [50].

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 4.1. Los valores medios son 2,70 y 2,72 para las muestras F y A, respectivamente. El peso específico obtenido es inferior al valor medio que se ha determinado en análisis hechos en años anteriores al FEBEX para la bentonita del mismo yacimiento (Capítulo 2).

4.3 Caracterización mineralógica y química

La caracterización mineralógica se ha hecho en 10 muestras sin mezclar (muestras F) y en 5 de la muestra homogénea (muestras A) en los laborato-

rios de CIEMAT y en 3 alícuotas de la muestra homogénea en los del CSIC-Zaidín. Los análisis químicos se han realizado en 4 muestras de tipo F y en 2 de tipo A en CIEMAT y en 4 alícuotas de la muestra homogénea en CSIC-Zaidín.

4.3.1 Caracterización mineralógica

4.3.1.1 Difracción de rayos X

Métodos de análisis

Para su preparación, las muestras se secaron a 60°C y se molieron hasta obtener un tamaño de grano inferior a 60 µm.

El contenido en minerales esenciales se determinó en la muestra total por difracción de rayos X (DRX), con un difractómetro Philips PW-1370, por el método del polvo en un portamuestras plano giratorio. La velocidad de barrido fue de 2°/min, en un intervalo de barrido entre 2° y 70° de 2θ. La semicuantificación se efectuó utilizando los factores reflectantes tomados de Schultz (1964) [51] y Barahona (1974) [52] que aparecen en la Tabla 4.3.

Los minerales accesorios fueron determinados por medio de un microscopio electrónico de barrido acoplado a un sistema de análisis de rayos X dispersivo de energía, después de haber sido identificados y separados mediante un microscopio estereoscópico.

Tabla 4.3
Reflexiones y factores reflectantes

Mineral	Reflexión (Å)	Factor reflectante
Filosilicatos totales (esmeclita, Sm)	4,45	0,1-0,15
Cuarzo (Qz)	3,34	1,5
Feldespatos-K (K-Fd)	3,24	1,0
Plagioclasa (Plag)	3,18	1,0
Cristobalita (Cri)	4,07	0,6
Tridimita (Tri)	4,30	0,6
Calcita (Cc)	3,03	1,0

La fracción menor de $2\ \mu\text{m}$ se ha obtenido por suspensión, sedimentación y filtrado. Después se prepararon los agregados orientados (AO), se trataron con etilenglicol y dimetilsulfóxido y se calentaron a 300° y 550°C para determinar los minerales de la arcilla en la fracción menor de $2\ \mu\text{m}$ por DRX.

Se han realizado también determinaciones analíticas en el laboratorio del CSIC-Zaidín, siguiendo métodos similares.

Las muestras se secaron igualmente a 60°C y se molieron hasta pasar por el tamiz ASTM de 270 mallas ($53\ \mu\text{m}$).

El análisis mineralógico se ha realizado también con un difractómetro de rayos X, Philips PW-1730, con monocromador de grafito y velocidad de exploración de $2^\circ/\text{min}$. También se ha utilizado un segundo difractómetro Philips 1710/100 con radiación $\text{Cu-K}\alpha$, monocromador de grafito y velocidad de exploración de $1,2^\circ/\text{min}$. El estudio de la muestra total se realizó sobre portamuestras plano y se obtuvieron diagramas de polvo desde 2° a 80° de 2θ . Para realizar el cálculo semicuantitativo de los minerales presentes en las muestras, se midieron sobre el diagrama de polvo las áreas de los picos diagnóstico de los minerales y se corrigieron por sus factores reflectantes. Los valores de los factores reflectantes son los indicados anteriormente en la Tabla 4.3.

Sobre la fracción menor de $2\ \mu\text{m}$, separada por sedimentación, se utilizó la técnica del agregado orientado (AO) por sedimentación a temperatura ambiente y agregado orientado solvatado con etilenglicol (AO+EG). En este último caso, se equilibró la muestra con vapor de etilenglicol a 60°C en un desecador apropiado.

Muestra total — Resultados

En la Tabla 4.4 se recoge la composición mineralógica semicuantitativa de la muestra total. Los resultados indican que la principal asociación mineralógica está formada por esmectita (Sm), cuarzo (Q_z), plagioclasa (Plag) y cristobalita (Cri). El feldespato potásico (K-Fd), la tridimita (Tri) y la calcita (Cc) aparecen usualmente como trazas.

La esmectita es el principal mineral y su contenido medio es del 93% y 92% para las muestras F y A, respectivamente.

Los diagramas DRX de las diferentes muestras se representan en las Figuras 4.3 a 4.7.

Entre los minerales accesorios detectados por el microscopio electrónico de barrido, se encuentran: carbonatos (dolomita, calcita, barita, celestina), fosfatos (apatito, xenotima, monacita), óxidos (ilmenita, magnetita), micas (sericita, biotita, biotita cloritizada), silicatos (zircón, plagioclasa, silicatos de Al con Fe y Mg, cuarzo y ópalo), y sulfuros (pirita).

Los diagramas obtenidos para el polvo en el laboratorio del CSIC-Zaidín se representan en las Figuras 4.8, 4.9 y 4.10. El contenido de esmectita es del 94%. De acuerdo con la reflexión (060) se trata de una esmectita dioctaédrica.

Es notablemente coincidente el resultado de ambos laboratorios en la estimación del contenido de esmectita y muestran que es extraordinariamente alto.

Fracción menor de $2\ \mu\text{m}$ — Resultados

La composición mineralógica de la fracción menor de $2\ \mu\text{m}$ indica que las muestras son de esmectita casi pura: el pico observado, en el agregado orientado (AO) no tratado, a $14,5\ \text{\AA}$ cambia a una reflexión muy fuerte, a $16,9\ \text{\AA}$ aproximadamente, cuando se trata con etilenglicol, y se colapsa a $10\ \text{\AA}$ cuando se calienta a 300°C .

Los diagramas de DRX de las muestras (AO) tratadas y no tratadas, junto con los obtenidos, por encargo de CIEMAT, en la UAM, con fines comparativos, se muestran en las Figuras 4.11 a 4.16.

Los diagramas de agregado orientado sin solvatar, y los solvatados con etilenglicol, obtenidos en los ensayos realizados en el laboratorio del CSIC-Zaidín, se representan en las Figuras 4.17 a 4.22.

Sobre los diagramas de agregado orientado solvatados con etilenglicol (Figuras 4.18, 4.20 y 4.22) se observa la presencia de entre un 10% y un 20% de interestratificados de esmectita/ilita, según el método de Moore y Reynolds [53], en base a la distancia entre los picos 001/002 y 002/003, por lo que se concluye que la esmectita utilizada es dioctaédrica y contiene un 15% de illita interestratificada.

4.3.1.2 Análisis térmico diferencial y termogravimetría (ATD y TG)

Las características térmicas de la muestra total se determinaron en las muestras A-1 y A-5 (muestra homogénea), usando un equipo DTA Perkin-Elmer 1700, con una velocidad de barrido de

Tabla 4.4
Composición mineralógica semicuantitativa de la muestra total

Referencia muestra	Sm %	Qz %	Plag %	Cri %	K-Fd %	Tri %	Cc %
F-2	89	2	2	2	0	1	1
F-18	92	2	3	3	0	Tr(*)	Tr
F-37	92	3	2	2	Tr	Tr	Tr
F-58	96	2	1	1	Tr	Tr	Tr
F-65	94	2	2	2	0	Tr	Tr
F-75	89	3	4	2	0	Tr	2
F-93	95	1	2	2	Tr	2	Tr
F-102	95	2	2	1	0	Tr	Tr
F-109	93	1	3	2	0	Tr	Tr
F-119	92	2	2	3	1	Tr	Tr
MEDIA	93±2	2±1	3±1	2	Tr	Tr	Tr
A-1	81	3	10	Tr	3	Tr	2
A-2	94	1	1	2	0	1	Tr
A-3	95	1	1	3	0	Tr	1
A-4	92	3	2	2	1	Tr	Tr
A-5	96	2	2	3	0	Tr	Tr

(*) Tr = trazas

10°C/min, bajo una atmósfera dinámica de aire (40 cm³/min) a temperaturas entre 40° y 980°C.

Las curvas ATD muestran un pico endotérmico importante a 130°C, seguido por un pico accesorio a 200°C, debido a la pérdida de humedad. Un segundo pico endotérmico a 640°C corresponde a la pérdida del OH⁻ estructural de la montmorillonita, y otro a 860°C puede ser interpretado como cambios estructurales en la arcilla.

Estos diagramas, que se muestran en las Figuras 4.23 y 4.24, corresponden a una esmectita dioc-

taédrica tipo montmorillonita (MacKenzie, 1970) [54].

Los ensayos ATD se han realizado también en el laboratorio del CSIC-Zaidín, simultáneamente con la termogravimetría (TG). Ambos diagramas se representan conjuntamente en la Figura 4.25.

Esta técnica permite detectar las reacciones que se producen durante el calentamiento de la muestra y el correspondiente cambio de peso. El análisis se hizo en un aparato NETZSCH STA 409 EP, en crisoles de alúmina, usando alúmina como referencia y en atmósfera de aire.

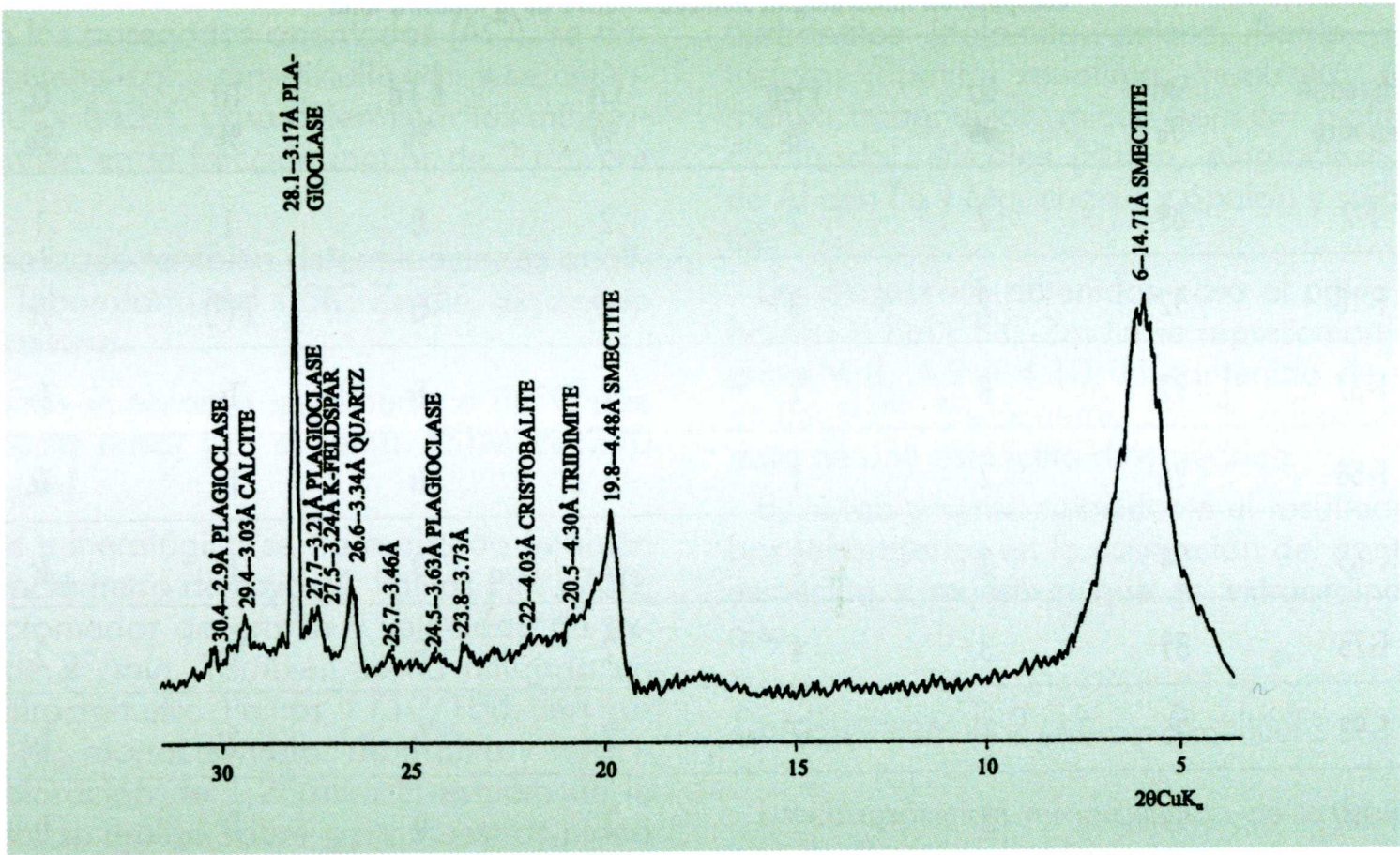


Figura 4.3: Diagrama de difracción de rayos X (DRX) de la muestra A-1 (muestra total).

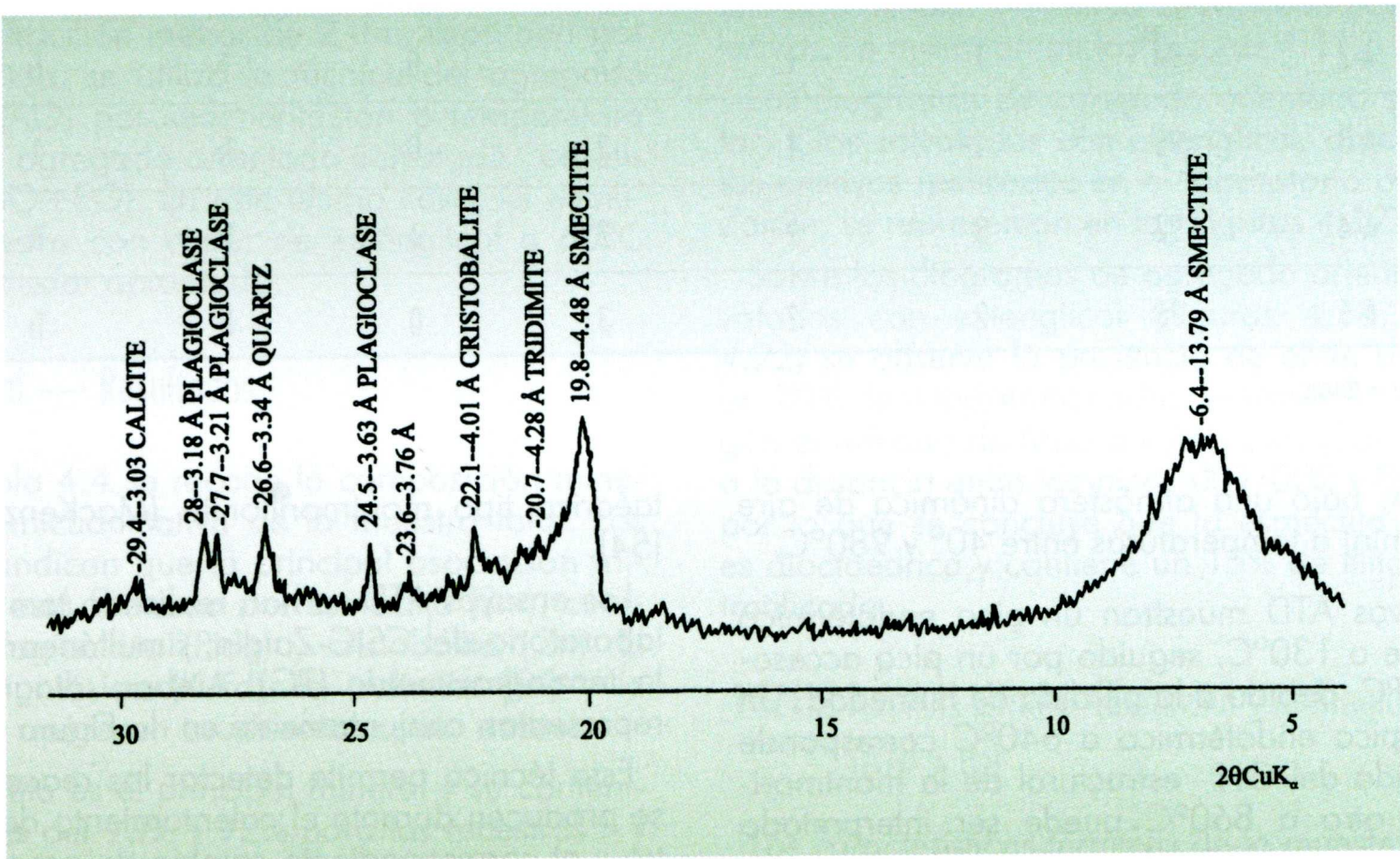


Figura 4.4: Diagrama de difracción de rayos X (DRX) de la muestra A-5 (muestra total).

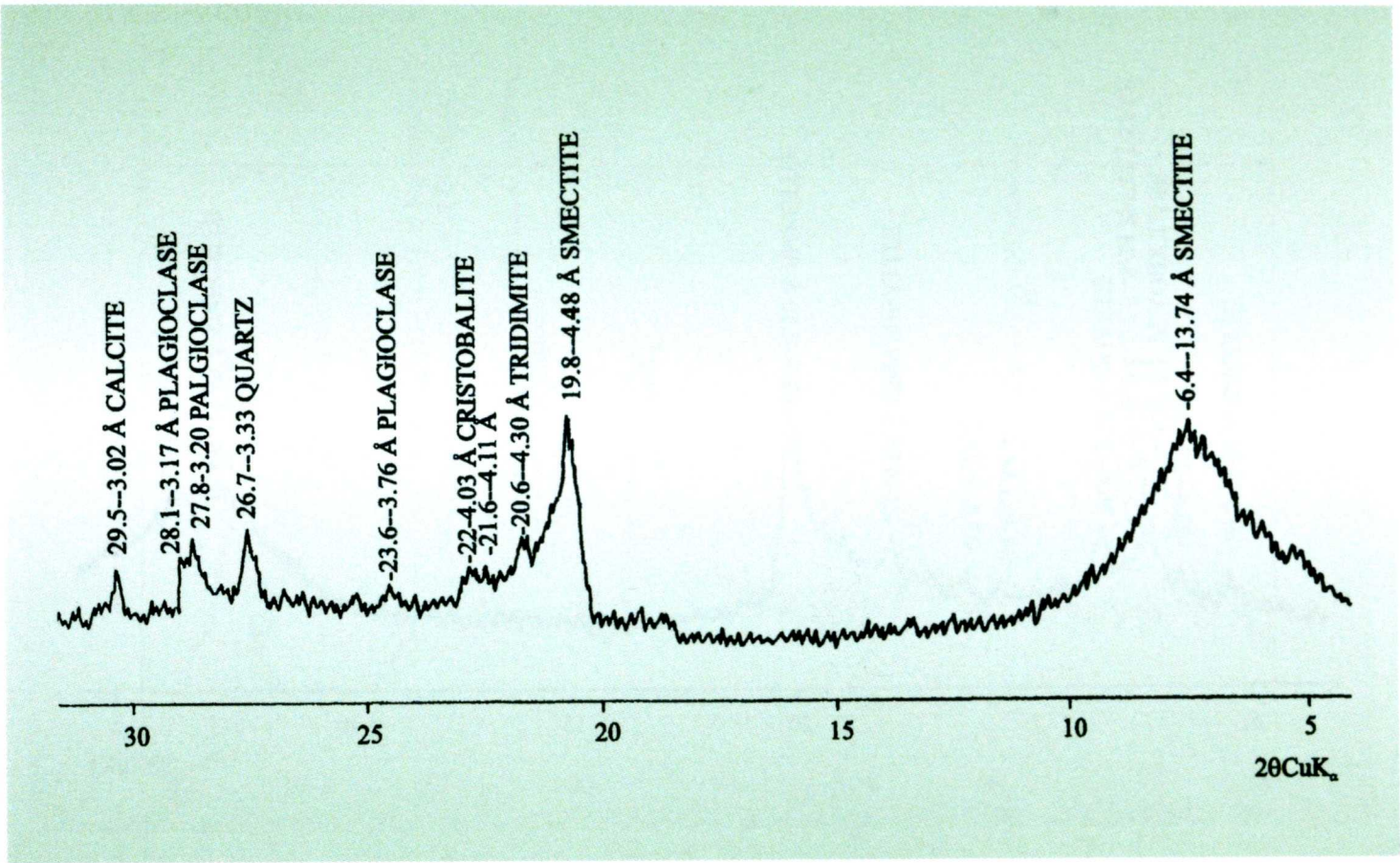


Figura 4.5: Diagrama de difracción de rayos X (DRX) de la muestra F-2 (muestra total).

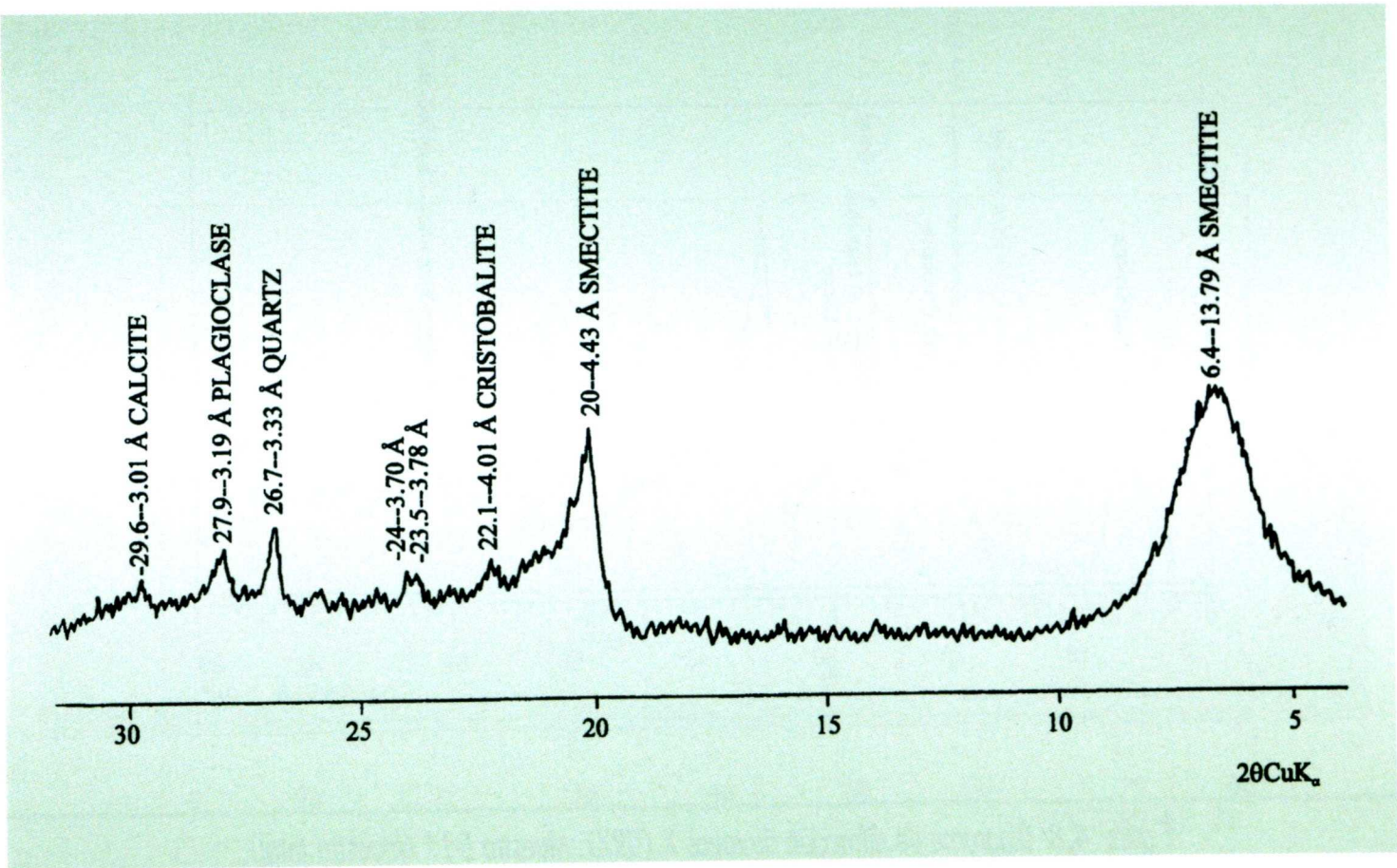


Figura 4.6: Diagrama de difracción de rayos X (DRX) de la muestra F-65 (muestra total).

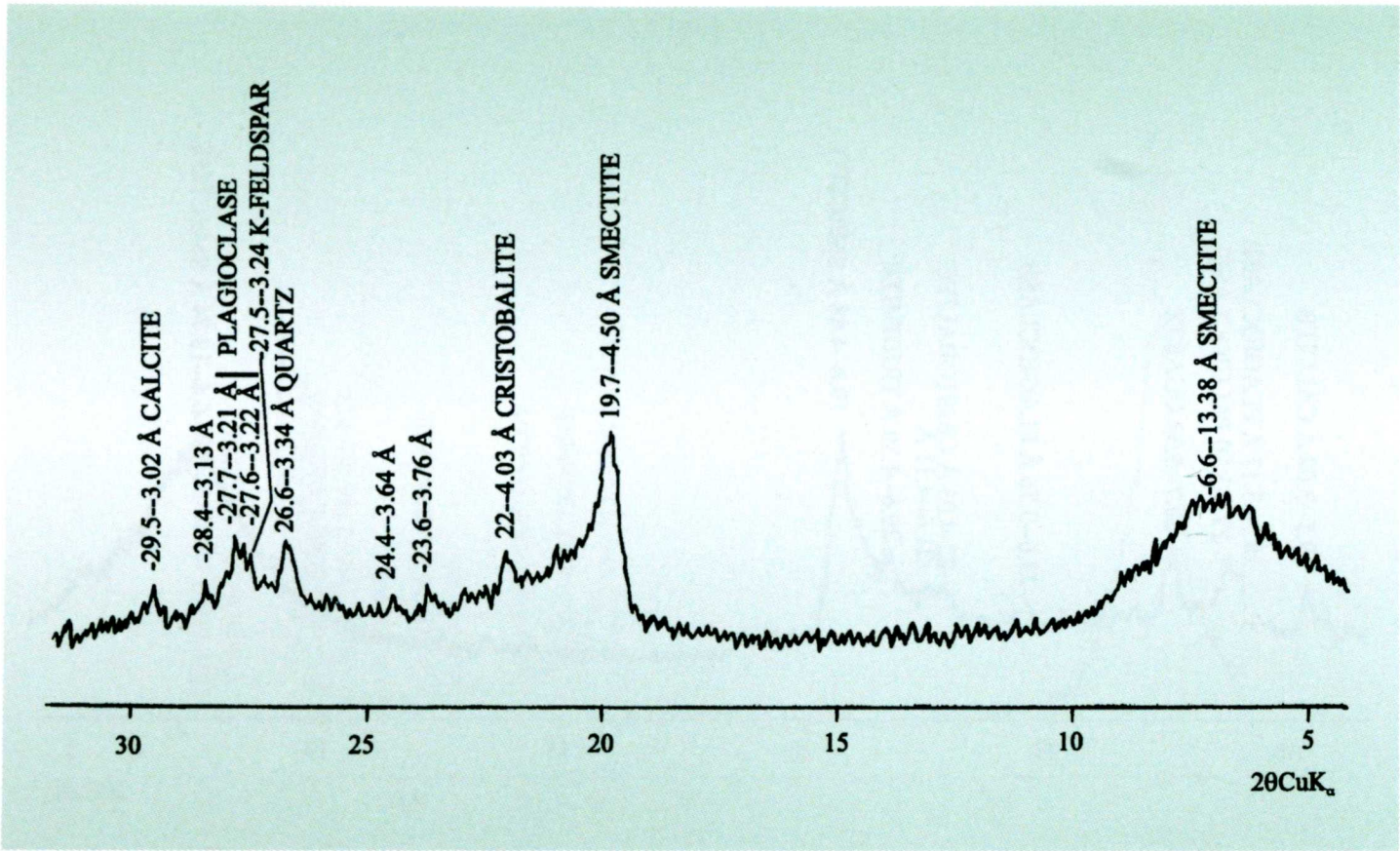


Figura 4.7: Diagrama de difracción de rayos X (DRX) de la muestra F-119 (muestra total).

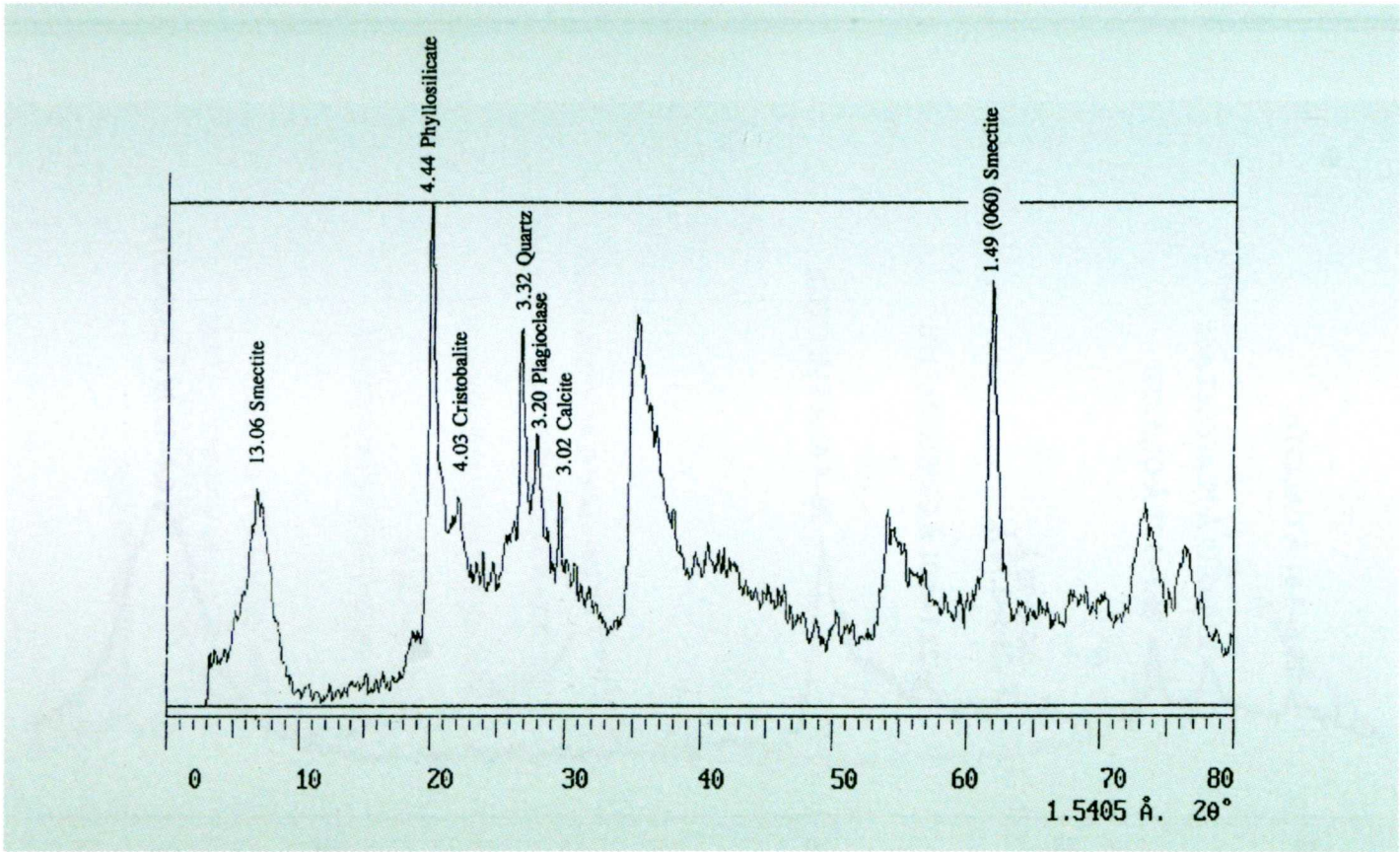


Figura 4.8: Diagrama de difracción de rayos X (DRX). Muestra E-1* (muestra total).

* E-1, E-2 y E3 son denominaciones de CSIC-Zaidín para las muestras ensayadas, que son alícuotas de la muestra 70-IMA-3-4-0 recibida de CIEMAT.

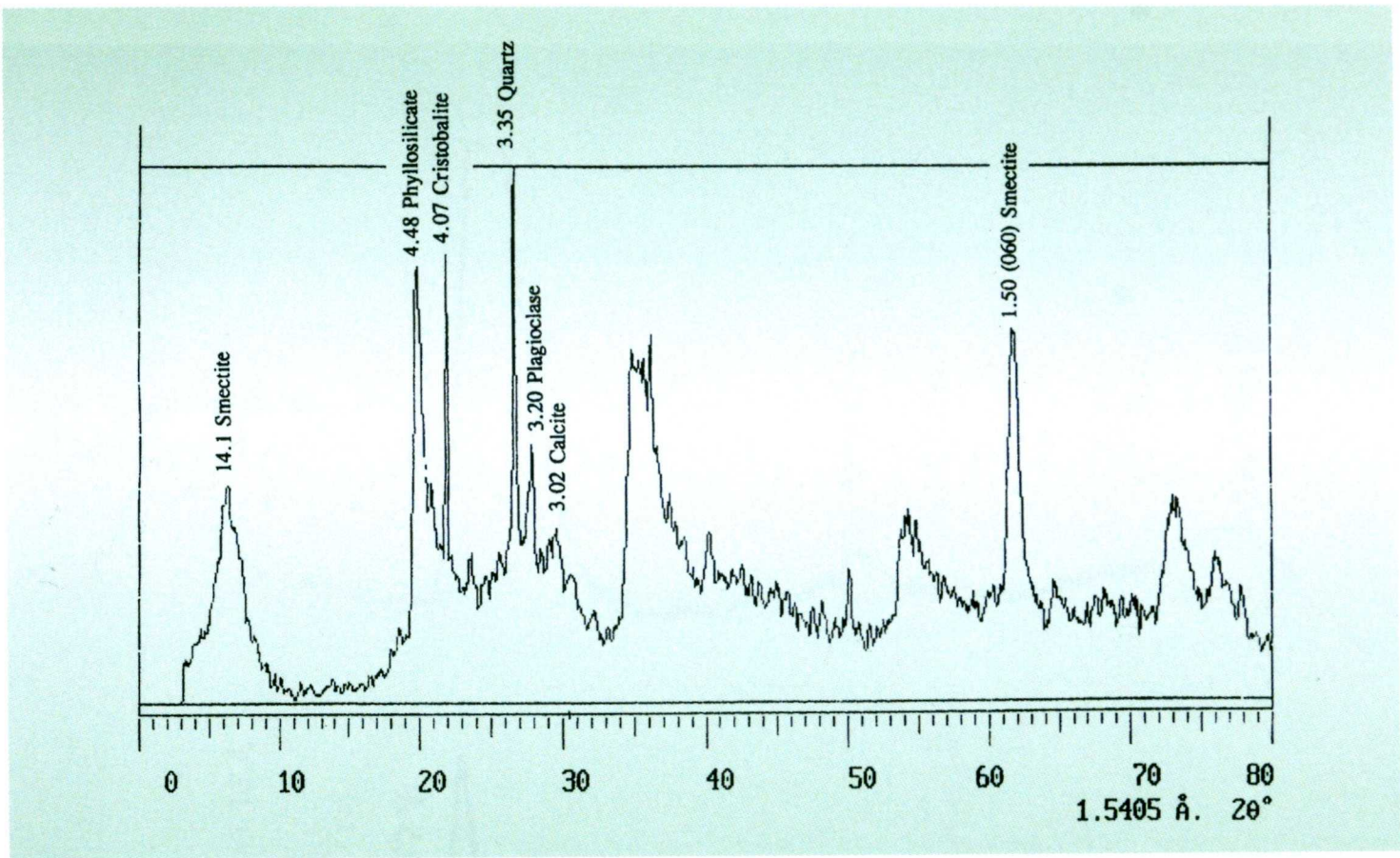


Figura 4.9: Diagrama de difracción de rayos X (DRX) de la muestra E-2 (muestra total).

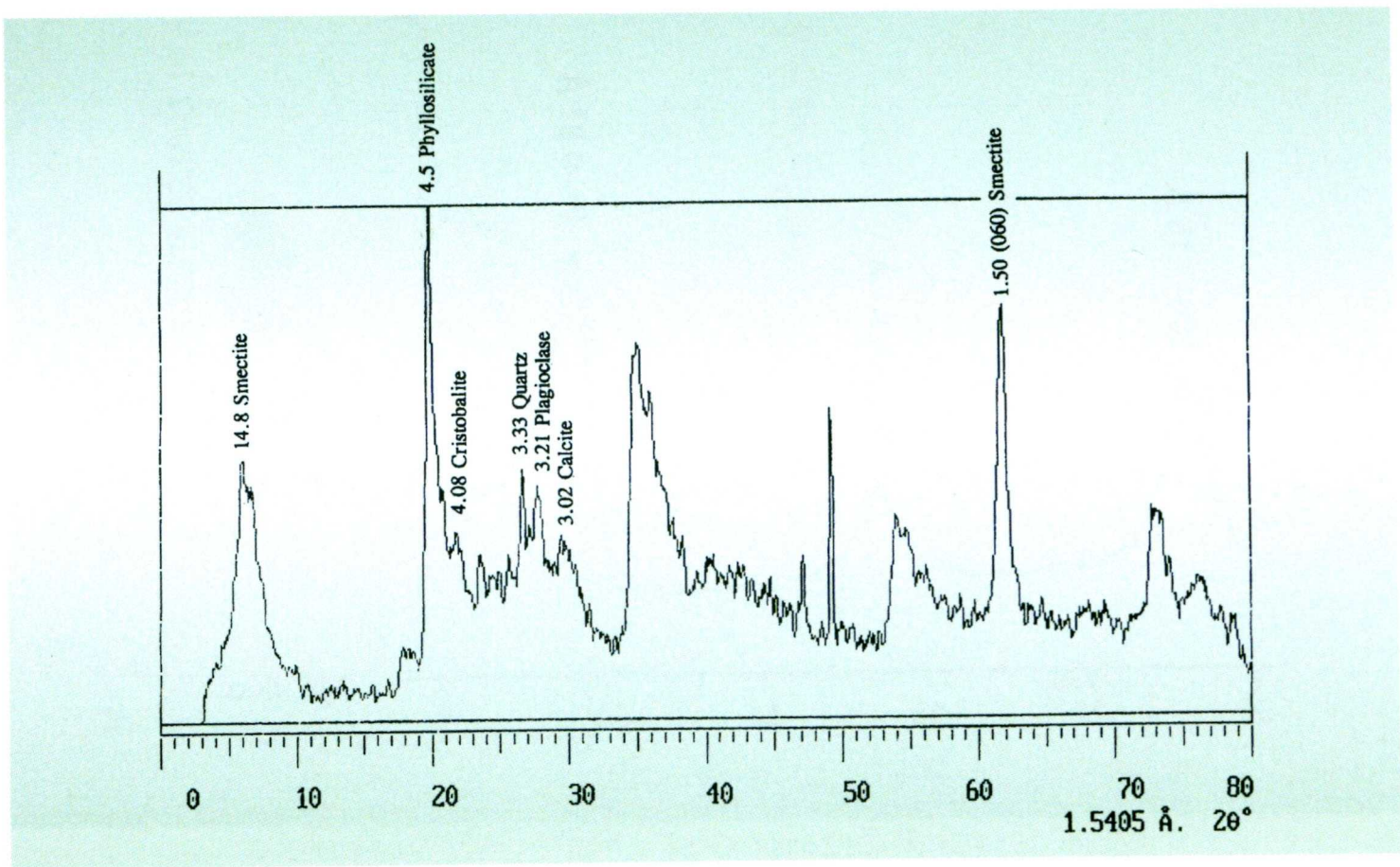


Figura 4.10: Diagrama de difracción de rayos X (DRX) de la muestra E-3 (muestra total).

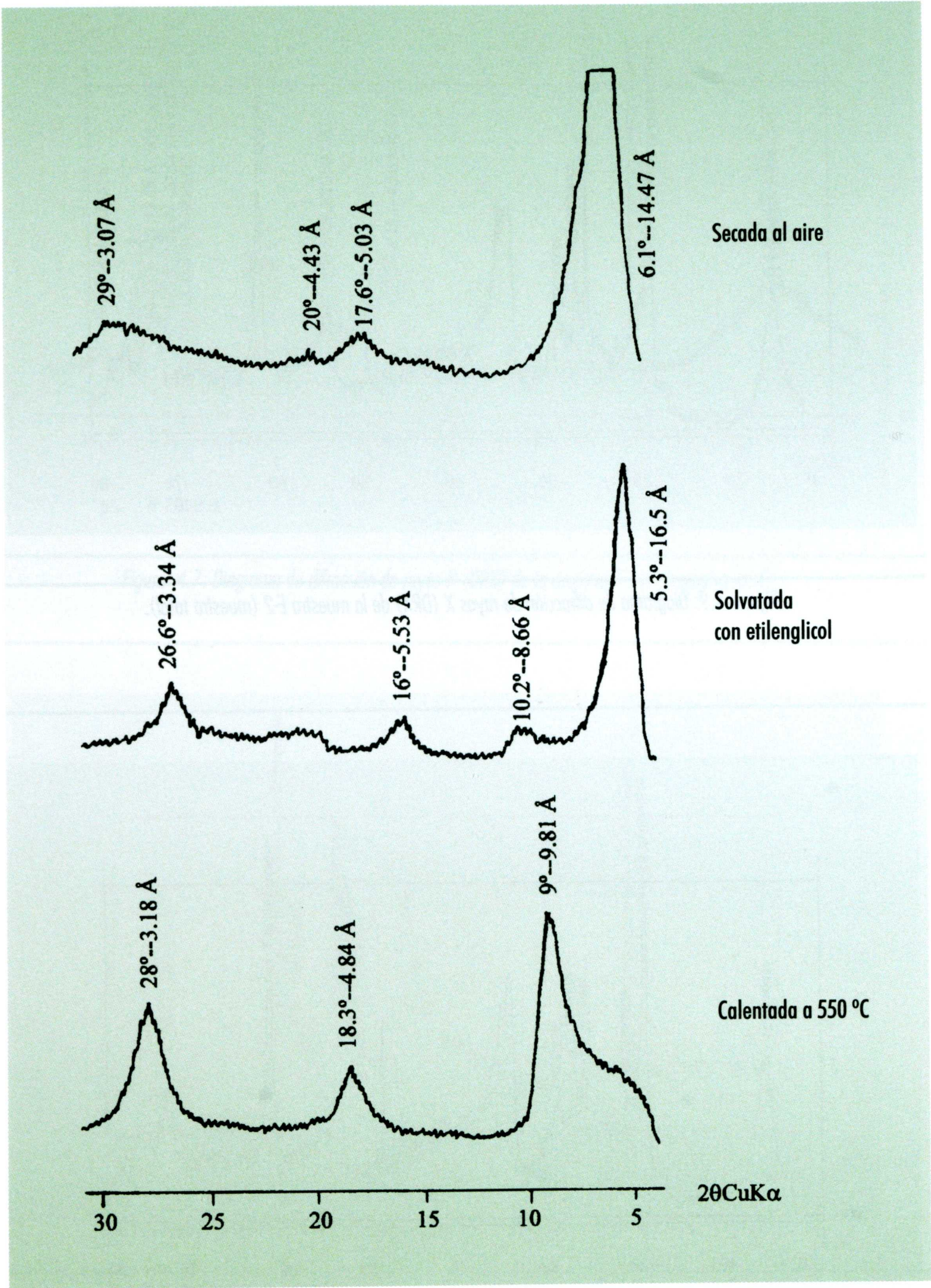


Figura 4.11: Diagramas de difracción de rayos X (DRX) de la muestra A-1 (Agregado orientado de la fracción <2µm).

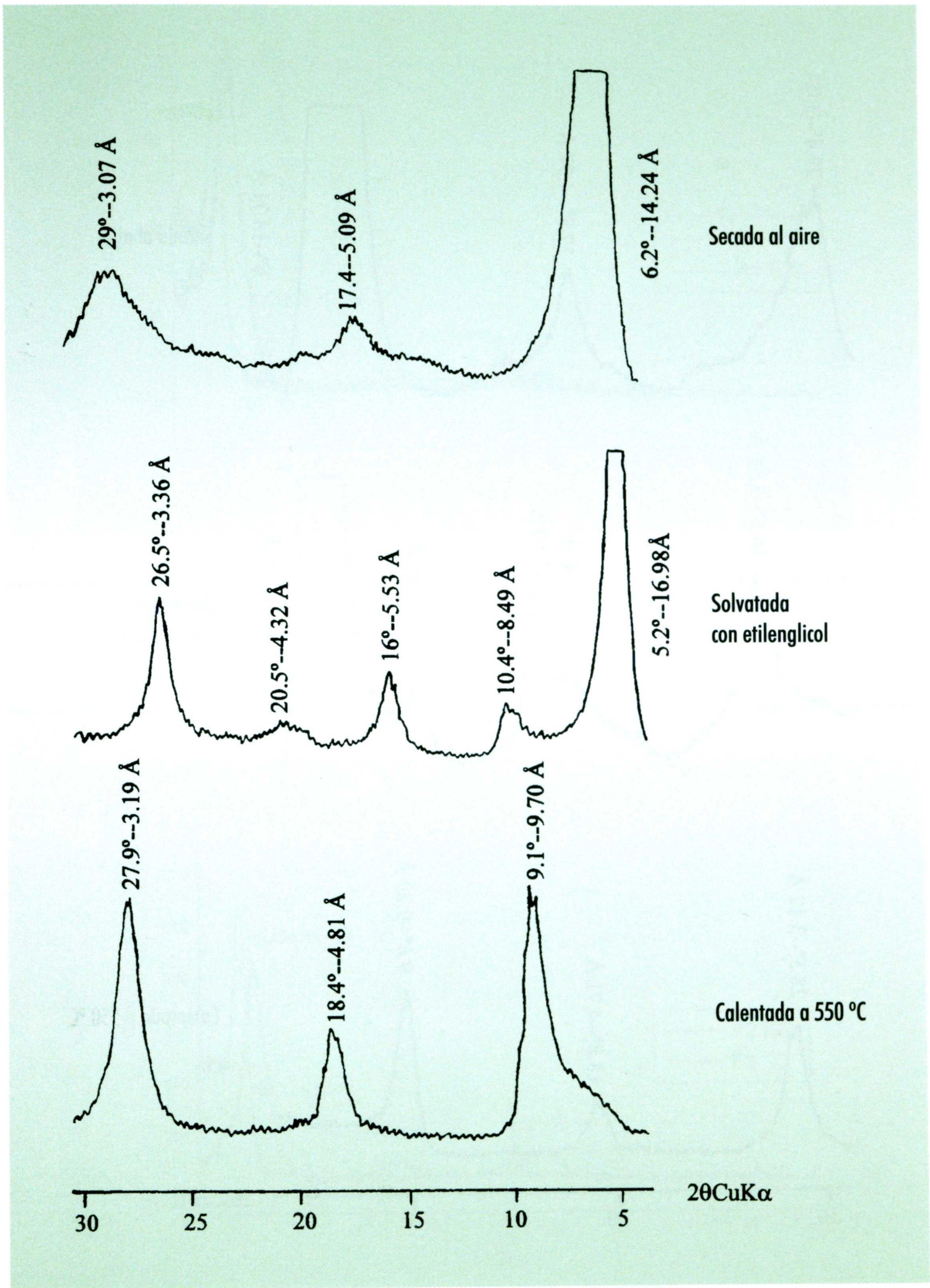


Figura 4.12: Diagramas de difracción de rayos X (DRX) de la muestra F-2 (Agregado orientado de la fracción $<2\mu\text{m}$).

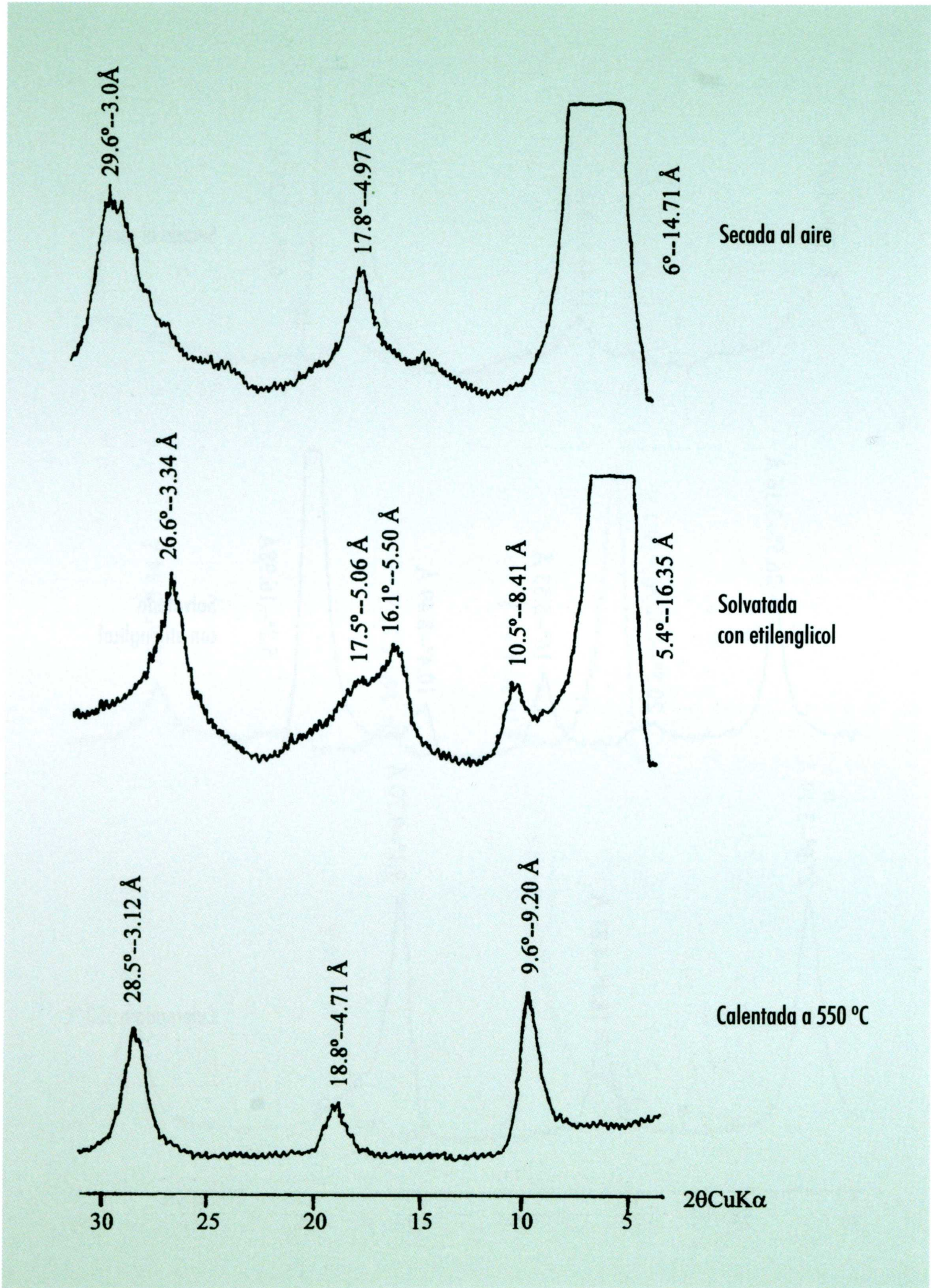


Figura 4.13: Diagramas de difracción de rayos X (DRX) de la muestra F-65 (Agregado orientado de la fracción <2µm).

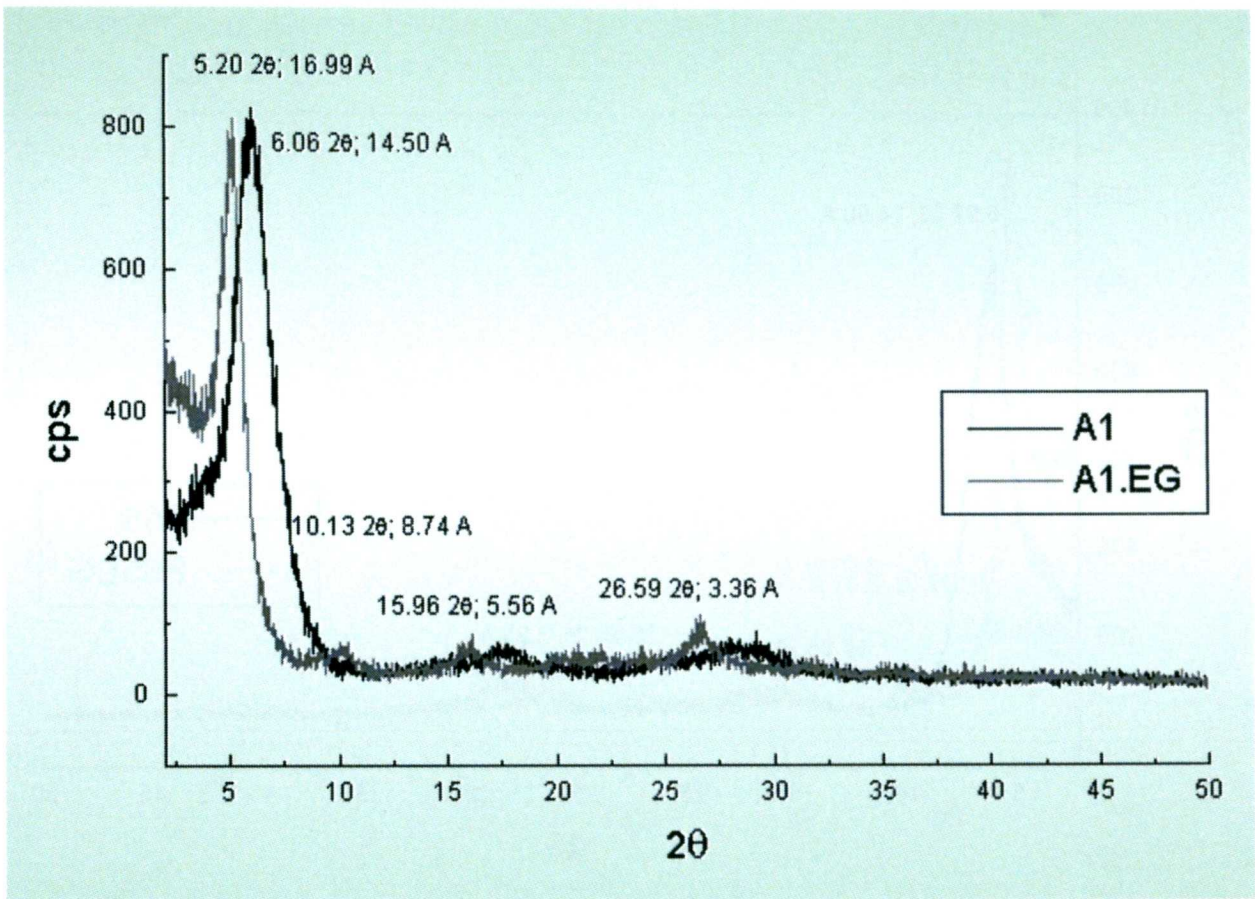


Figura 4.14: Diagramas de difracción de rayos X (DRX) de la muestra A-1 realizadas en la UAM (Agregado orientado y glicolado de la fracción <2µm).

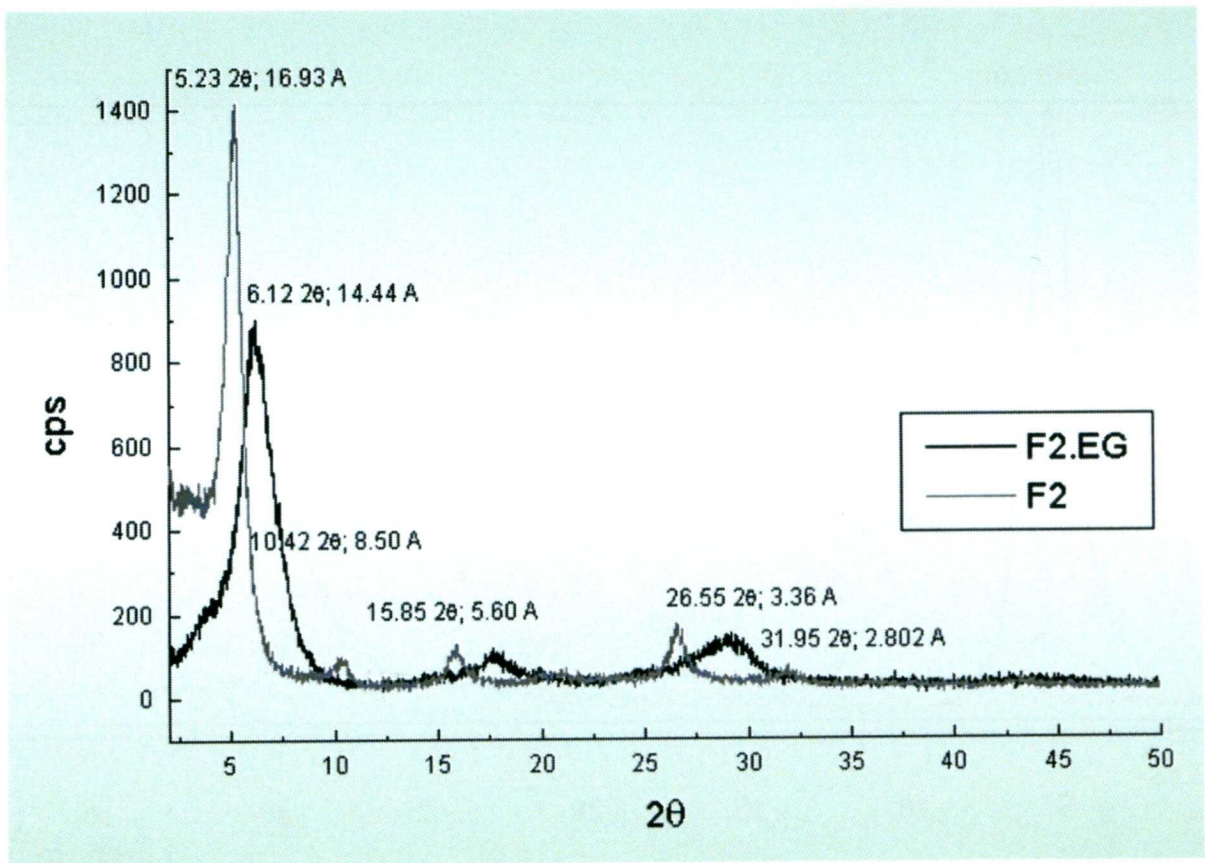


Figura 4.15: Diagramas de difracción de rayos X (DRX) de la muestra F-2 realizadas en la UAM (Agregado orientado y glicolado de la fracción <2µm).

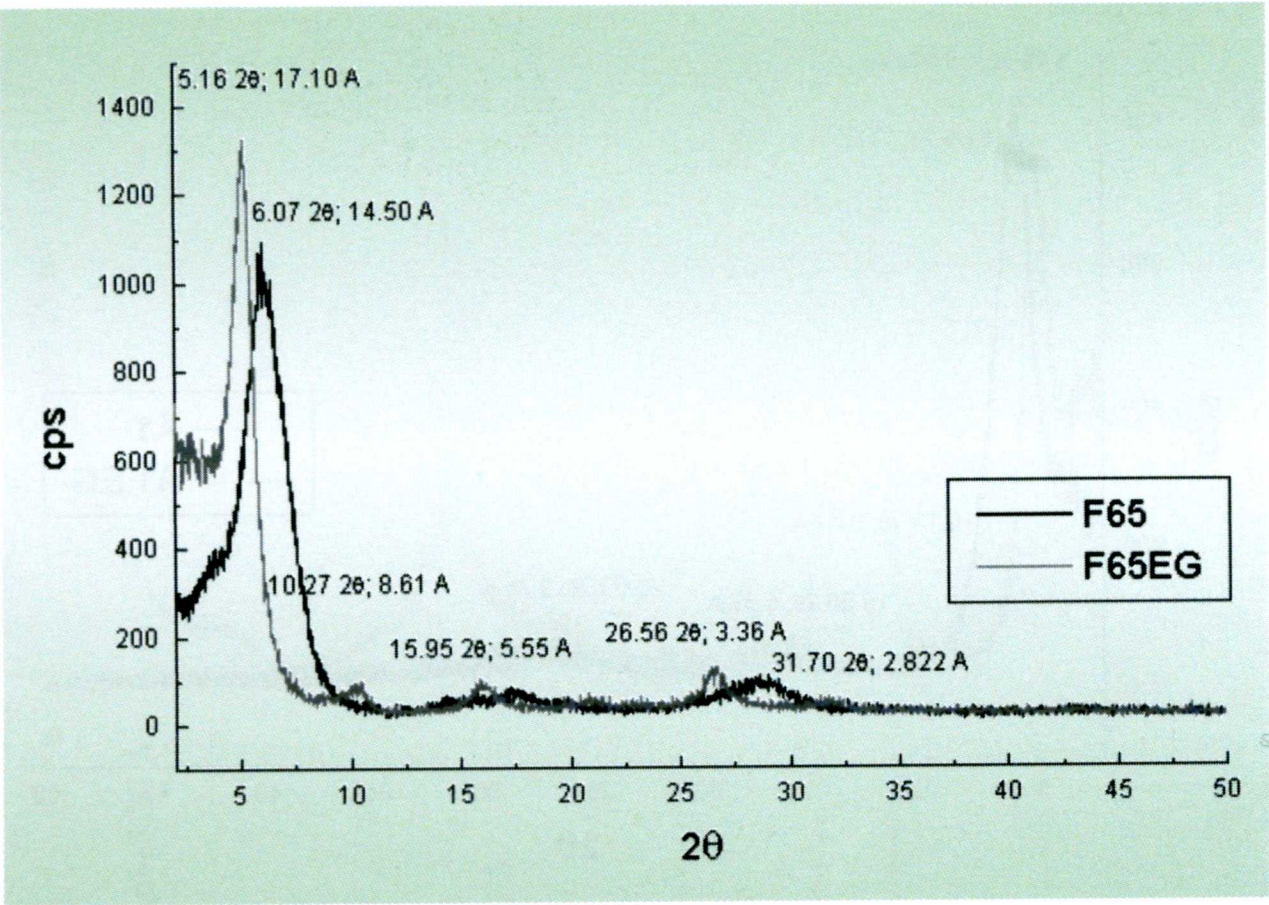


Figura 4.16: Diagramas de difracción de rayos X (DRX) de la muestra F-65 realizadas en la UAM (Agregado orientado y glicolado de la fracción <2µm).

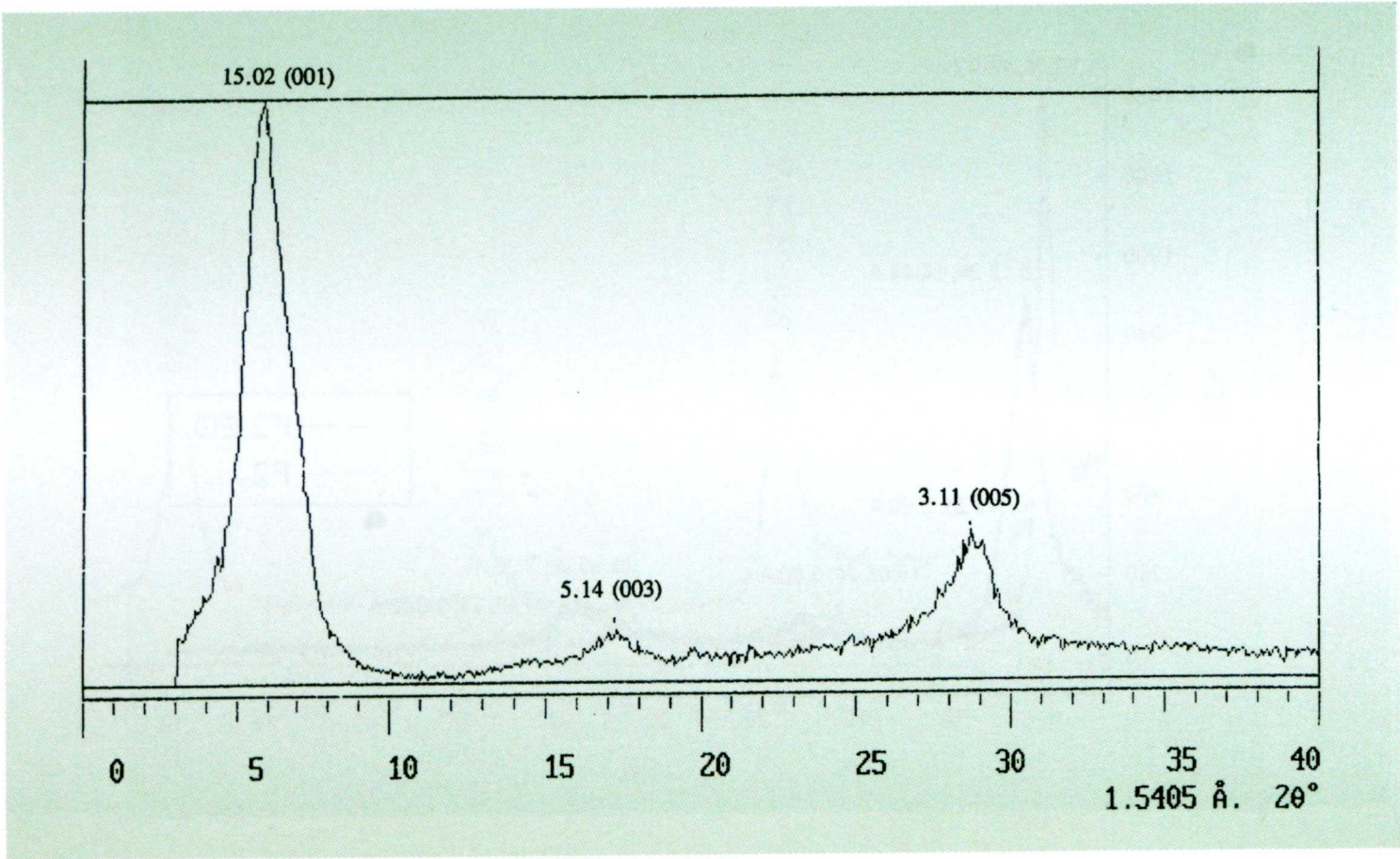


Figura 4.17: Diagrama de difracción de rayos X (DRX) de la muestra E-1 (Agregado orientado de la fracción <2µm).

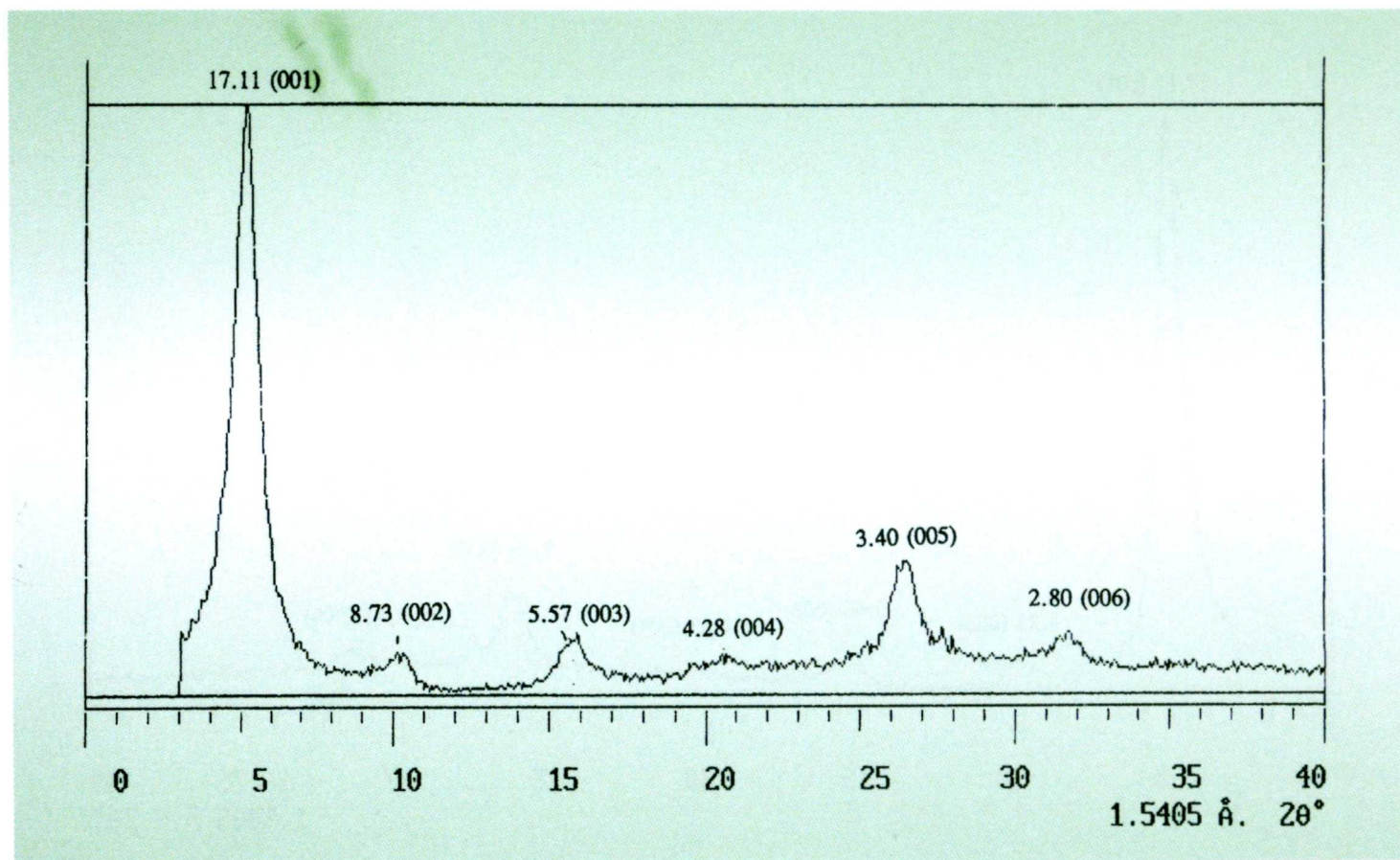


Figura 4.18: Diagrama de difracción de rayos X (DRX) de la muestra E-1 (Agregado orientado + etilenglicol de la fracción $<2\mu\text{m}$).

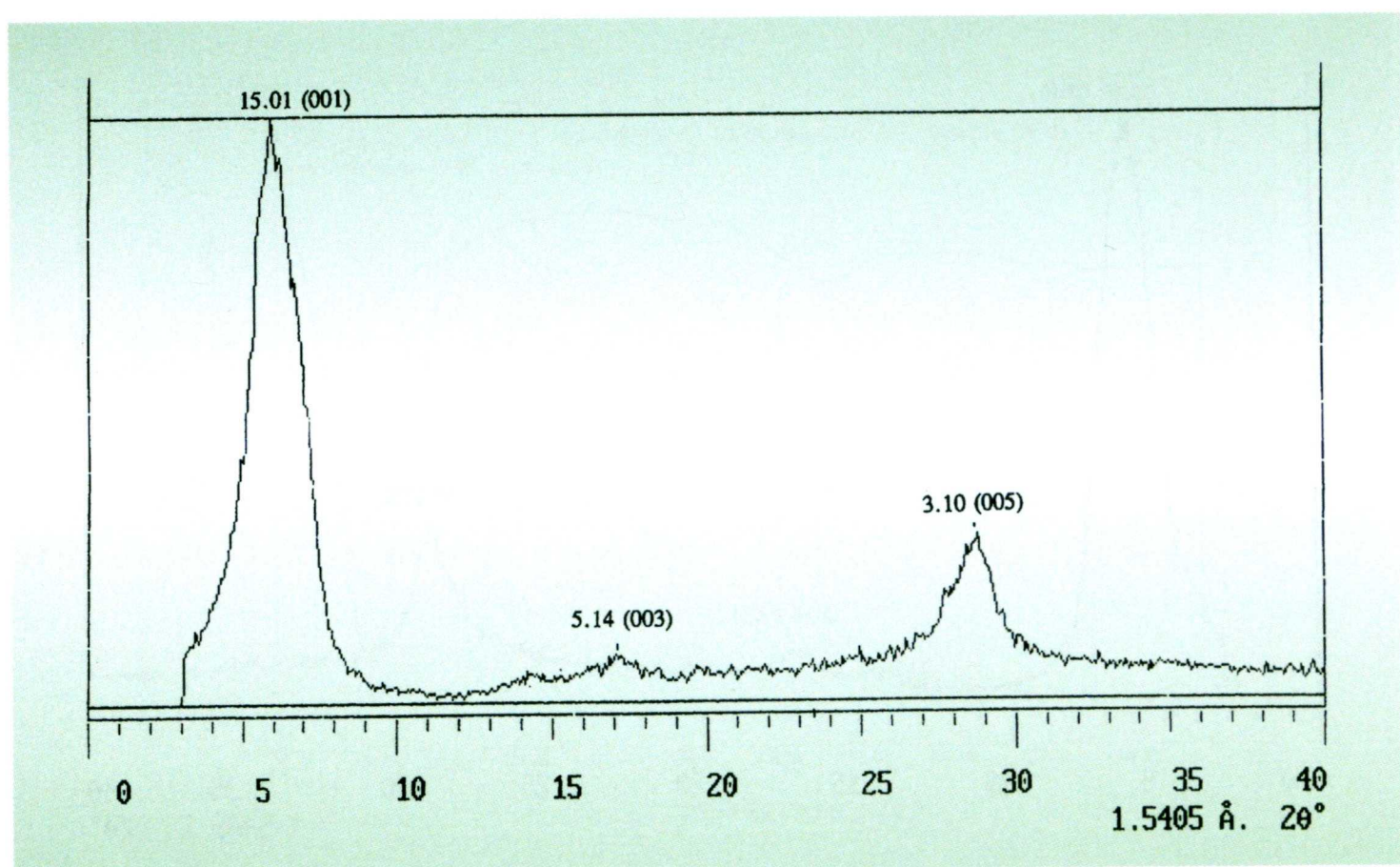


Figura 4.19: Diagrama de difracción de rayos X (DRX) de la muestra E-2 (Agregado orientado de la fracción $<2\mu\text{m}$).

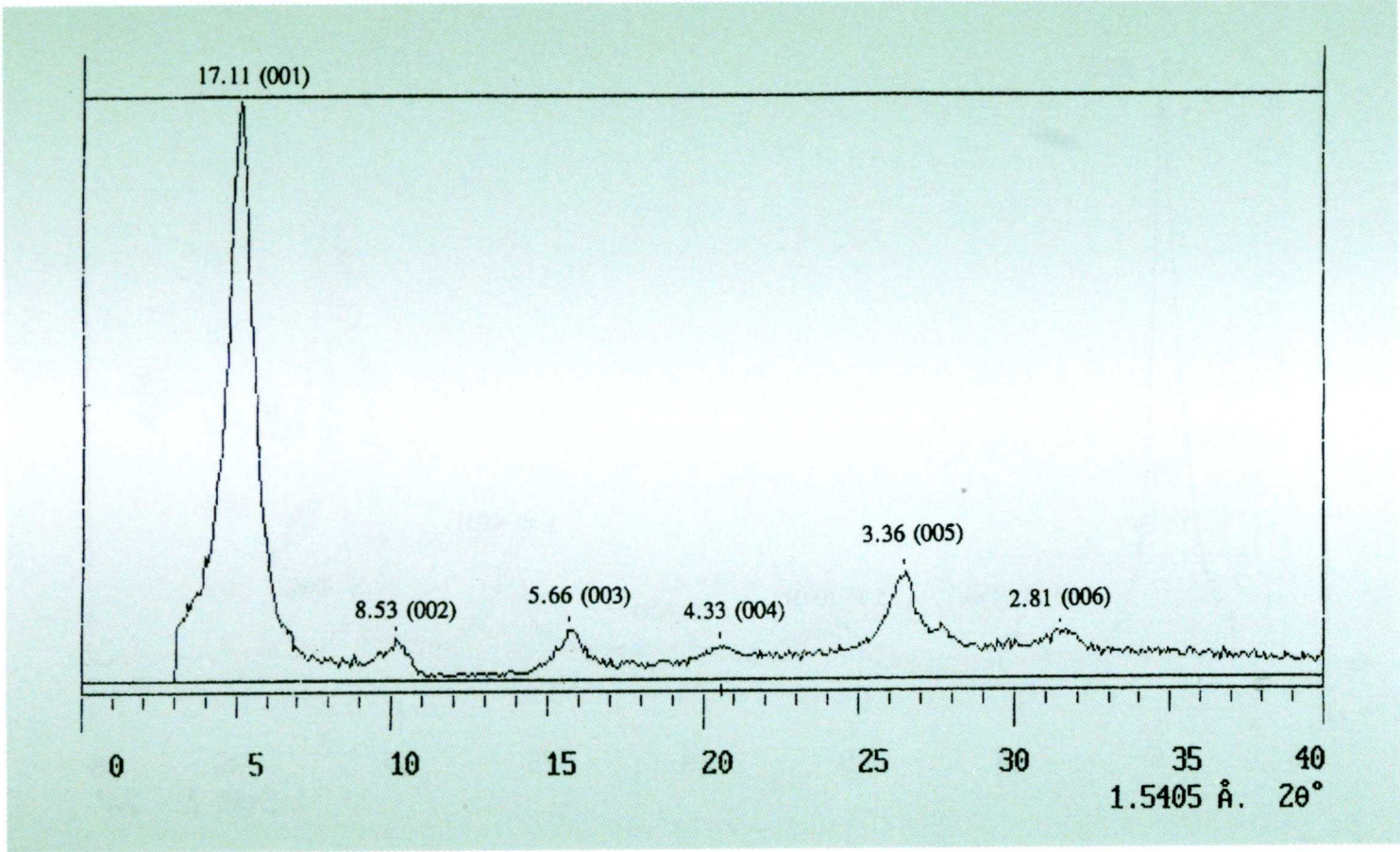


Figura 4.20: Diagrama de difracción de rayos X (DRX) de la muestra E-2 (Agregado orientado + etilenglicol de la fracción $<2\mu\text{m}$).

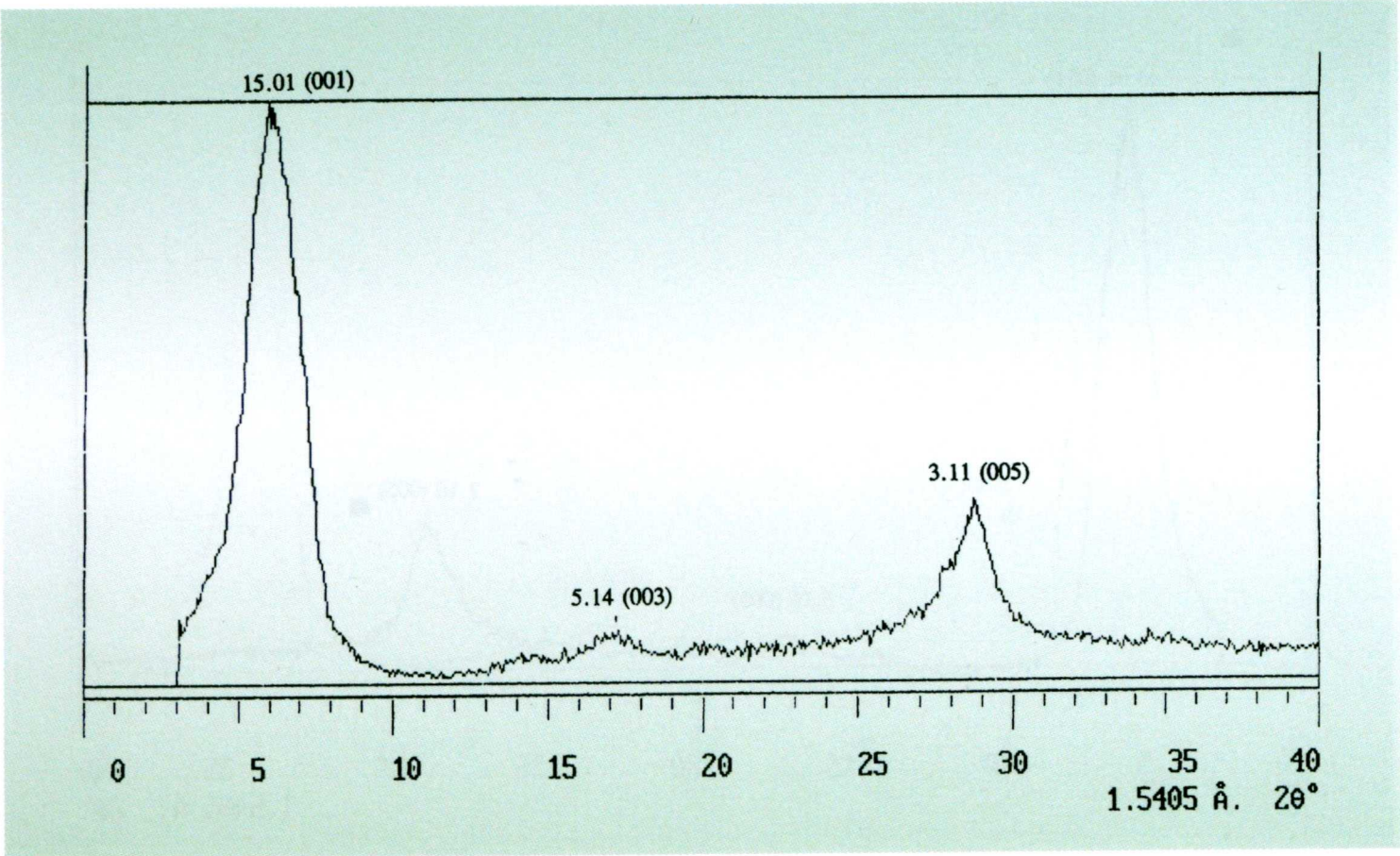


Figura 4.21: Diagrama de difracción de rayos X (DRX) de la muestra E-3 (Agregado orientado de la fracción $<2\mu\text{m}$).

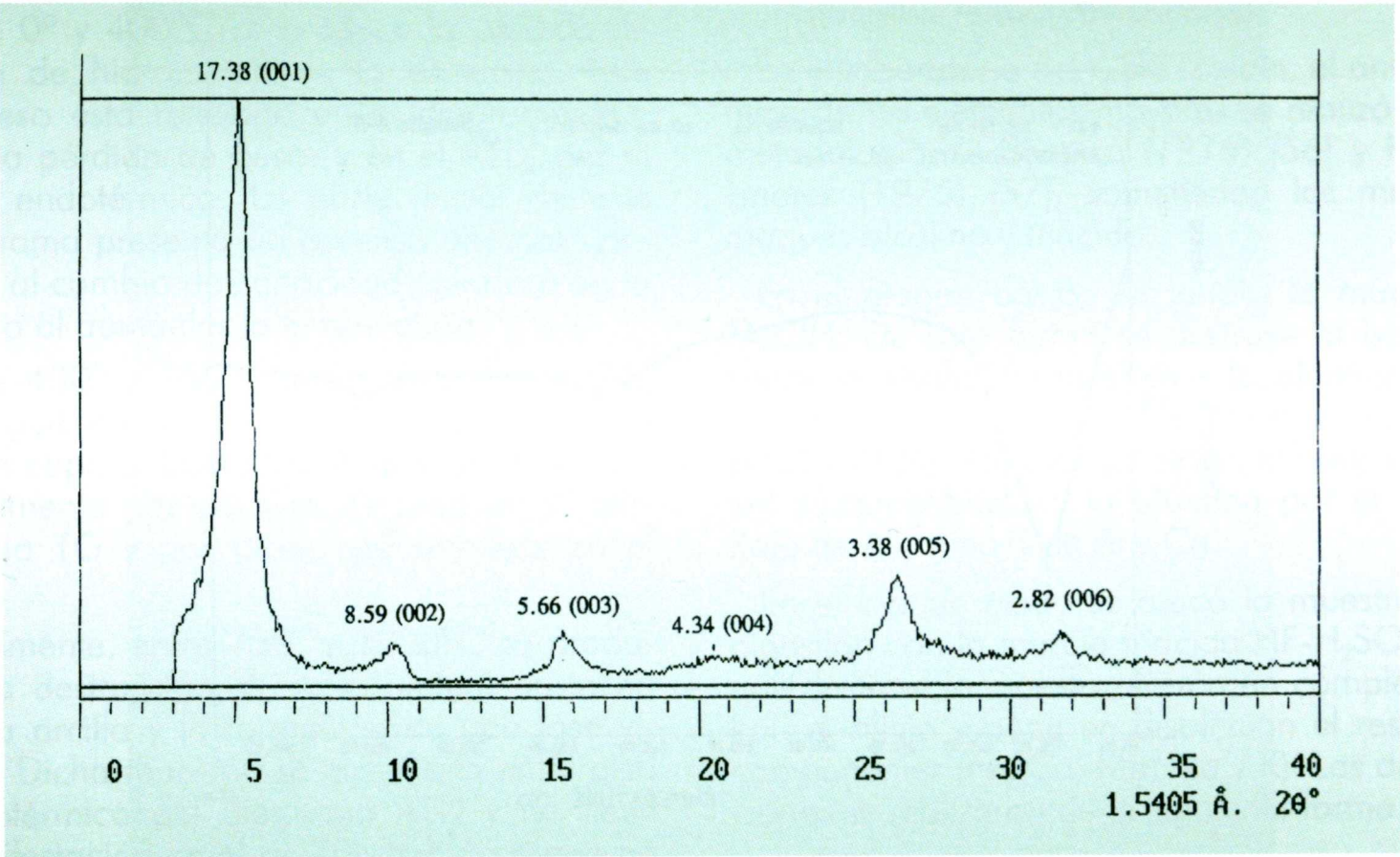


Figura 4.22: Diagrama de difracción de rayos X (DRX) de la muestra E-3 (Agregado orientado + etilenglicol de la fracción <2μm).

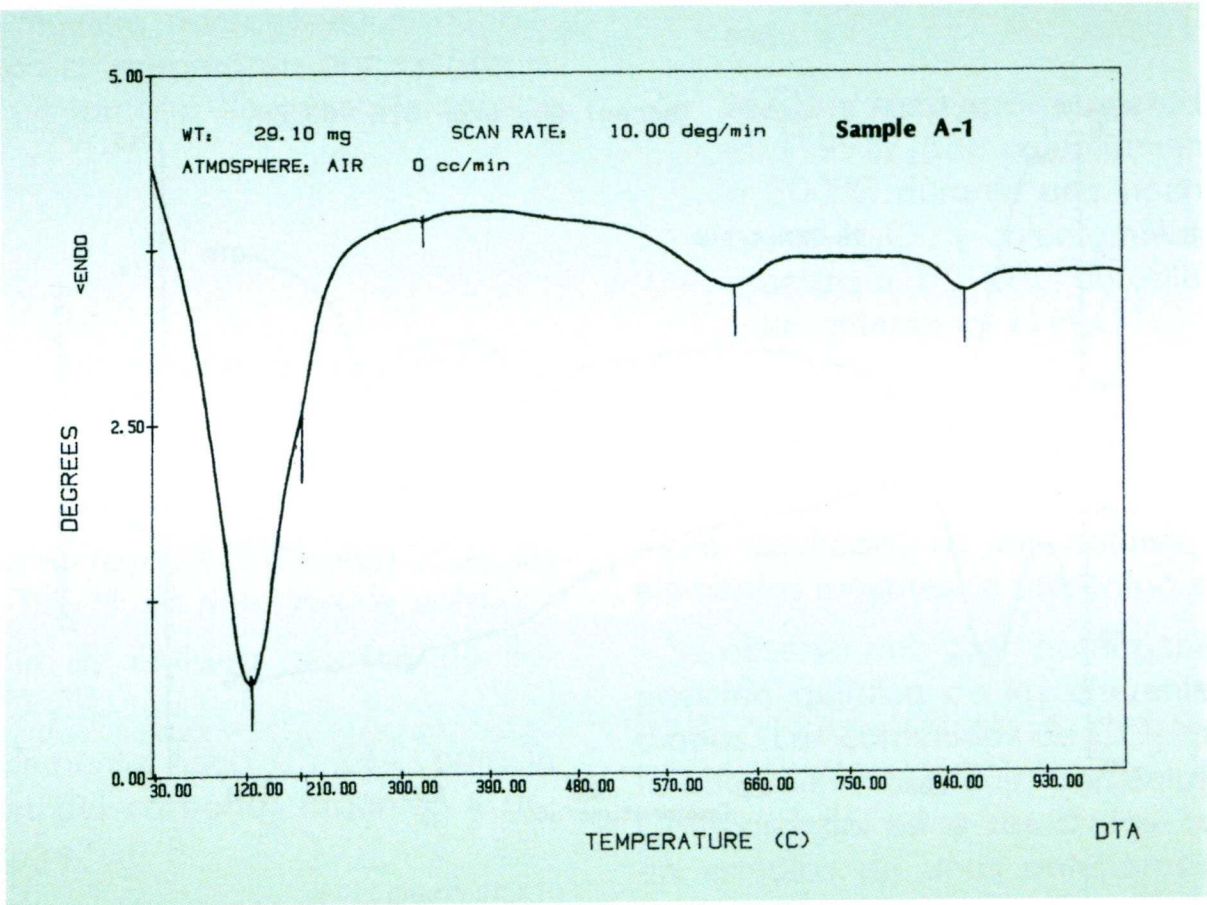


Figura 4.23: Diagrama de ATD de la muestra A-1.

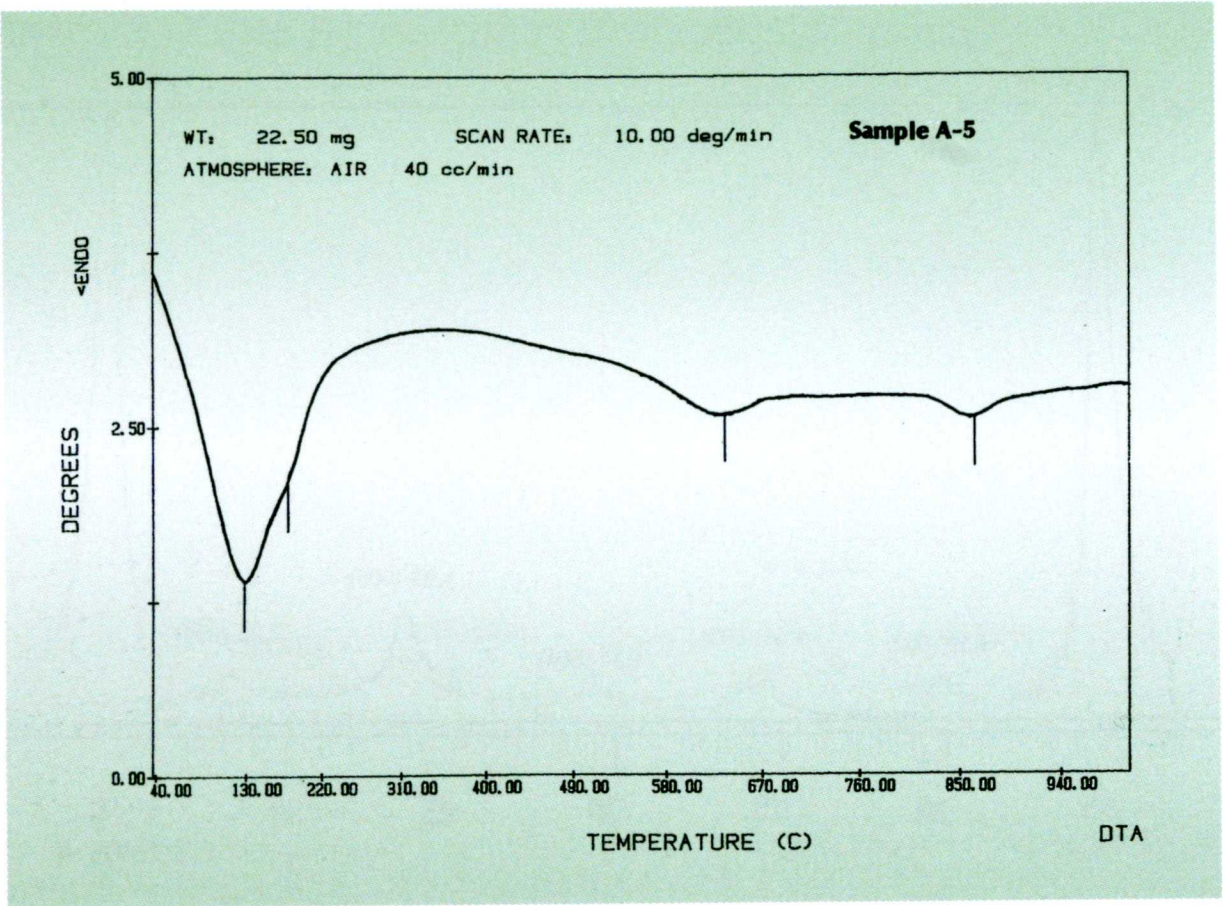


Figura 4.24: Diagrama de ATD de la muestra A-5.

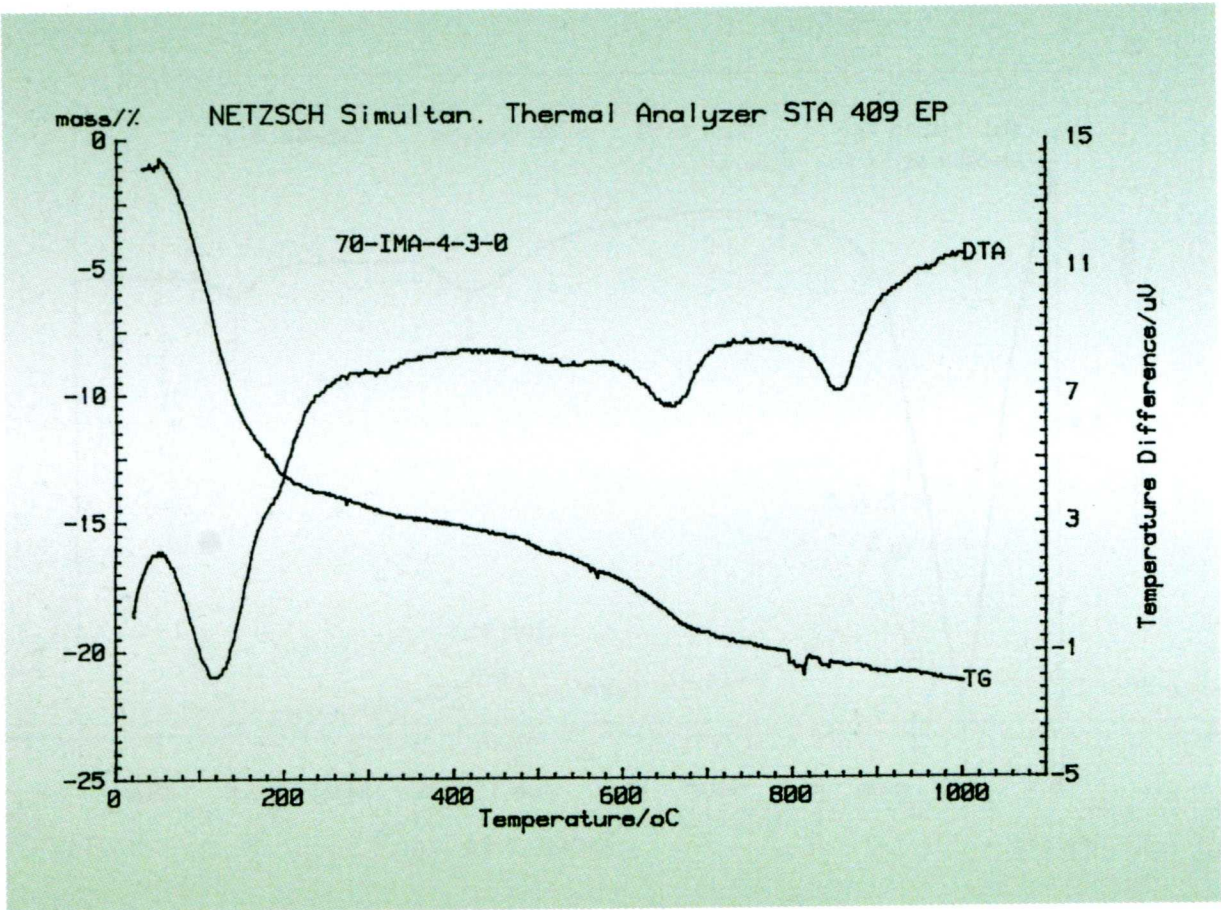


Figura 4.25: Diagrama de ATD-TG de la muestra 70-IMA-3-4-0.

Los diagramas obtenidos son típicos de una esmectita, y en ellos se diferencian tres etapas:

- ❑ Entre 0° y 400°C se produce la pérdida de agua de hidratación de la esmectita. Este proceso está reflejado en el diagrama TG, por la pérdida de peso; y en el ATD, por el pico endotérmico. La parte inicial de este diagrama presenta un ascenso anómalo debido al cambio de capacidad calorífica de la arcilla al aumentar la temperatura.
- ❑ Entre 400° y 750°C se produce la pérdida de agua estructural de la arcilla (hidroxilos en la capa octaédrica), lo que se manifiesta igualmente por pérdida de peso en el diagrama TG y por picos endotérmicos en el ATD.
- ❑ Finalmente, entre 750° y 1000°C se produce la destrucción de la estructura cristalina de la arcilla y la formación de una fase vítrea. Dicha reacción se manifiesta en el pico endotérmico del diagrama ATD y no tiene manifestación en el de TG, debido a que no se producen cambios de masas.

4.3.2 Caracterización química

La caracterización química se efectuó en 4 muestras sin mezclar (muestras F) y en 2 de la muestra homogénea (muestras A) en CIEMAT y en 4 alícuotas de la muestra homogénea en CSIC-Zaidín. Las muestras se prepararon por secado a 60°C y molido a un tamaño de grano inferior a 60 μm .

Métodos

Plasma acoplado inductivamente-espectrometría de emisión atómica para Al_2O_3 , $\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{total}}$, Na_2O , MgO , MnO , TiO_2 , CaO , P_2O_5 , Ba, Ce, Co, Cr, Cu, La, Ni, Sr, V, Y y Zn.

- ❑ Fluorescencia de rayos X (FRX) para SiO_2 , en perlas, y Rb, Th y U, en muestras de polvo.
- ❑ Espectroscopía de emisión atómica de llama, para K_2O y Li.
- ❑ Analizador elemental Leco CS-244, para la determinación del carbono, orgánico y mineral, y el azufre.
- ❑ Método Sánchez Ledesma et al. (1990) [55], para el FeO .
- ❑ Electrodo de ion selectivo, para Cl^- y F^- .

- ❑ Equipo Perkin-Elmer TGS-2, para determinación de H_2O^- y la pérdida de peso por ATG (análisis termogravimétrico).

En el laboratorio del CSIC-Zaidín, el análisis químico de los elementos mayores se realizó según la metodología de Shapiro (1975) [56] y Huertas y Linares (1975) [57], sometiendo las muestras a ataques alcalino y triácido.

En el ataque básico se fundió la muestra con NaOH . De esta forma se destruye la bentonita y pasan a disolución la sílice y la alúmina, que se determinaron mediante espectrofotometría ultravioleta-visible. La sílice se determinó por el método del silicomolibdato y la alúmina por el complejo Rojo de Alizarina-S de Al y Ca.

En el ataque ácido se atacó la muestra en una digestión con la mezcla triácida $\text{HF-H}_2\text{SO}_4\text{-HNO}_3$, que destruye la muestra, forma un complejo volátil con el silicio y pone en disolución el resto de los componentes (Fe, Ca, Mg, Na y K). Las determinaciones se realizaron de la siguiente forma:

- ❑ Fe_2O_3 , en espectrofotómetro ultravioleta-visible, por el método de formación del complejo con ortofenantrolina tras su reducción con clorhidrato de hidroxilamina.
- ❑ CaO y MgO , volumétricamente por complejometría con EDTA.
- ❑ Na_2O y K_2O , por espectrofotometría de llama.
- ❑ H_2O^+ y H_2O^- , por el método de Cuadros et al. (1994) [58]: calentamiento de la muestra a 300°C durante una noche, para determinar el H_2O^- ; y calentamiento posterior de la muestra a 1 000°C durante unas dos horas, para determinar el H_2O^+ .

Elementos mayores — Resultados

Los resultados de los análisis químicos de los elementos mayores se presentan en Tabla 4.5.

Se observa una gran homogeneidad en la composición química de las diferentes muestras estudiadas. Los contenidos de CO_2 mineral son bajos, lo que confirma el bajo porcentaje de carbonatos. Comparando estos resultados con los obtenidos en estudios de años anteriores en muestras del mismo yacimiento (Capítulo 2), se ve que la bentonita FEBEX tiene contenidos más bajos de Fe_2O_3 , MgO , CaO y CO_2 orgánico. El contenido más

Tabla 4.5
Composición química de la muestra total (CIEMAT)

Óxidos %	F-2	F-37	F-75	F-119	MEDIA %	DESV. EST.	A-1	A-5
SiO ₂	58,6	59,4	59,2	60,5	59,4	0,8	59,9	58,7
Al ₂ O ₃	18,2	18,4	17,8	18,1	18,1	0,3	16,6	17,9
Fe ₂ O ₃	2,93	2,96	2,96	2,87	2,93	0,04	2,66	2,90
FeO	0,24	0,22	0,22	0,21	0,21	0,02	0,22	0,18
MgO	4,2	4,3	4,1	4,2	4,2	0,1	3,9	4,2
MnO	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,00	0,04	0,04
CaO	1,8	1,9	2,0	1,8	1,9	0,1	1,7	1,8
Na ₂ O	1,3	1,4	1,4	1,4	1,4	0,1	1,2	1,3
K ₂ O	1,1	1,1	1,1	1,0	1,1	0,1	1,0	1,0
TiO ₂	0,23	0,24	0,25	0,23	0,24	0,01	0,22	0,23
P ₂ O ₅	0,02	0,03	0,02	0,03	0,02	0,00	0,02	0,02
H ₂ O ⁻	7,5	6,0	7,6	6,0	6,8	0,9	12,0	7,0
H ₂ O ⁺	4,4	4,6	4,8	4,9	4,7	0,2	4,0	4,8
CO ₂ org	0,40	0,37	0,40	0,33	0,37	0,03	0,29	0,33
CO ₂ min	0,26	0,22	0,26	0,22	0,24	0,02	0,37	0,26
SO ₂ total	0,22	0,10	0,16	0,16	0,16	0,05	0,36	0,12
F ⁻	0,18	0,18	0,18	0,19	0,18	0,01	0,18	0,18
F ≡ O	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,00	0,08	0,08

bajo de Fe₂O₃ podría explicar el peso específico menor de la bentonita FEBEX (Sección 4.2.5).

El valor medio de los resultados de los análisis químicos realizados sobre cuatro muestras en el laboratorio del CSIC-Zaidín se muestran en la Tabla 4.6. Son valores típicos de una esmectita con contenidos en sílice próximos al 60%.

Las pequeñas diferencias en los resultados obtenidos en los dos laboratorios son normales, te-

niendo en cuenta las variaciones del propio material y de los métodos.

Elementos traza — Resultados

Los resultados de los análisis químicos de los elementos traza en la muestra total se representan en la Tabla 4.7.

El contenido en elementos traza es similar al determinado en los estudios de años anteriores en la

Tabla 4.6
Análisis químico (CSIC-Zaidín)

	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	CaO %	MgO %	Na ₂ O %	K ₂ O %	H ₂ O %	Total %	H ₂ O ⁻ %
MEDIA	58,92	19,48	3,48	2,51	4,83	2,28	1,21	7,09	99,82	5,07
DESV. ESTÁNDAR	0,03	0,31	0,08	0,29	0,15	0,09	0,10	0,18	0,08	0,12

bentonita del mismo yacimiento (Capítulo 2), excepto para el Cu, que no fue detectado en los estudios anteriores y para el Cr cuyo contenido era superior.

4.3.3 Fórmula estructural

Los análisis químicos de la fracción menor de 2 μm se han realizado en las muestras A-1 y A-5 (muestra homogénea), después de la saturación con Ca para homoionizar el complejo de cambio de cationes. De esta manera se desplazan todos los cationes de la interlámina, con lo que el Mg que se detecta en el análisis químico se puede atribuir íntegramente a la capa octaédrica (Wilson, 1987) [59].

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 4.8.

La fórmula estructural se ha calculado teniendo en cuenta que la carga aniónica es -44, con composición ideal del anión O₂₀(OH, F, Cl)₄. Las fórmulas estructurales de las esmectitas correspondientes a las muestras A-1 y A-5, se presentan en la Tabla 4.9.

La esmectita de la muestra A-1 tiene una carga octaédrica de -1,02, una carga tetraédrica de -0,15 (el 15% de la octaédrica), y la interlaminar es 1,15. Para la esmectita de la muestra A-5 estos valores son, respectivamente, -0,96, -0,20 (17% de la carga octaédrica) y 1,18.

La esmectita de ambas muestras tiene estructura laminar dioctaédrica alumínica, con Mg en posiciones octaédricas, con un 15% de carga en la muestra A-1 y 17% en la A-5, originadas por sustitución tetraédrica. En consecuencia, estas esmectitas son montmorillonitas tipo Wyoming (de acuerdo con Schultz L.G., en Newman A.C.D. (Ed), 1987) [60].

La capacidad de cambio de cationes (CCC) de la fracción menor de 2 μm se ha calculado, para

las muestras A-1 y A-5, conforme al siguiente método:

$$CCC \text{ (meq/100 g)} = (1000 \% \cdot CaO \cdot \text{valencia}) / Pm \text{ del óxido}$$

Los resultados son 127 meq/100 g para la muestra A-1 y 125 meq/100 g para la A-5, que son valores muy altos.

En los ensayos realizados en el laboratorio del CSIC-Zaidín, la capacidad de cambio se determinó mediante saturación con acetato amónico, a pH 7 y posterior desplazamiento del utilizando el método Kjeldhal.

Se hicieron ensayos sobre 4 muestras y 3 medidas sobre cada muestra. Los valores medios obtenidos son altos, con un promedio de 106 meq/100 g, que corresponde a la capacidad de cambio de bentonitas muy ricas en esmectita.

La fórmula estructural de la esmectita fue calculada a partir de los valores obtenidos en el análisis químico y de la capacidad de cambio hechos sobre la fracción menor de 20 μm, que contiene más del 99% de esmectita. La fórmula estructural obtenida es:



4.3.4 Sales solubles, conductividad, pH y fases amorfas

El contenido de sales solubles se ha determinado en CIEMAT siguiendo el Procedimiento 70-IMA-G-0-29 [61], en 7 muestras sin mezclar (muestras F) y en 2 de la muestra homogénea (muestras A).

Se dispersó una muestra seca de 2,5 g en 10 cm³ de agua destilada (relación sólido/líquido 1:4) y se agitó durante 48 horas. A continuación se centrifugó la suspensión y se determinaron en el sobrenadante cloruros y sulfatos, por cromatogra-

Tabla 4.7
Elementos traza en la muestra total (CIEMAT)

Elemento ppm	F-2	F-37	F-75	F-119	Media ± Desviac. est.	A-1	A-5
B _{tot}							
¹⁰ B/ ¹¹ B	0,2500	0,2506	0,2466		0,249±0,002	0,2453	0,2453
Ba	135	180	190	160	166±24	150	195
Be	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Br	2,2	2,3	2,2	2,5	2,3±0,1	2,5	2,1
Ce	64	68	65	71	67±3	64	62
Cl	590	605	600	592	597±7	580	575
Co	15,0	8,2	8,3	8	9,9±3,4	8,3	8,7
Cr	7,2	7,9	5,9	6,4	6,8±0,9	11,0	6,4
Cs	10,0	11,0	9,8	9,6	10,1±0,6	10,0	10,0
Cu	20	28	14	39	25±11	30	31
Eu	0,76	0,79	0,79	0,83	0,79±0,03	0,75	0,75
I	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2
La	42	43	40	43	42±2	38	41
Li	55	58	55	55	56±2	54	54
Mo	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Nd	25	28	27	29	27±2	26	27
Ni	19	21	16	22	20±3	24	21
Rb	40	41	44	39	41±2	44	41
Re	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Sn	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
Se	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Sr	215	225	245	250	224±17	190	220
Th	20,1	20,1	19,2	20,1	19,9±0,5	19,0	19,7
U	1,5	2,6	1,3	2,2	1,9±0,6	1,9	1,9
V	16	16	19	16	17±2	12	14
W	<25	<25	<25	<25	<25	<25	<25
Y	20	24	23	25	23±2	23	22
Zn	62	71	60	69	66±5	64	70

Tabla 4.8
Composición química de la fracción menor de 2 μm homoionizada en Ca

Óxidos %	A-1	A-5	MEDIA %
SiO ₂	60,51	60,17	60,34
Al ₂ O ₃	19,14	19,41	19,27
Fe ₂ O ₃	3,26	3,46	3,36
FeO	0,17	0,14	0,155
MgO	4,04	4,22	4,13
CaO	3,57	3,50	3,53
Na ₂ O	0,28	0,35	0,31
K ₂ O	0,61	0,67	0,64
Ti ₂ O	0,18	0,17	0,17
H ₂ O ⁺	8,25	7,90	8,07

fía iónica, y la conductividad eléctrica con una celda electrométrica. El contenido de sal se mantiene siempre por debajo de 1%, pues no aparece en las determinaciones de rayos X.

La sílice libre fue extraída en una solución 0,1 M de Na₂CO₃, después de 48 horas de agitación, a temperatura ambiente (Procedimiento 70-IMA-G-0-33 [62]). A continuación, la suspensión se centrifugó y se midió la sílice libre en el sobrenadante por el método colorimétrico sílico-molíbídico.

Los valores obtenidos aparecen en las Tablas 4.10 y 4.11.

Comparando los valores obtenidos durante los estudios de años anteriores sobre la bentonita del

mismo yacimiento (Capítulo 2), se puede observar que el valor medio del contenido de cloruros es menor en la bentonita FEBEX, mientras que el contenido medio en sílice libre es mayor.

En el laboratorio del CSIC-Zaidín se determinaron los cationes solubles, el pH y la conductividad eléctrica, en un extracto acuoso realizado con agua destilada de relación sólido/líquido 1:10.

Se determinaron los iones Na⁺, K⁺, Ca²⁺ y Mg²⁺. Los valores medios obtenidos son: 133,66 mg/100 g de Na⁺; K⁺, 6,01 mg/100 g; Ca²⁺, 6,45 mg/100 g; y Mg²⁺, 1,12 mg/100 g. La conductividad eléctrica del extracto acuoso se midió comparándola con la de una solución patrón: el

Tabla 4.9
Fórmula estructural de la esmectita

Tetraédrica			Octaédrica					Interlámina		
Muestra	Si ⁴⁺	Al ³⁺	Al ³⁺	Fe ³⁺	Fe ²⁺	Ti ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Na ⁺	K ⁺
A-1	7,85	0,15	2,78	0,32	0,02	0,02	0,78	0,49	0,07	0,10
A-5	7,80	0,20	2,76	0,34	0,01	0,02	0,82	0,49	0,09	0,11

Tabla 4.10
Análisis del extracto acuoso 1:4

Referencia muestra	C.E. 25°C μS/cm	Cl ⁻ mg/l	SO ₄ ²⁻ mg/l
F-2	1 512	200	294
F-17	1 635	192	336
F-18	1 557	193	303
F-37	1 423	182	258
F-75	1 579	203	309
F-102	1 468	184	299
F-119	1 412	200	200
MEDIA	1 512	193	286
DESV. EST.	83	8	44
A-1	1 601	197	319
A-5	1 557	193	303

valor medio obtenido ha sido de 0,59 mS/cm. El pH del extracto acuoso se midió con el método habitual, ajustando el pH-metro con dos patrones de 4 y 7 unidades de pH; los pH medidos son alcalinos y varían entre 8,98 y 9,00.

También se ha realizado en el laboratorio del CSIC-Zaidín la determinación de las fases amorfas de sílice, hierro y alúmina.

Para la extracción de los amorfos de sílice y alúmina, se ha utilizado como extractante una solución de carbonato sódico al 5%. La solución extraída se acidifica a pH 2,5 con HCl, y se determina por espectrofotometría la sílice y la alúmina libres con los métodos descritos anteriormente.

La extracción de los oxihidróxidos de hierro se ha hecho con ditionito sódico y citrato sódico, según el método de Holgrem (1967) [63]. Una vez extraído, el hierro se determina por espectrofotometría con el método descrito anteriormente.

Los valores medios obtenidos para estos geles se indican en la Tabla 4.12.

4.3.5 Complejo de cationes de cambio

Después de lixiviadas las sales solubles, los cationes de cambio de la arcilla fueron extraídos por desplazamientos sucesivos con una solución tampón 1M de AcONH₄ (acetato amónico) de pH 7 (Procedimiento 70-IMA-G-0-34 [64]), y se determinaron por espectroscopía de emisión atómica, excepto el K⁺ que se determinó por emisión de llama. Los resultados obtenidos para cada muestra figuran en la Tabla 4.13, junto con el valor de CCC obtenido por suma del valor de cada catión.

Todas las muestras tienen también pequeñas cantidades de otros cationes de cambio: Sr²⁺ (0,41 meq/100 g), Ba²⁺ (0,02 meq/100 g) y Mn²⁺ (0,06 meq/100 g); algunas contienen Al³⁺ en cantidades menores de 0,4 meq/100 g.

En el laboratorio del CSIC-Zaidín se determinaron los cationes de cambio al calcular la capacidad de cambio (CCC), según el procedimiento indicado en el Apartado 4.3.3.

Los cationes de cambio se determinaron en las soluciones después de la saturación inicial con

Tabla 4.11
Sílice libre en la fase sólida

Referencia muestra	SiO ₂ libre ppm
F-2	379
F-17	338
F-18	320
F-37	398
F-75	316
F-102	433
F-119	486
MEDIA	381
DESV. EST.	63
A-1	419
A-5	408

Tabla 4.12
Fases amorfas

	Fases amorfas		
	% SiO ₂	% Al ₂ O ₃	% Fe ₂ O ₃
MEDIA	1,48	0,035	0,105
DESV. EST.	0,11	5 · 10 ⁻³	8,6 · 10 ⁻³

NH₄⁺: Na y K mediante fotometría de llama y Ca y Mg mediante complexometría con EDTA. Los valores medios obtenidos se muestran en la Tabla 4.14. El complejo de cambio está dominado por Mg²⁺, Ca²⁺ y Na⁺, siendo el K⁺ siempre minoritario.

Los valores obtenidos, para el complejo de cationes de cambio, son muy similares en ambos laboratorios.

4.3.6 Superficie específica total

La superficie específica total se ha determinado en el laboratorio del CSIC-Zaidín por el método

de la higroscopicidad (Keeling, 1961) [65]. Cuatro alícuotas de la muestra se calentaron a 300 °C durante dos horas y después se enfriaron en un desecador con CaCl₂.

Las muestras secas se mantuvieron posteriormente hasta peso constante en un desecador con una disolución saturada de NaCl, que produce una atmósfera de vapor de agua del 80%. Partiendo del contenido de agua adsorbida, se calcula el área superficial, por contraste con la montmorillonita patrón de Wyoming. Los resultados obtenidos varían entre un máximo de 659 y un mínimo de 640 m²/g.

4.4 Ensayos mecánicos, hidráulicos y térmicos

4.4.1 Ensayos mecánicos

Presión de hinchamiento

La presión de hinchamiento se ha determinado en edómetros, siguiendo el Procedimiento 70-IMA-G-0-21 [37]. Los ensayos se han hecho en 11 muestras sin mezclar (muestras F) y en 5 de la muestra homogénea (muestras A), a dos densidades secas (nominales): 1,60 y 1,70 g/cm³. En total se han

ensayado 22 probetas de densidad seca nominal 1,60 g/cm³ y 10 de densidad seca nominal 1,70 g/cm³.

Las probetas se compactan uniaxialmente en anillos edométricos de 4,93 cm de diámetro (para las probetas de 1,60 g/cm³ de densidad seca) y de 3,57 cm (para las probetas de 1,70 g/cm³ de densidad seca). En todos los casos la altura de la probeta es de 1,20 cm. Los anillos se colocan en la celda endométrica entre dos piedras porosas y en contacto con agua por su parte inferior. La probeta se mantiene a volumen constante durante el ensayo, mediante cargas crecientes sobre la pro-

Tabla 4.13
Valores del complejo de cambio (CIEMAT)

Referencia muestra	Ca ²⁺ meq/100g	Mg ²⁺ meq/100g	Na ⁺ meq/100g	K ⁺ meq/100g	CCC meq/100g
F-2	47	39	26	2,3	114
F-17	48	37	25	2,3	113
F-18	44	37	25	2,2	108
F-37	55	41	26	2,2	124
F-75	47	35	23	2,2	108
F-102	52	36	25	2,3	116
F-119	48	35	25	2,3	110
MEDIA	48	38	25	2,2	113
DESV. EST.	4	2	1	0,0	6
A-1	54	39	25	2,2	121
A-5	49	39	26	2,2	117

Tabla 4.14
Valores del complejo de cambio (CSIC-Zaidín)

Referencia	Ca ²⁺ meq/100g	Mg ²⁺ meq/100g	Na ⁺ meq/100g	K ⁺ meq/100g	Total meq/100g	CCC meq/100g
MEDIA	47,03	35,5	25,8	2,29	110,7	106
DESV. EST.	2,07	2,37	0,51	0,08	1,43	3,4

beta para impedir el hinchamiento que se produce por la absorción de agua. La presión de hinchamiento es la carga por unidad de superficie sobre la probeta después de llegar al equilibrio, definido por deformación nula durante 24 horas.

Además de la presión de hinchamiento, se ha determinado la humedad inicial y final y la densidad seca de cada probeta. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 4.15. Las densidades secas medias de todos los ensayos de cada serie (muestras F y A) son 1,60 y 1,71 g/cm³ y las presiones de hinchamiento 49,7 y 98,5 kg/cm², respectivamente.

Con los resultados de ensayos hechos durante los años anteriores al proyecto FEBEX, sobre muestras del mismo yacimiento (Capítulo 2), se ha determinado que la presión de hinchamiento media y la densidad seca están relacionadas por la ecuación

$$P_s = \exp (5,9 p_d - 7,9)$$

donde P_s es la presión de hinchamiento en MPa y p_d es la densidad seca en g/cm³.

Según esta ecuación, las presiones de hinchamiento para densidades secas de 1,60 y 1,71 g/cm³ son 46,6 y 89,3 kg/cm², respectivamente.

Los valores medios de las presiones de hinchamiento obtenidos en los ensayos actuales realizados sobre la bentonita FEBEX son ligeramente superiores: 6,7% y 10,3% para las densidades de 1,60 y 1,71 g/cm³, respectivamente. Estas variaciones son muy pequeñas, incluso para los resultados de ensayos hechos con probetas de la misma muestra. En la Figura 4.26 se representan los valores obtenidos junto con la curva de regresión de la bentonita S-2.

Hinchamiento bajo carga

Se han realizado 7 ensayos para determinar el hinchamiento producido bajo una carga vertical dada. Todos los ensayos se han hecho en probetas de la muestra homogénea (muestras A-1 a A-5). En todos los casos, las probetas se han preparado a la densidad seca nominal de 1,60 g/cm³. Cuatro ensayos se han hecho a 0,5 MPa de carga y otros tres a 0,9 MPa.

Las probetas se preparan y colocan en el edómetro de la misma forma que en el caso anterior y se aplica una carga vertical determinada, al mismo tiempo que la probeta se pone en contacto con agua en su parte inferior para permitir su sa-

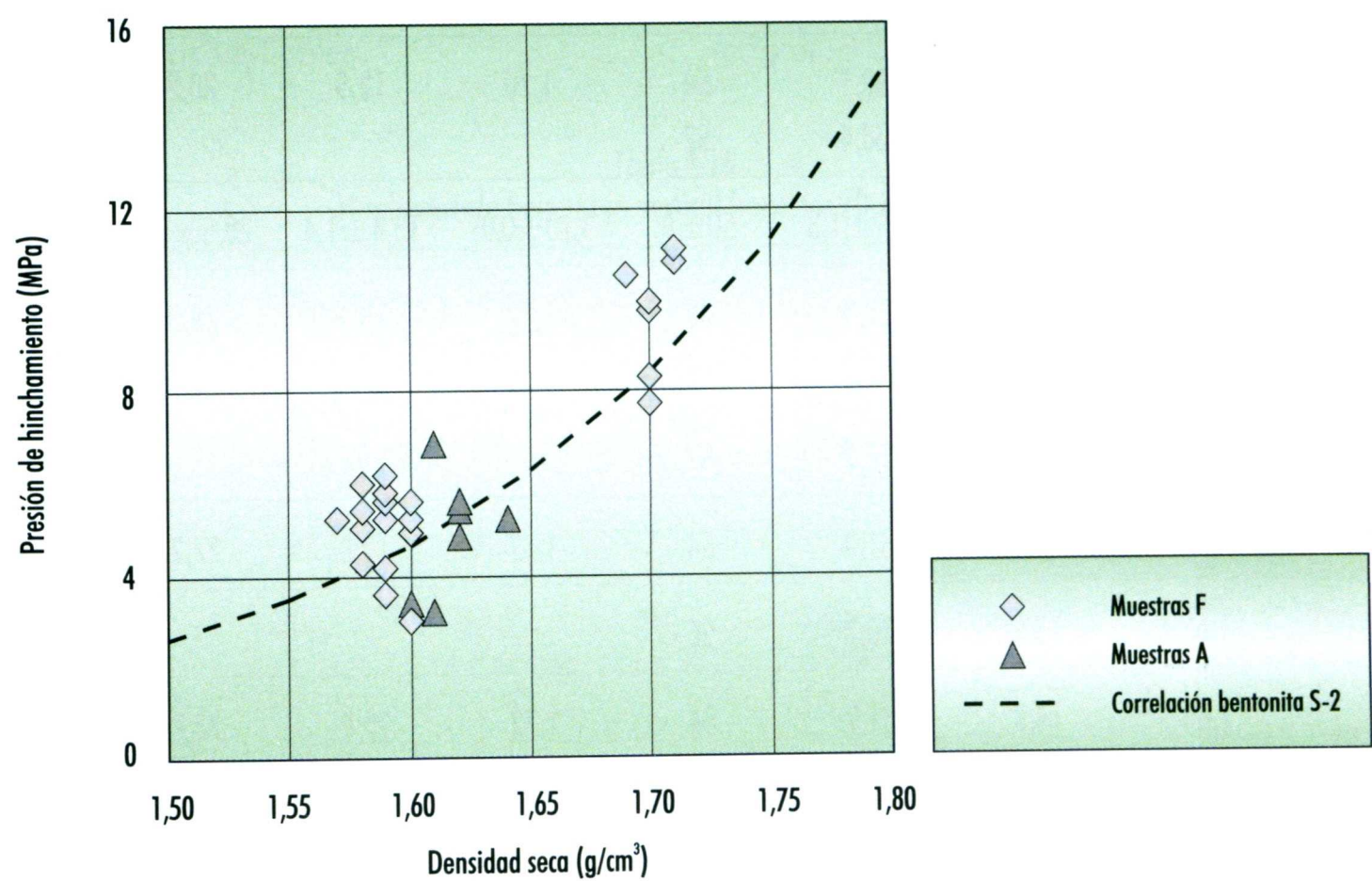


Figura 4.26: Presión de hinchamiento para muestras F y A y curva ajustada previamente para la bentonita S-2.

Tabla 4.15
Presiones de hinchamiento para densidades secas nominales de 1,60 y 1,70 g/cm³

Referencia muestra	ρ_d g/cm ³	w inicial %	w final %	P _s kg/cm ²	ρ_d g/cm ³	w inicial %	w final %	P _s kg/cm ²
F-2	1,59	15,2	29,5	>58	1,71	15,6	29,6	108
F-18	1,59	15,5	27,5	>62	1,70	15,0	29,4	83
	1,58	16,1	29,4	>50				
F-37	1,58	14,5	32,4	42	1,71	12,7	27,8	111
F-59	1,60	13,0	30,5	49				
F-65	1,58	15,0	30,1	>60				
F-75	1,60	11,2	29,2	30	1,70	12,7	28,4	77
	1,59	12,2	29,2	52	1,70	12,3	27,5	97
F-79	1,59	13,1	32,5	41				
F-93	1,59	13,8	29,9	36				
	1,59	14,0	29,7	>>56				
F-102	1,60			>56	1,69	14,8	28,4	105
F-109	1,57	14,3	29,6	52				
F-119	1,58	13,5	30,1	54	1,70	12,5	28,2	99
	1,60	12,5	28,4	52				
MEDIA	1,59±0,01	13,9±1,4	29,9±1,3	50±9	1,70±0,01	13,4±1,4	28,5±0,8	97±13
A-1	1,61	13,0	29,9	32	1,72	13,4	29,0	85
	1,61	13,7	28,3	>68				
A-2	1,64	12,0	26,7	52				
A-3	1,62	13,0	31,0	54	1,72	12,8	27,2	124
A-4	1,62	13,0	30,2	56				
A-5	1,60	14,5	31,9	34	1,72	13,4	28,2	96
	1,62	12,7	27,5	48				
MEDIA	1,62±0,01	13,1±0,8	29,4±1,9	48±13	1,72±0,00	13,2±0,3	28,1±0,9	102±20

turación. Durante el ensayo se registra periódicamente el hinchamiento hasta su estabilización.

El hinchamiento o porcentaje de deformación es la razón entre el incremento de altura y la altura inicial y se expresa en tanto por ciento. También se han determinado las humedades inicial y final y la densidad seca inicial de cada probeta. Los resultados se presentan en la Tabla 4.16.

En la Figura 4.27 se ha representado el porcentaje de hinchamiento en función del tiempo, donde se puede observar que la estabilización se produce en unos 10 días.

En la UPC-DIT se han realizado también ensayos de hinchamiento bajo carga, siguiendo el Procedimiento 70-UPC-G-0-02 [66]. Se han ensayado 21 probetas preparadas con material de la muestra homogénea 70-IMA-3-4-0, recibida de CIEMAT. Las probetas se han preparado a varias densidades secas comprendidas entre 1,57 y 1,87 g/cm³, con una humedad inicial del 11,7±1,1% (humedad de equilibrio con la del aire del laboratorio). Cada probeta se ha ensayado para una carga predeterminada, entre 0,01 MPa y 10,00 MPa. Los ensayos se han realizado en edómetros convencionales, saturando la probeta.

Durante la saturación se midieron las deformaciones verticales con el tiempo. En las Figuras 4.28 a 4.33 se muestran las gráficas de la evolución de las deformaciones con el tiempo, para las diferentes densidades y cargas verticales.

En las Figuras 4.34 y 4.35 se representa el valor de la deformación unitaria vertical, medida después de la saturación, en función de la densidad seca inicial y de la carga vertical aplicada.

La deformación unitaria inducida (ε) después de la saturación puede ser expresada aproximadamente por la ecuación siguiente:

ε = - 0,4693 - 0,1935 log σ + 0,3659 ρ_d

donde σ es la carga vertical en MPa y ρ_d la densidad seca inicial en g/cm³.

En la Figura 4.36 se muestra el cambio volumétrico (expresado en índice de poros) en función de la carga, después de la saturación. El índice de poros resultante (ε) puede ser expresado aproximadamente por la ecuación siguiente:

e = 0,842 - 0,327 log σ

Donde s es la carga aplicada en MPa.

Como se puede comprobar, los resultados de ambos laboratorios son muy similares.

Superficie de estado

Estos ensayos fueron realizados en la UPC-DIT en 3 probetas de bentonita compactada a una densidad seca de 1,63 g/cm³ y humedad del 11,7%. A cada probeta se aplicó una carga vertical constante de 0,03, 0,21 ó 1,21 MPa. Partiendo de una succión inicial de 130 MPa, orden de magnitud de la estimada para la humedad inicial,

Tabla 4.16
Hinchamiento bajo carga vertical (muestra 70-IMA-3-4-0)

Alícuota	ρ _d inicial g/cm ³	Carga vertical 0,5 MPa			Carga vertical 0,9 MPa			
		w inicial %	w final %	Hincha- miento %	ρ _d inicial g/cm ³	w inicial %	w final %	Hincha- miento %
A-1	1,62	13,2	39,3	17,8				
A-2	1,60	14,7	40,1	17,2	1,59	14,2	36,7	15,9
A-3					1,61	13,8	36,6	14,7
A-4	1,62	13,7	38,3	17,8	1,59	15,0	37,2	13,4
A-5	1,62	14,0	39,1	17,2				
MEDIA	1,61±0,01	13,9±0,6	39,2±0,7	17,5±0,3	1,60±0,01	14,3±0,6	36,8±0,3	14,7±1,3

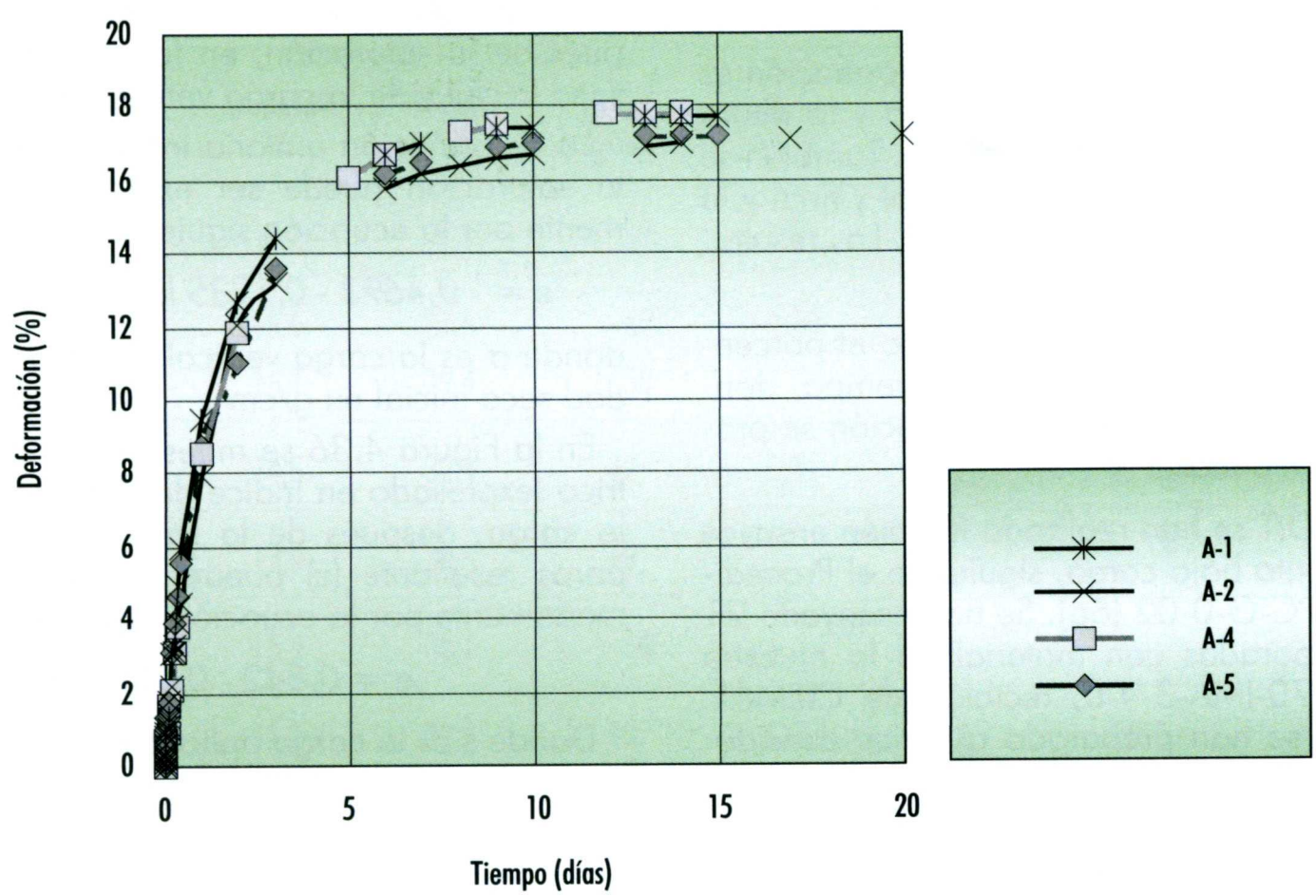


Figura 4.27: Hinchamiento en función del tiempo para una carga vertical de 0,5 MPa (70-IMA-3-4-0, muestras A).

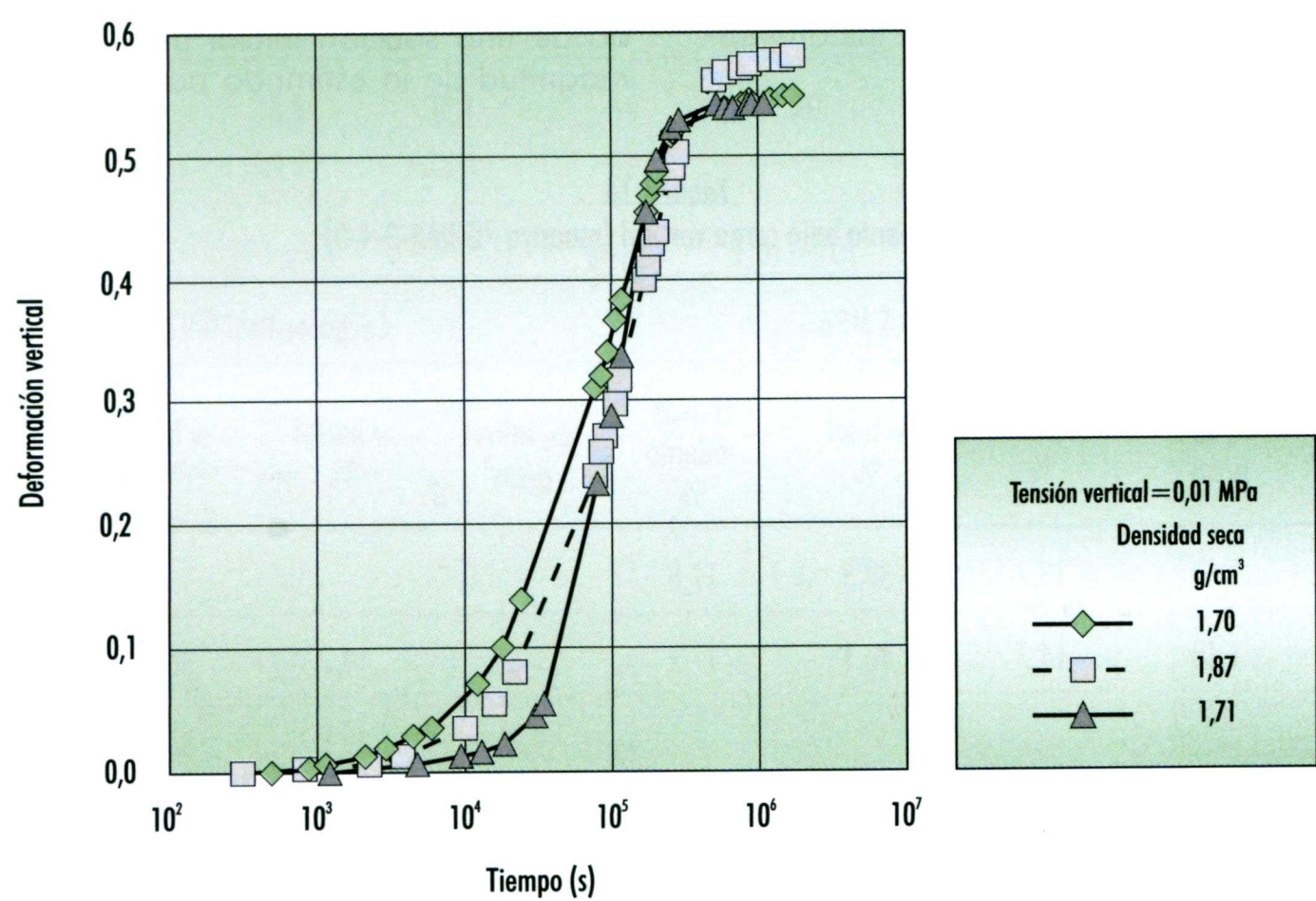


Figura 4.28: Evolución en el tiempo de las deformaciones por hinchamiento durante los ensayos de humectación bajo carga. Tensión vertical = 0,01 MPa.

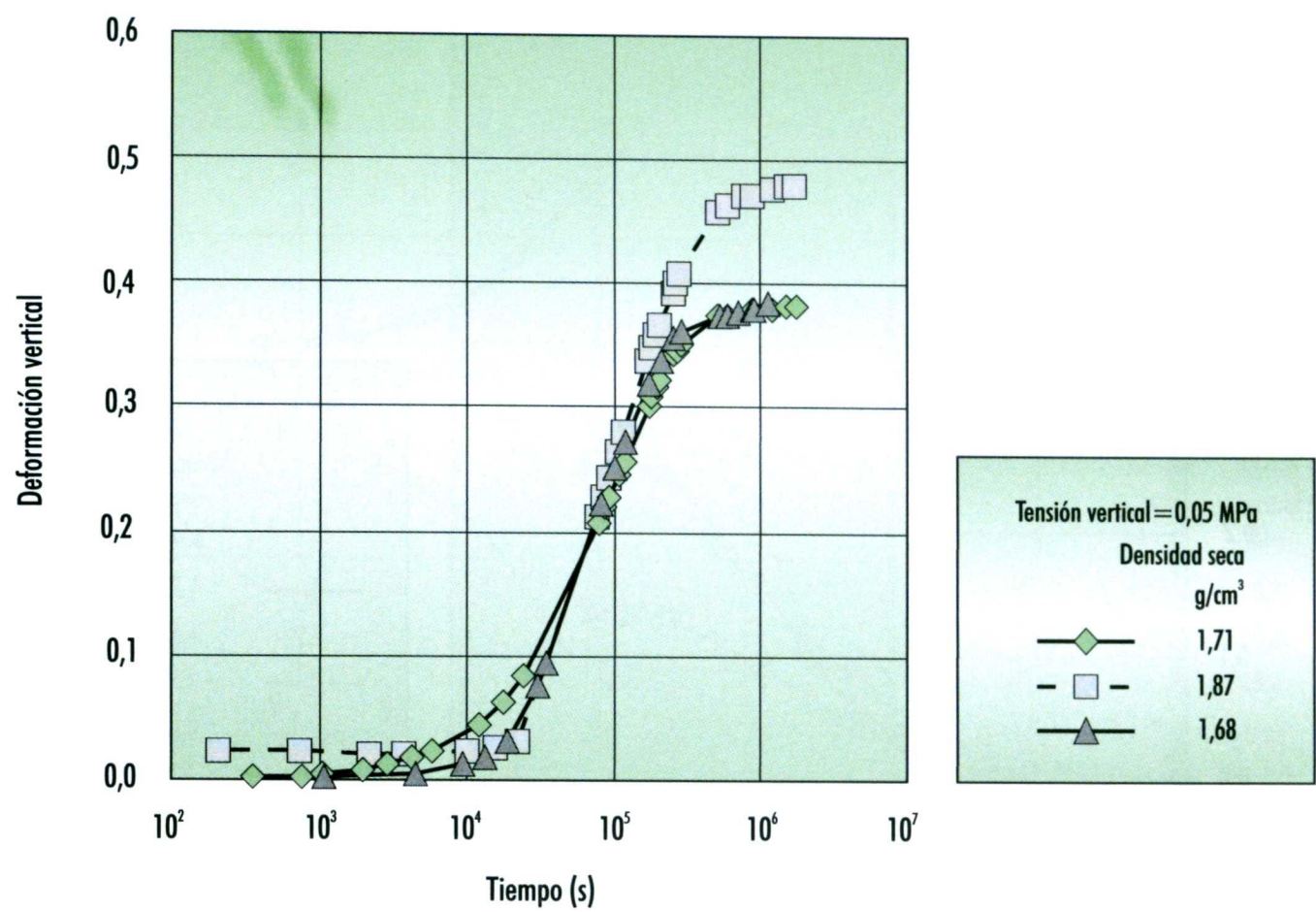


Figura 4.29: Evolución en el tiempo de las deformaciones por hinchamiento durante los ensayos de humectación bajo carga. Tensión vertical = 0,05 MPa.

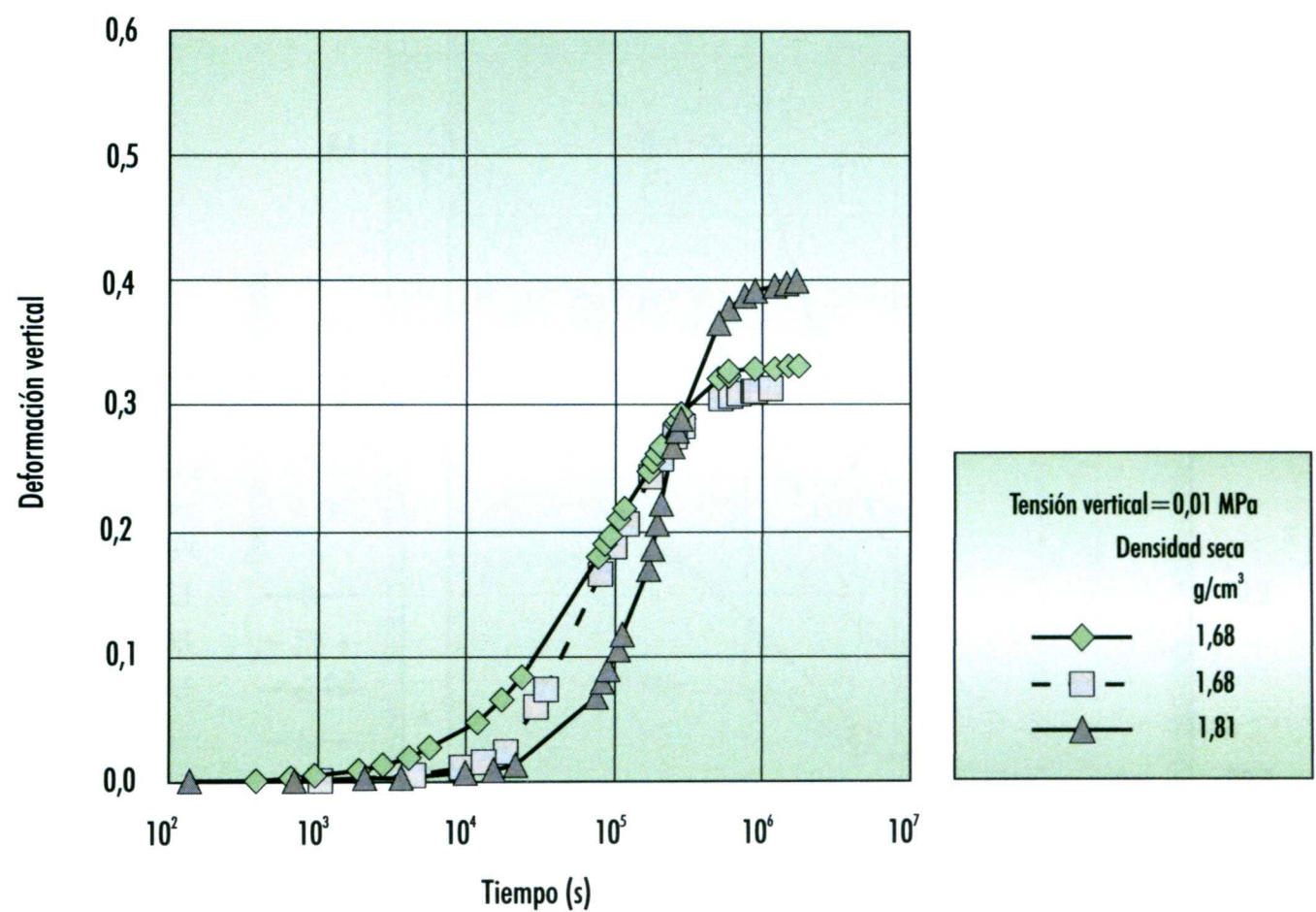


Figura 4.30: Evolución en el tiempo de las deformaciones por hinchamiento durante los ensayos de humectación bajo carga. Tensión vertical = 0,1 MPa.

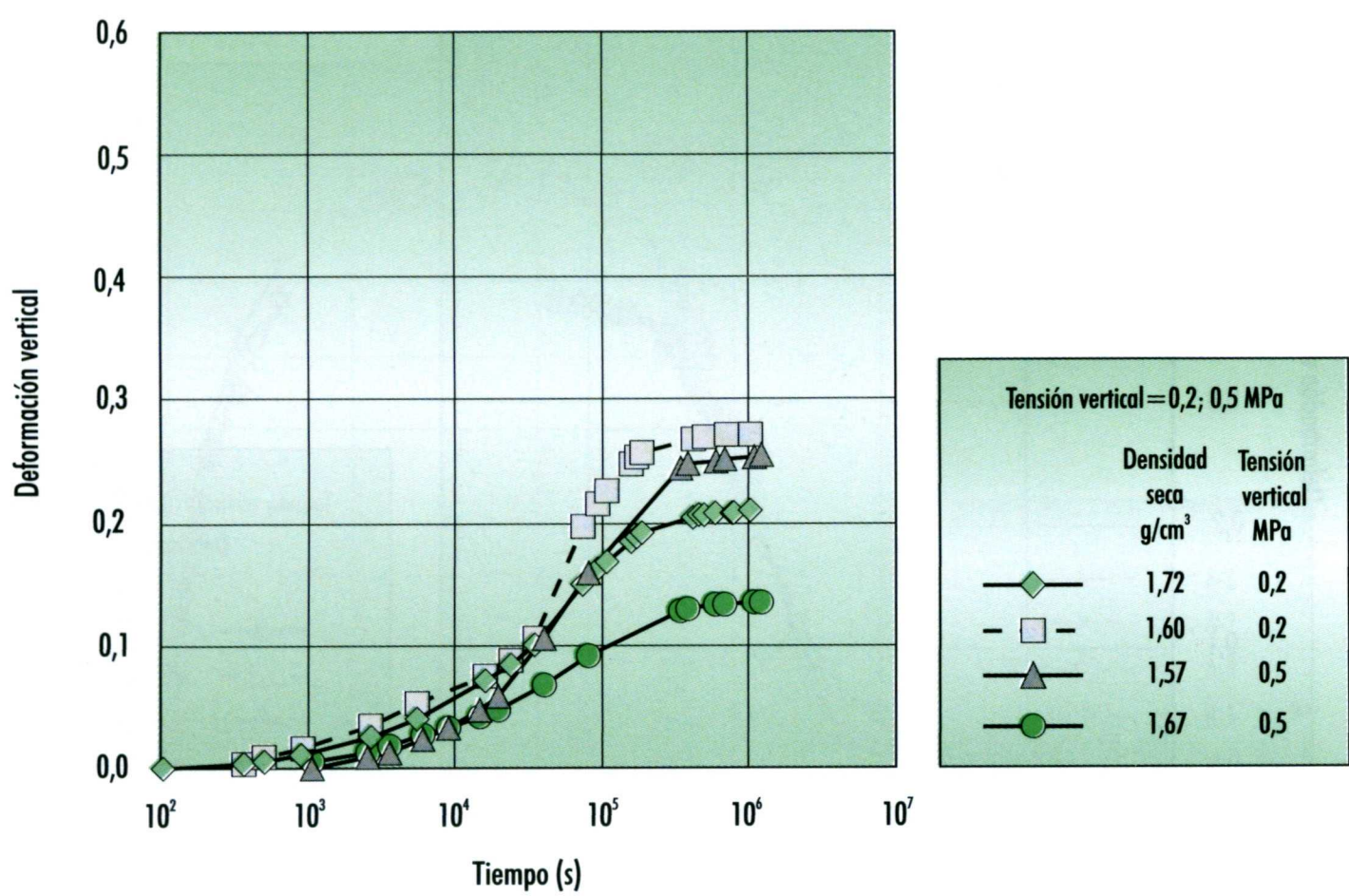


Figura 4.31: Evolución en el tiempo de las deformaciones por hinchamiento durante los ensayos de humectación bajo carga. Tensión vertical = 0,2; 0,5 MPa.

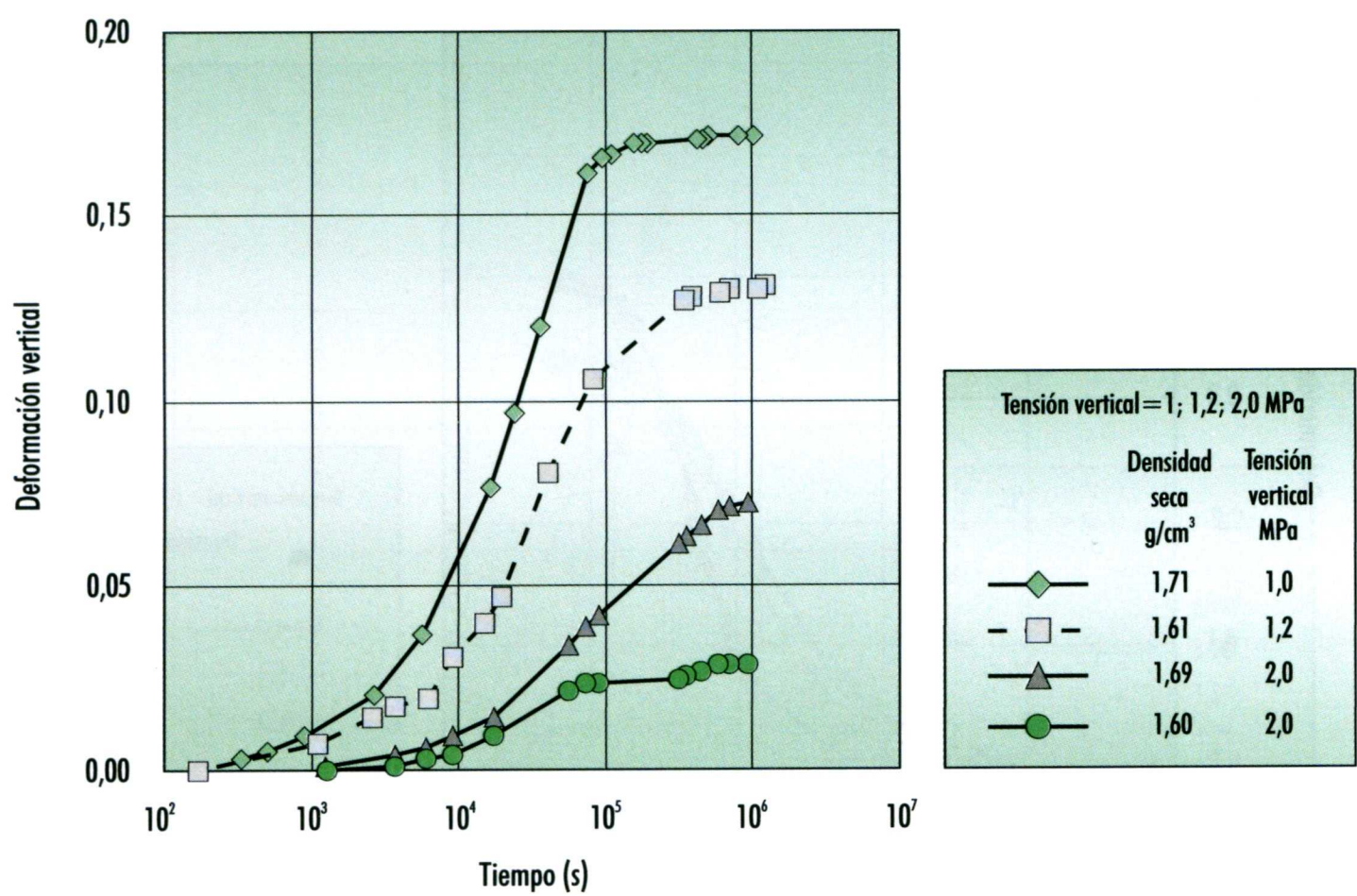


Figura 4.32: Evolución en el tiempo de las deformaciones por hinchamiento durante los ensayos de humectación bajo carga. Tensión vertical = 1; 1,2; 2,0 MPa.

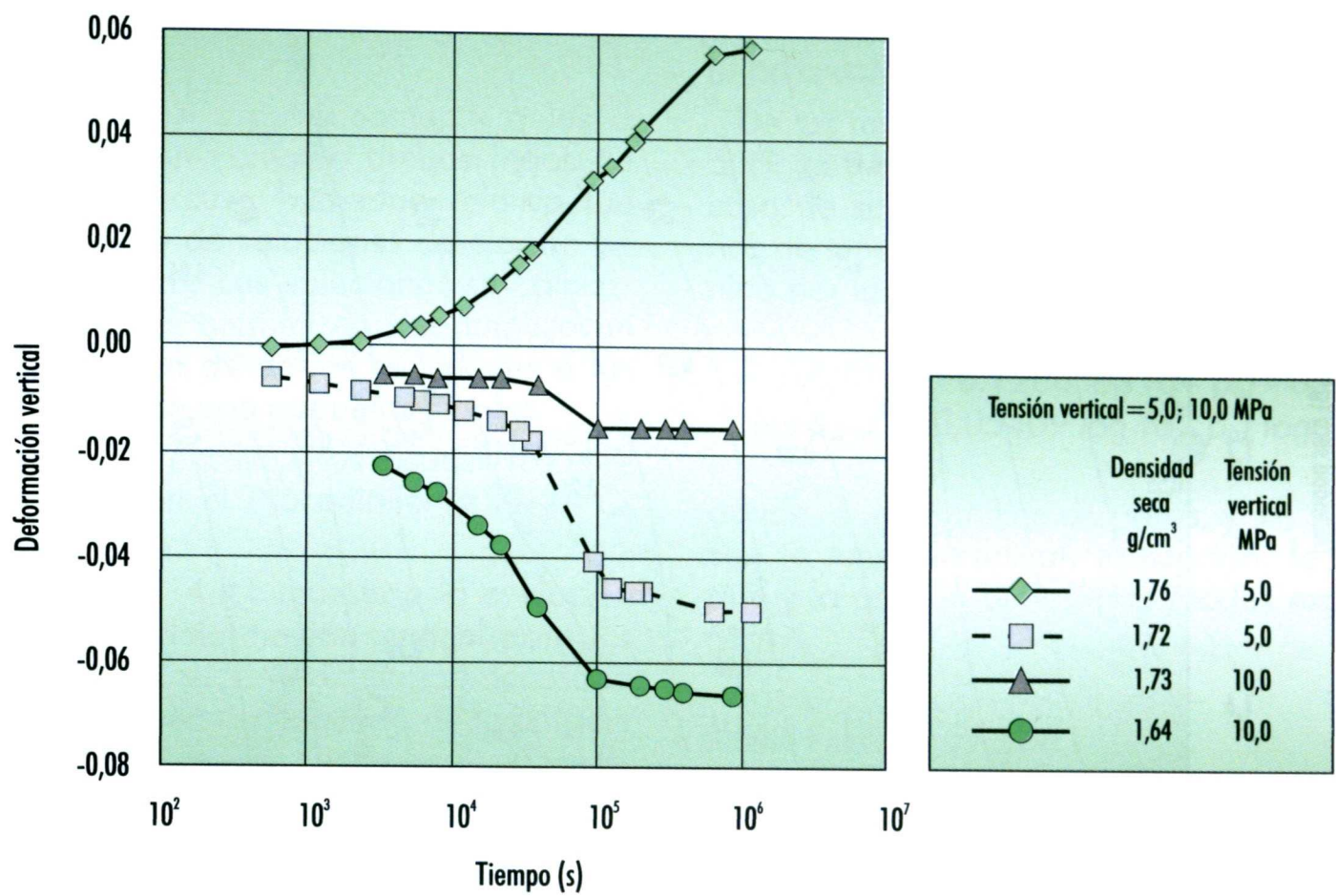


Figura 4.33: Evolución en el tiempo de las deformaciones por hinchamiento durante los ensayos de humectación bajo carga. Tensión vertical = 5; 10 MPa.

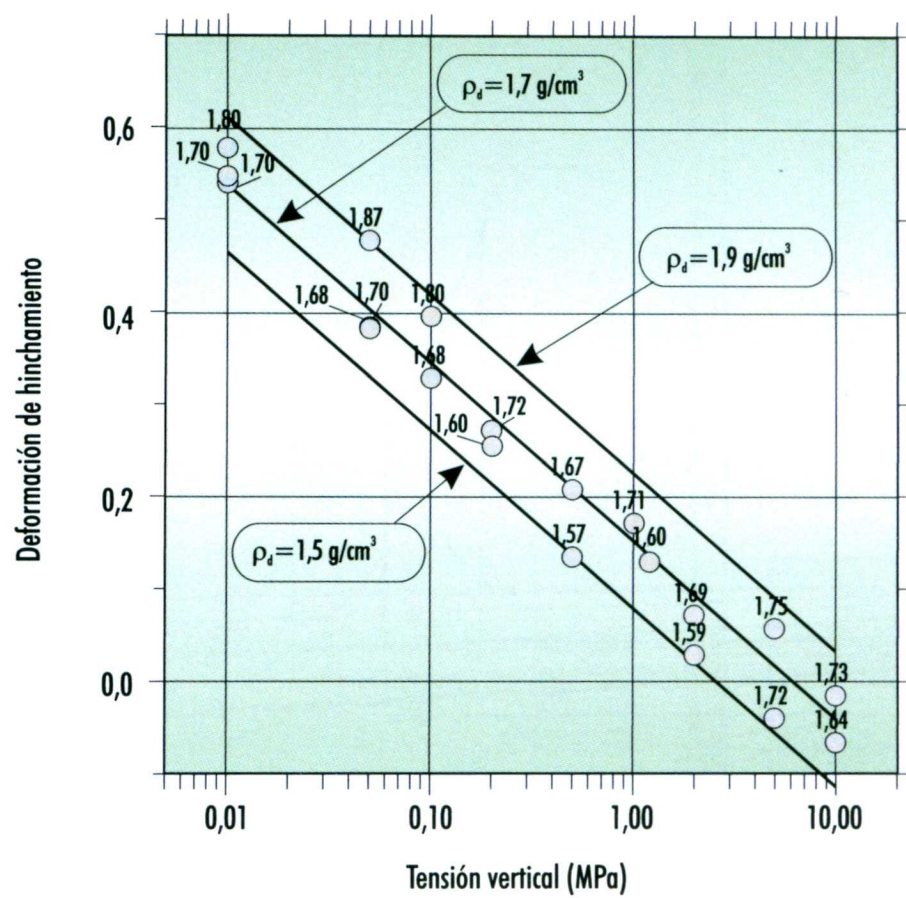


Figura 4.34: Deformaciones por hinchamiento para diferentes cargas verticales aplicadas. El valor de la densidad seca inicial se indica cerca de cada punto.

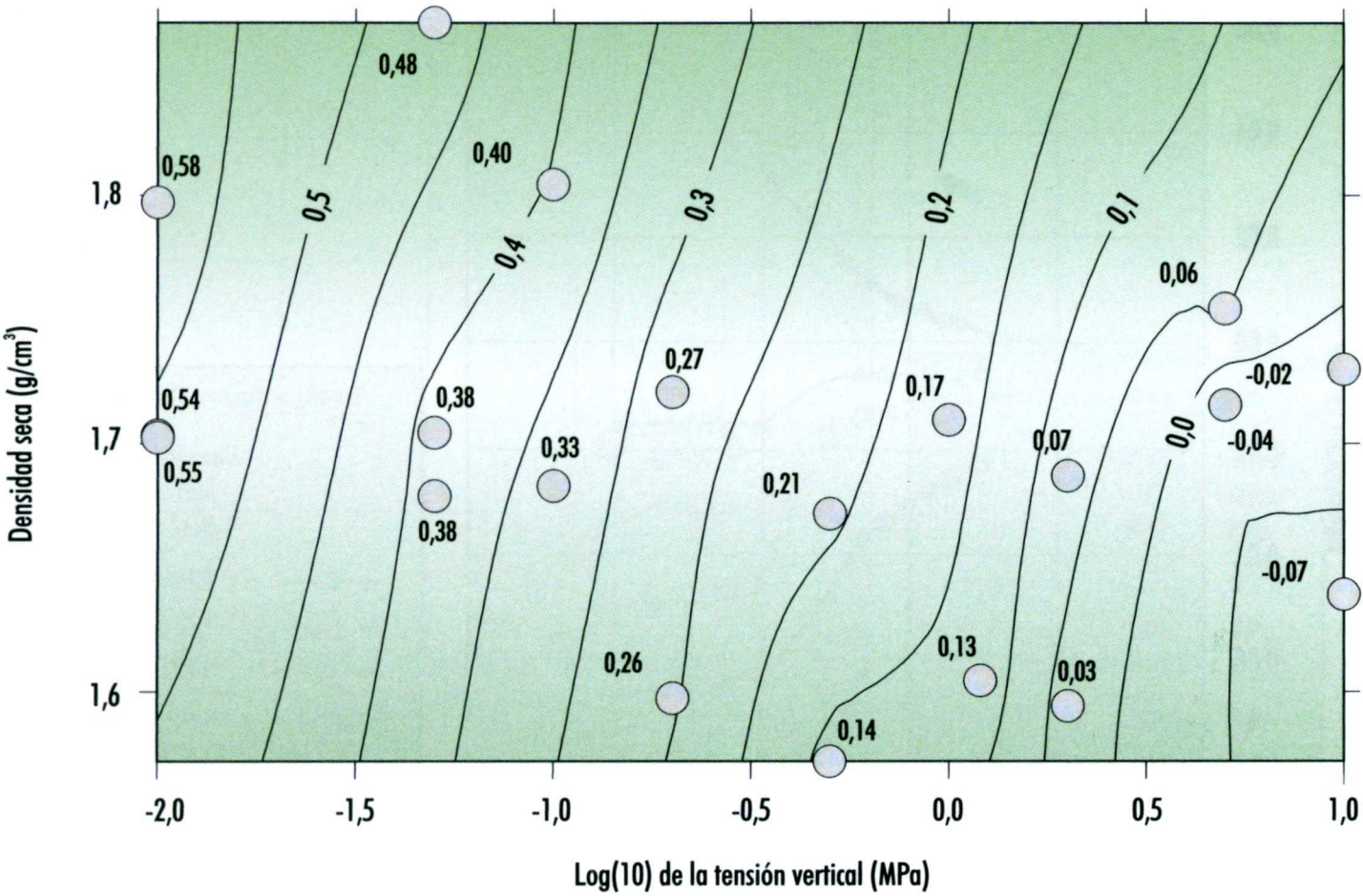


Figura 4.35: Deformaciones por hinchamiento para diferentes cargas verticales aplicadas y densidades secas iniciales.

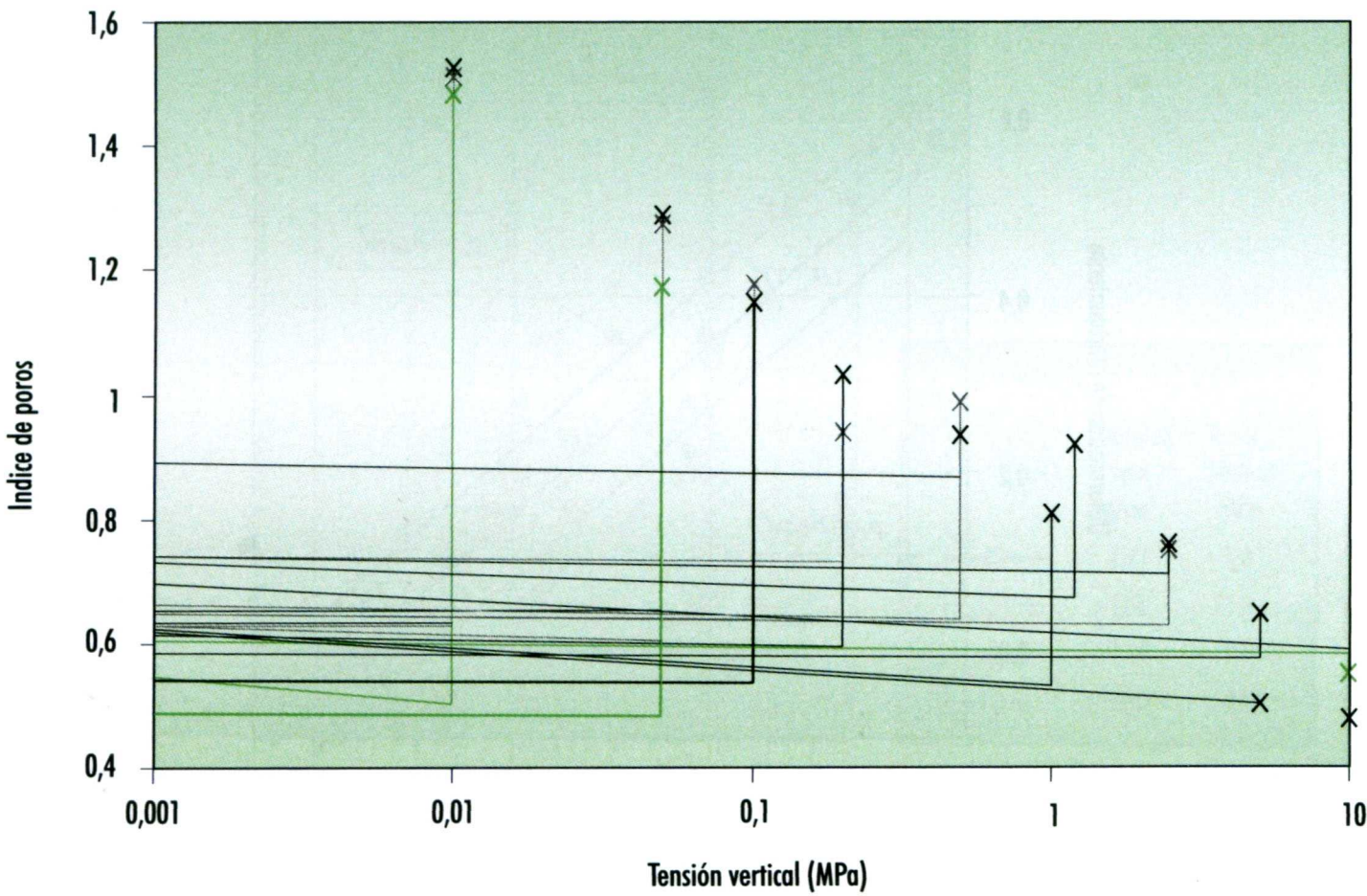


Figura 4.36: Índice de poros final después de los ensayos de humectación bajo carga.

se aplicó en cada probeta una trayectoria de succiones de 97, 360, 135, 22 y 0 (inundación total) MPa.

Se aplicó la succión simultáneamente a las 3 probetas, poniendo en contacto ambos lados de las mismas con aire cuya humedad relativa fue controlada por medio de soluciones de cloruro de sodio y ácido sulfúrico. Las soluciones se colocaron en dos recipientes herméticos y se impuso un flujo constante de aire desde los recipientes a las muestras por medio de una pequeña bomba.

La metodología del ensayo y los dispositivos utilizados se describen en el Procedimiento 70-UPC-G-0-04 [67].

Las Figuras 4.37 a 4.41 muestran la evolución con el tiempo de la deformación vertical para los diferentes cambios de succión. El tiempo necesario para conseguir el equilibrio depende de la carga y succión aplicadas, pero es necesario un mes, como mínimo, para llegar a velocidades pequeñas de deformación.

Las Figuras 4.42 a 4.44 muestran el índice de poros para la trayectoria completa de succiones y para cada carga vertical aplicada.

En la Figura 4.45 se ha representado el índice de poros en función de la carga vertical, para

cada succión. En la misma figura se muestra el índice de poros final de los ensayos de hinchamiento bajo carga.

De los resultados de estos ensayos, se puede deducir una superficie de estado preliminar para el caso de succión decreciente con cambios pequeños de tensiones. La superficie de estado está definida por la ecuación siguiente:

$$e = 0,8169 - 0,1268 \log (\sigma - p_a) - 0,04968 \log (s + p_{atm}) + 0,05409 \log (\sigma - p_a) \log (s + p_{atm})$$

donde e es el índice de poros, y σ , s , p_a y p_{atm} son la tensión vertical, la succión, la presión del aire y la presión atmosférica, todas expresadas en MPa.

Módulo elástico de corte

Estos ensayos se han hecho en la UPC-DIT, siguiendo el Procedimiento 70-UPC-G-0-06 [68]. Se ensayaron 10 probetas compactadas a una densidad seca entre 1,53 y 1,73 g/cm³ y grados de saturación de 0,15, 0,50 y 0,90, en una columna resonante, con el fin de obtener el módulo elástico de corte (G) a pequeñas deformaciones

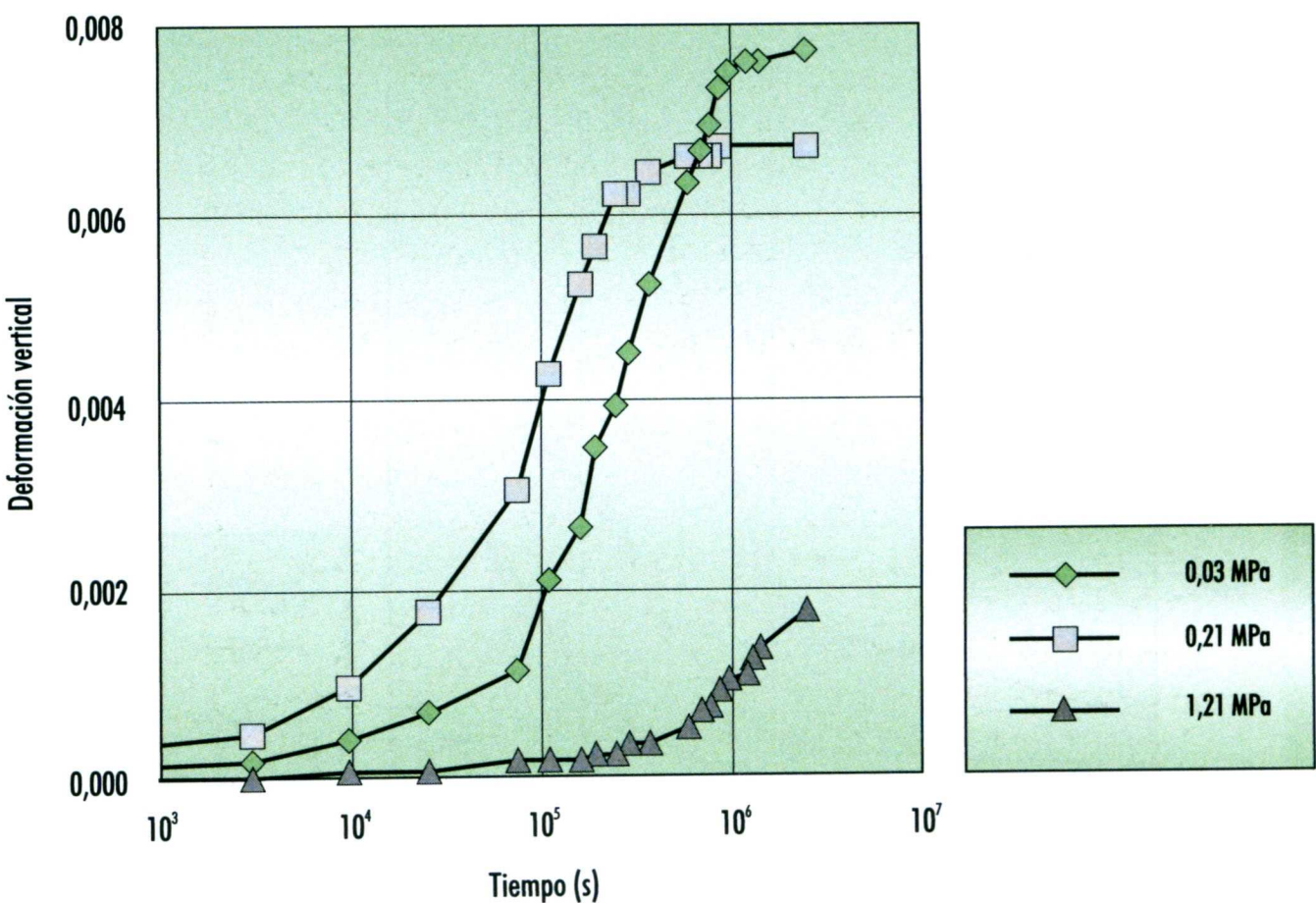


Figura 4.37: Evolución en el tiempo de las deformaciones por cambio de succión. Desde la inicial (130 MPa) a 97 MPa.

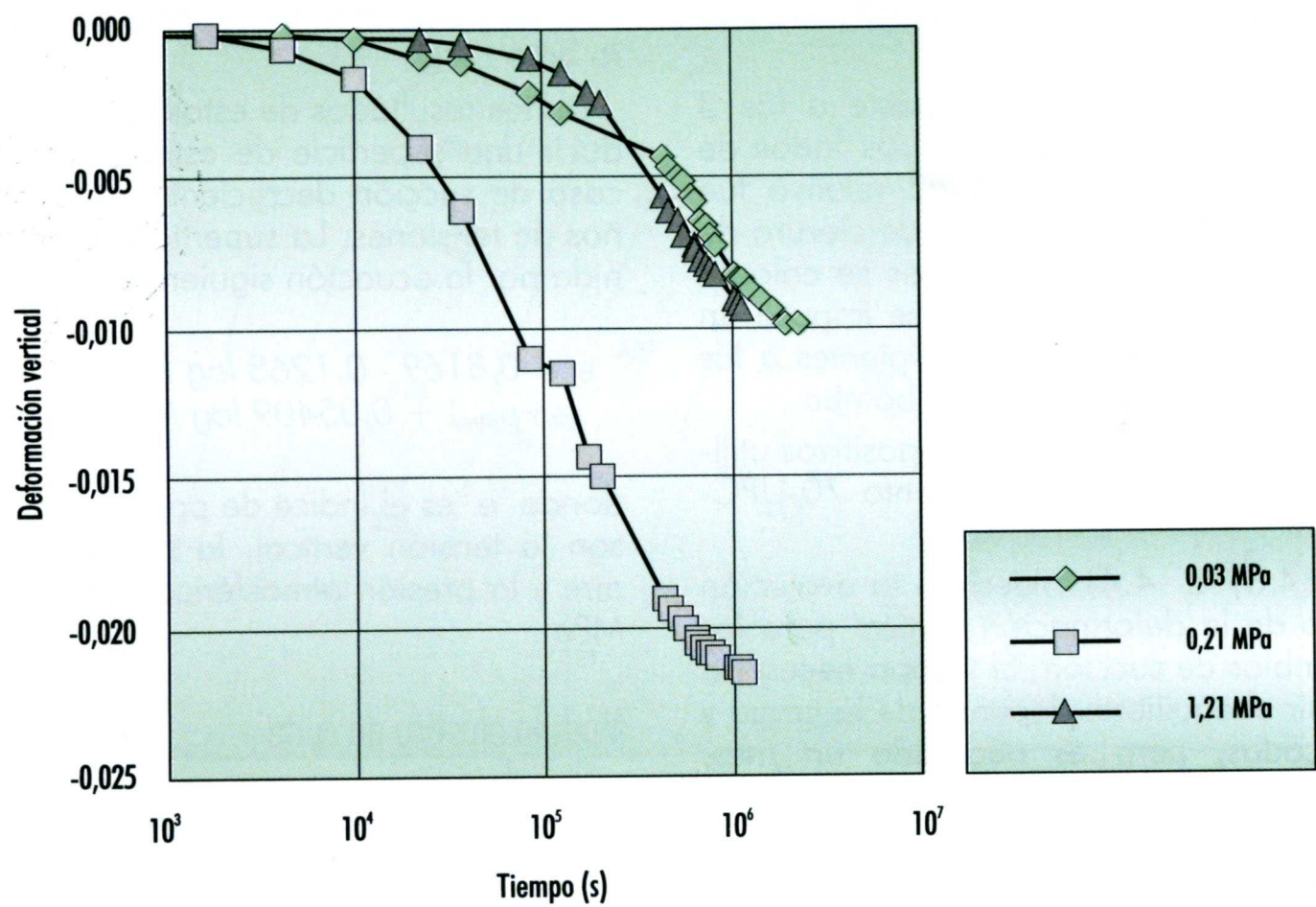


Figura 4.38: Evolución en el tiempo de las deformaciones por cambio de succión. Desde 97 a 360 MPa.

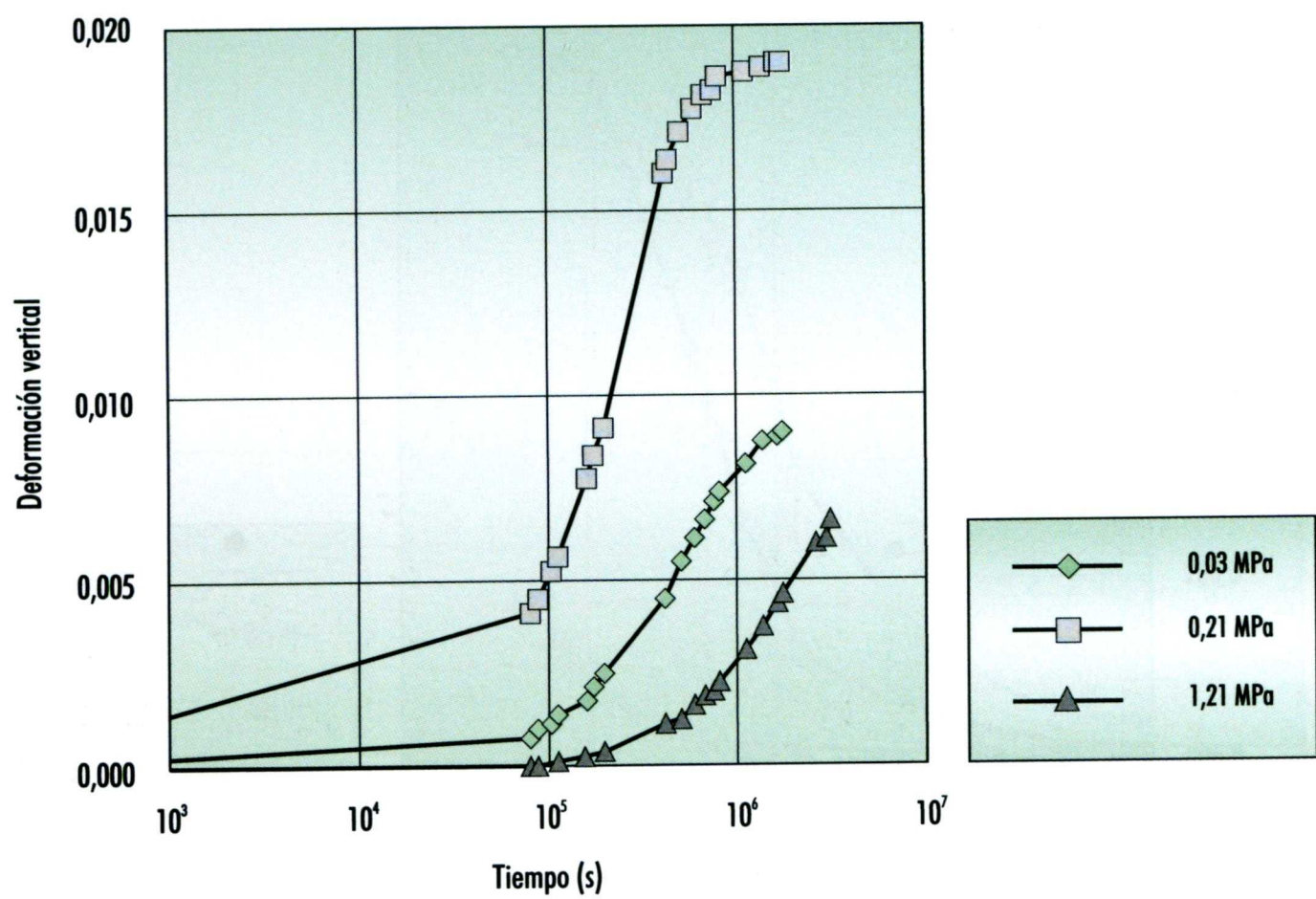


Figura 4.39: Evolución en el tiempo de las deformaciones por cambio de succión. Desde 360 a 135 MPa.

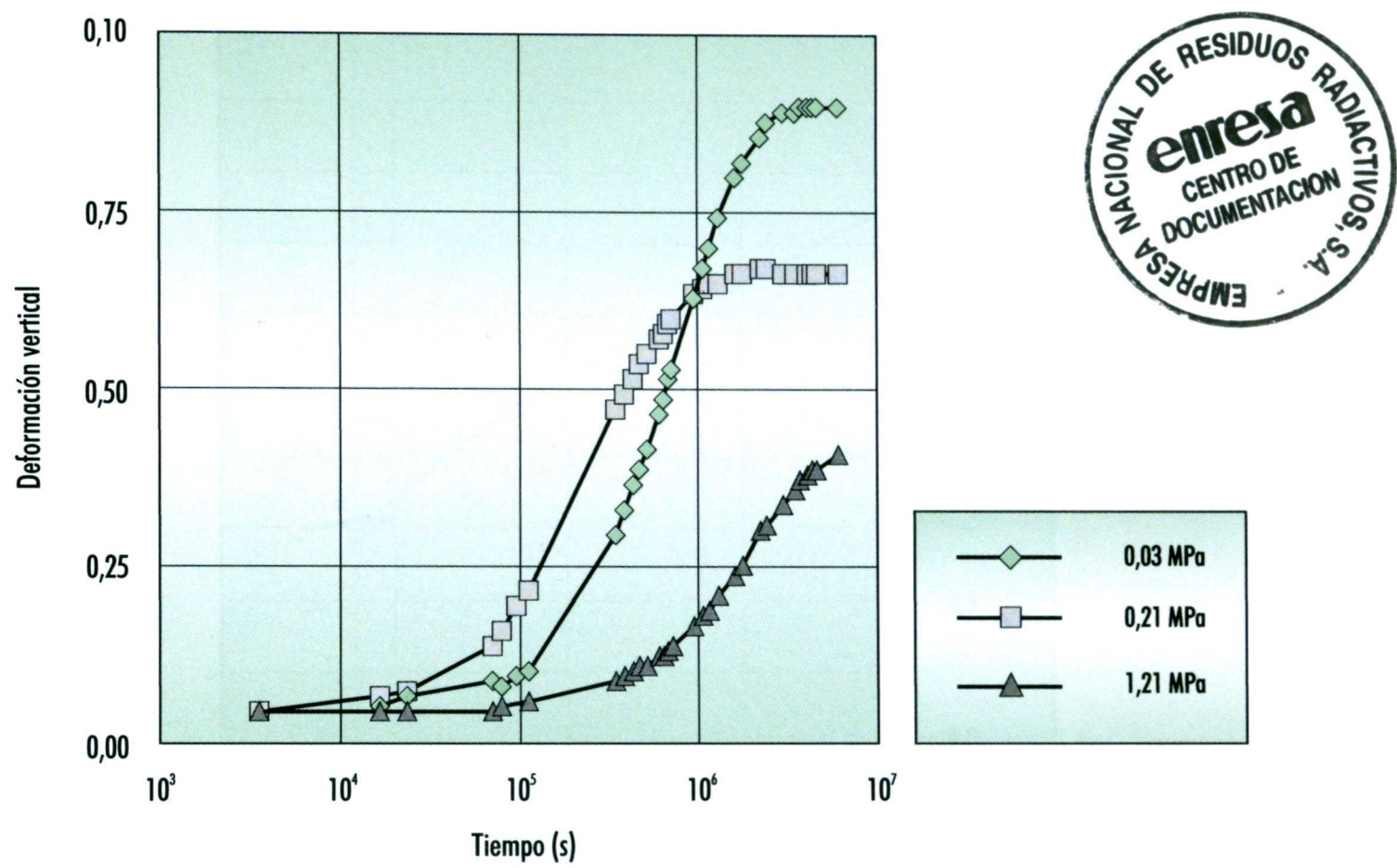


Figura 4.40: Evolución en el tiempo de las deformaciones por cambio de succión. Desde 135 a 22 MPa.

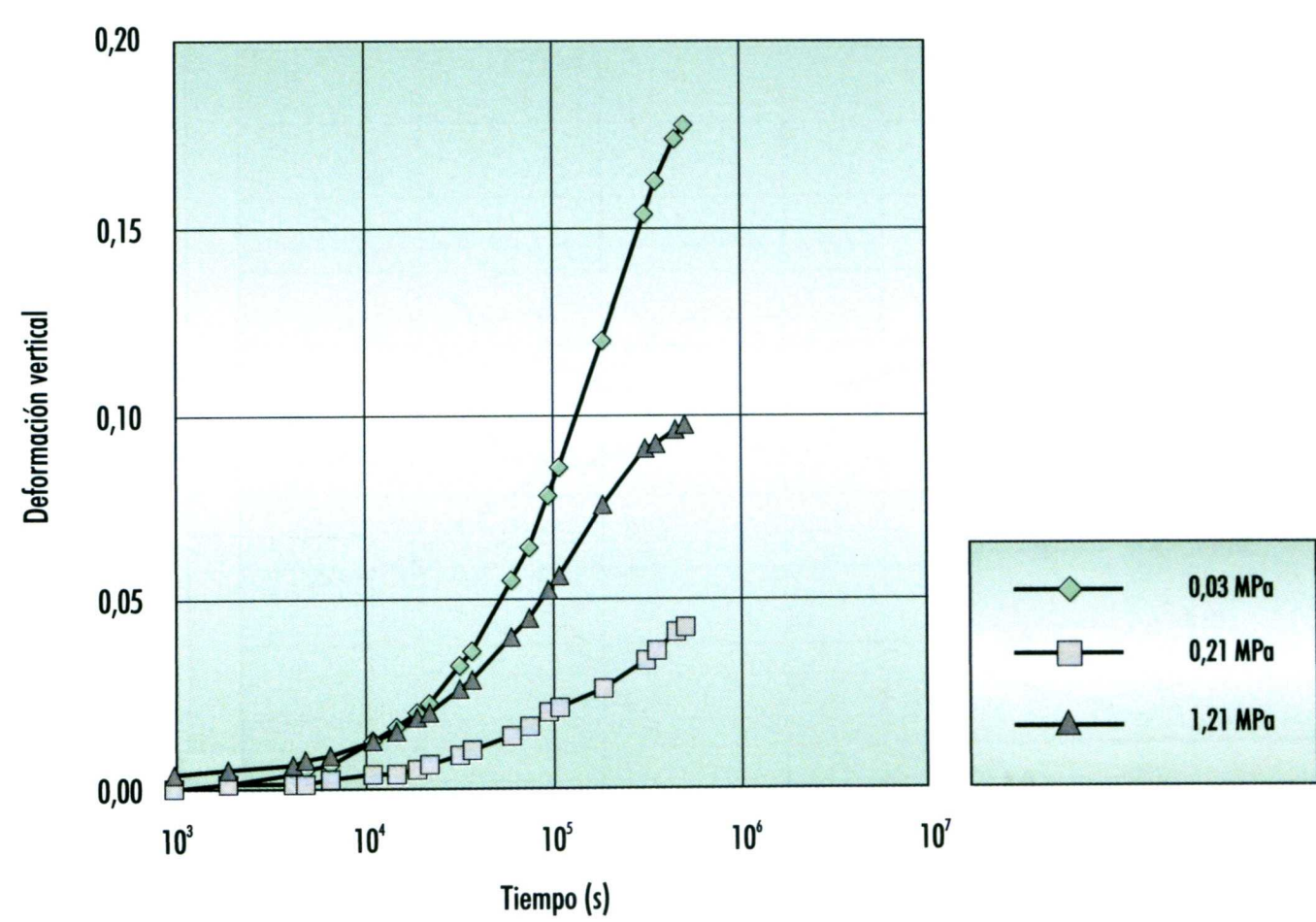


Figura 4.41: Evolución en el tiempo de las deformaciones por cambio de succión. Desde 22 a 0 MPa.

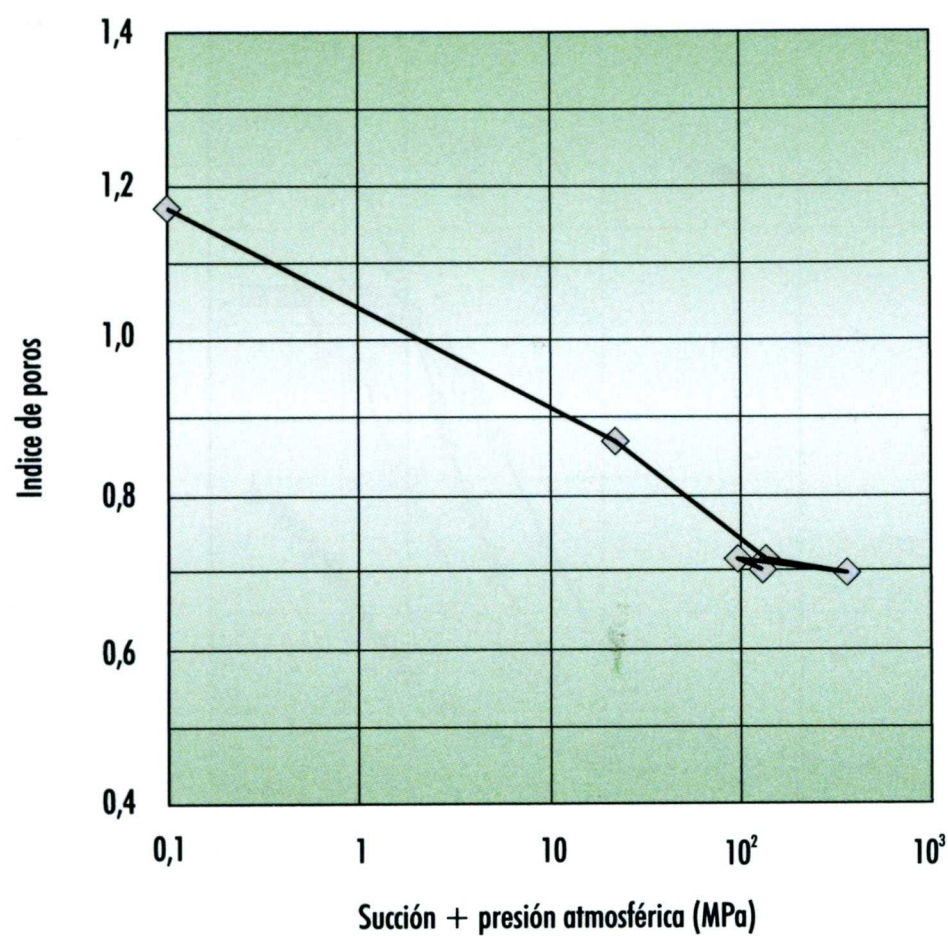


Figura 4.42: Relación succión-índice de poros en los ensayos edométricos. Carga vertical de 0,03 MPa.

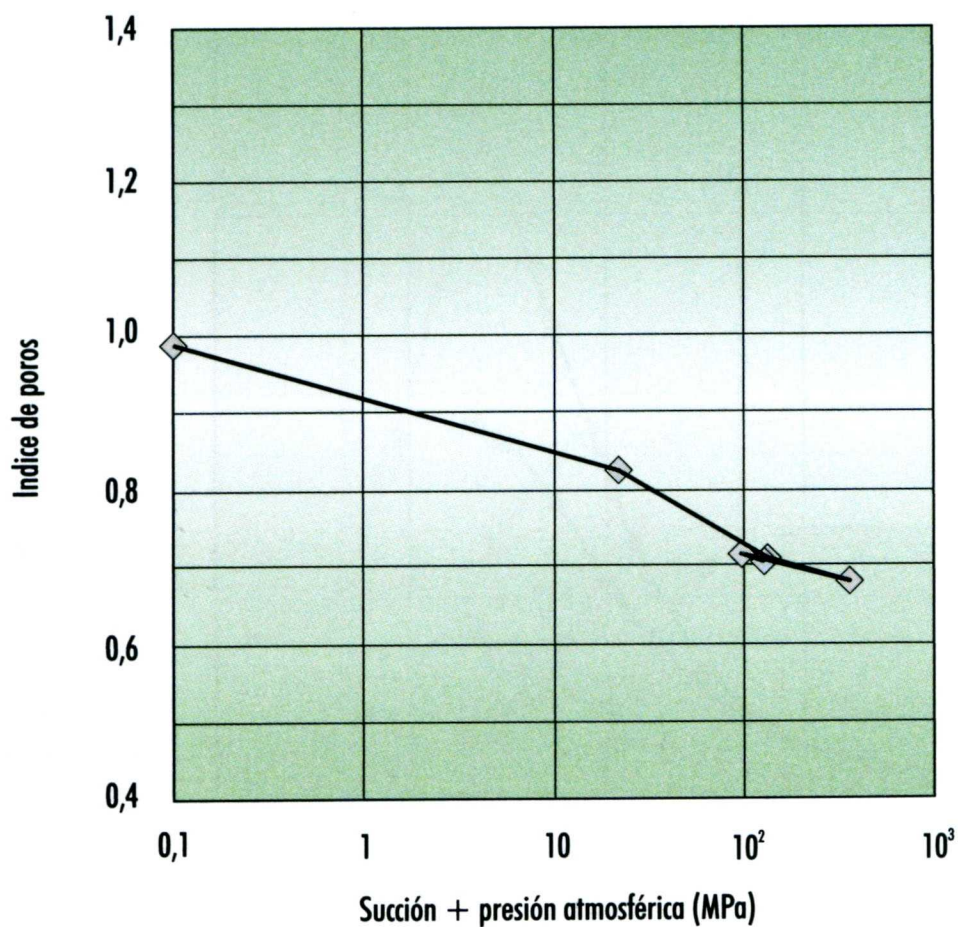


Figura 4.43: Relación succión-índice de poros en los ensayos edométricos. Carga vertical 0,21 MPa.

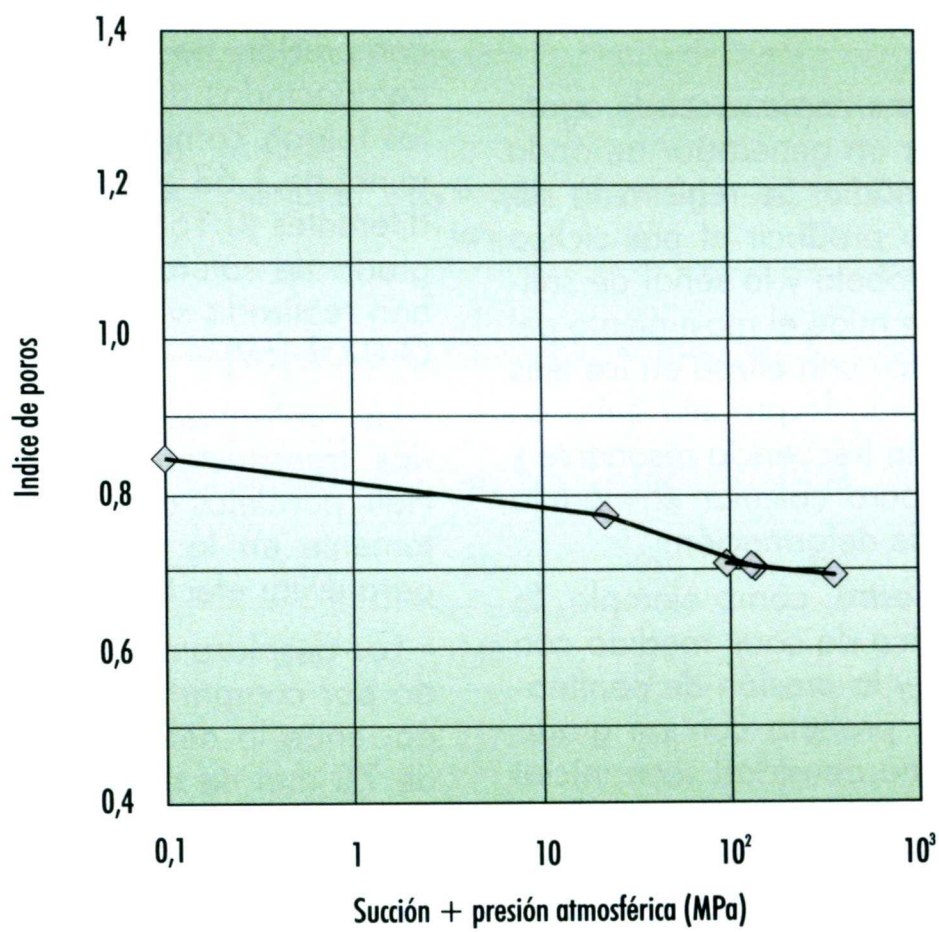


Figura 4.44: Relación succión-índice de poros en los ensayos edométricos. Carga vertical 1,21 MPa.

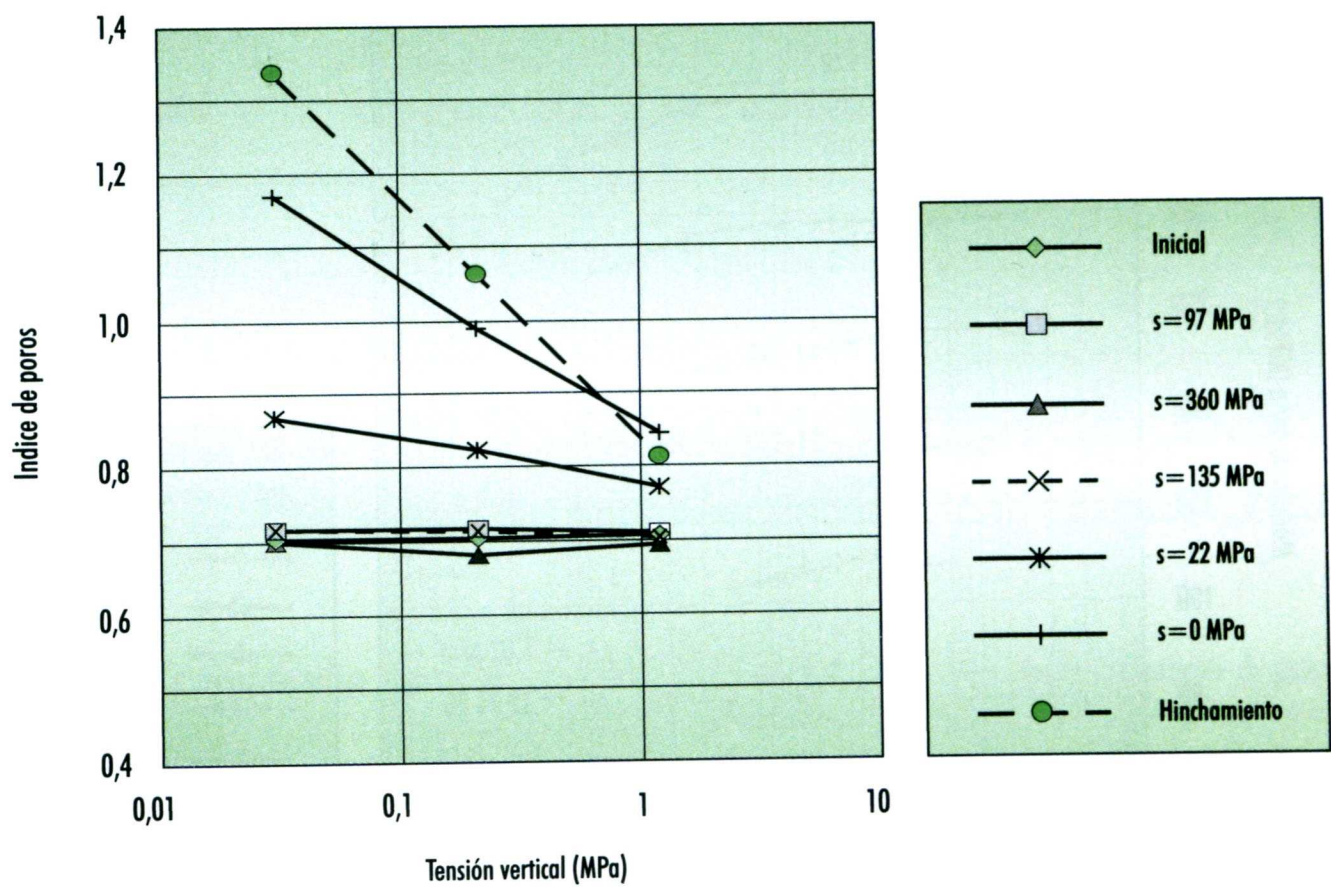


Figura 4.45: Resultados de todos los ensayos de humectación mostrando la variación del índice de poros con las cargas verticales aplicadas para diferentes valores de succión de equilibrio. También se indican los ensayos de inundación en edómetro convencional.

tangenciales ($10^{-6} \leq \gamma \leq 10^{-4}$). Se utilizó un dispositivo de columna resonante de tipo cabeza libre y base fija.

El aparato se basa en un sistema electromagnético que es alimentado por un generador de onda senoidal de frecuencia variable. Se registra la señal eléctrica utilizada para producir el par cíclico de torsión aplicado a la probeta y la señal de salida de un acelerómetro, que mide el movimiento del extremo libre, lo que produce una elipse en los ejes x-y de un osciloscopio cuando la probeta entra en resonancia. Los valores de la frecuencia resonante y la aceleración se utilizan para calcular el módulo elástico de corte y el nivel de deformación.

En la Figura 4.46 se muestra, como ejemplo, la variación del módulo elástico de corte medido con la deformación tangencial y la presión de confinamiento en el caso de una probeta con un grado de saturación de 0,50 y una densidad seca inicial de 1,62 g/cm³. La Tabla 4.17 y la Figura 4.47 muestran un resumen de los resultados obtenidos.

Rigidez de juntas

Estos ensayos se han realizado en la UPC-DIT, con el objeto de obtener la relación entre tensión

normal y desplazamiento en las juntas entre los bloques de bentonita. Se realizaron 4 ensayos de compresión no confinada en probetas cilíndricas compactadas de 38 mm de diámetro. Las probetas fueron compactadas a una densidad seca nominal de 1,63 g/cm³ y a tres grados de saturación diferentes (0,15 , 0,45 y 0,85). En dos probetas el grado de saturación fue de 0,45. Los ensayos se han realizado siguiendo el Procedimiento 70-UPC-G-0-07 [69].

Las deformaciones se midieron por medio de dos transductores de desplazamiento de efecto Hall, paralelos al eje longitudinal, montados directamente en la superficie lateral de las probetas para evitar efectos de asiento del equipo.

Los desplazamientos de la junta se han calculado por comparación, para el mismo nivel de carga, entre la deformación medida en una probeta de 78 mm de altura y la deformación medida en otra probeta formada por dos piezas superpuestas, de 39 mm de altura cada una.

En las Figuras 4.48 a 4.50 se representa la relación tensión-deformación medida en las probetas (con y sin juntas) y la tensión normal en función del desplazamiento en la junta. En la Tabla 4.18 se presentan los resultados obtenidos

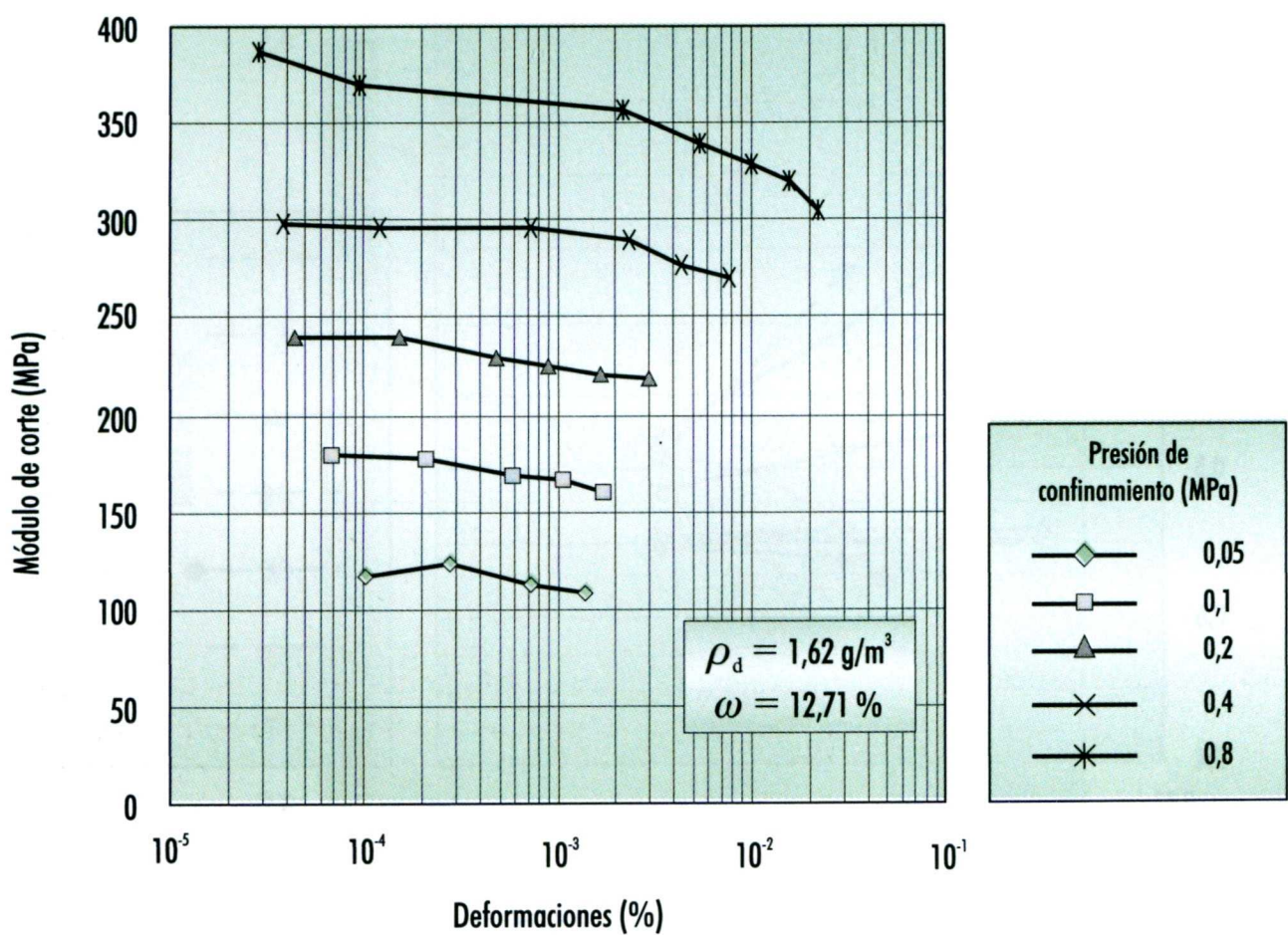


Figura 4.46: Módulo elástico de corte para varias cargas de confinamiento y deformaciones tangenciales.

Tabla 4.17
Módulo elástico de corte obtenido en los ensayos en columna resonante

Densidad seca g/cm ³	Humedad	Grado de saturación	Indice de poros	Módulo elástico de corte G (Mpa)				
				$\sigma_3 = 0,01$ MPa	$\sigma_3 = 0,1$ MPa	$\sigma_3 = 0,2$ MPa	$\sigma_3 = 0,4$ MPa	$\sigma_3 = 0,8$ MPa
1,58	14,7	54	0,757	140	207	245	300	370
1,66	13,6	57	0,668	211	223	270		
1,54	3,3	12	0,802	78	106	174	208	326
1,56	2,8	10	0,777	89	106	138		
1,62	24,6	95	0,717	240	270		331	336
1,66	21,2	87	0,677	252	296	370	429	502
1,65	4,7	19	0,685	74	90	137	190	310
1,72	10,4	47	0,615	200	219	293	381	429
1,68	3,7	16	0,652	61	89	141	200	290
1,62	12,7	50	0,713	122	180	240	299	387

Tabla 4.18
Resistencia y rigidez en las muestras de bentonita compactadas a una densidad seca de 1,63 g/cm³

Grado de saturación	Resistencia a compresión (MPa) Con junta	Resistencia a compresión (MPa) Sin junta	Módulo de Young (MPa), $\varepsilon = 0,5\%$ Sin junta
0,15	0,82	0,49	78
0,45	2,19	2,18	377
0,45	2,68	2,23	436
0,85	4,43	4,76	601

de la resistencia a compresión simple y del módulo de Young.

4.4.2 Ensayos hidráulicos

Conductividad hidráulica saturada

Se ha determinado en 6 muestras sin mezclar (muestras F), siguiendo el Procedimiento 70-IMA-

G-0-14 [70]. Se compactaron 6 probetas a densidad seca nominal de 1,60 g/cm³ y otras 6 a 1,70, todas ellas con la humedad que la muestra mantenía almacenada en sacos de plástico cerrados. La arcilla se compactó uniaxialmente en anillos cilíndricos de acero inoxidable. Las probetas, de 5,0 cm de diámetro y 2,5 de altura, se intercalan entre piedras porosas. Posteriormente se inyecta agua en la parte superior e inferior con una presión de

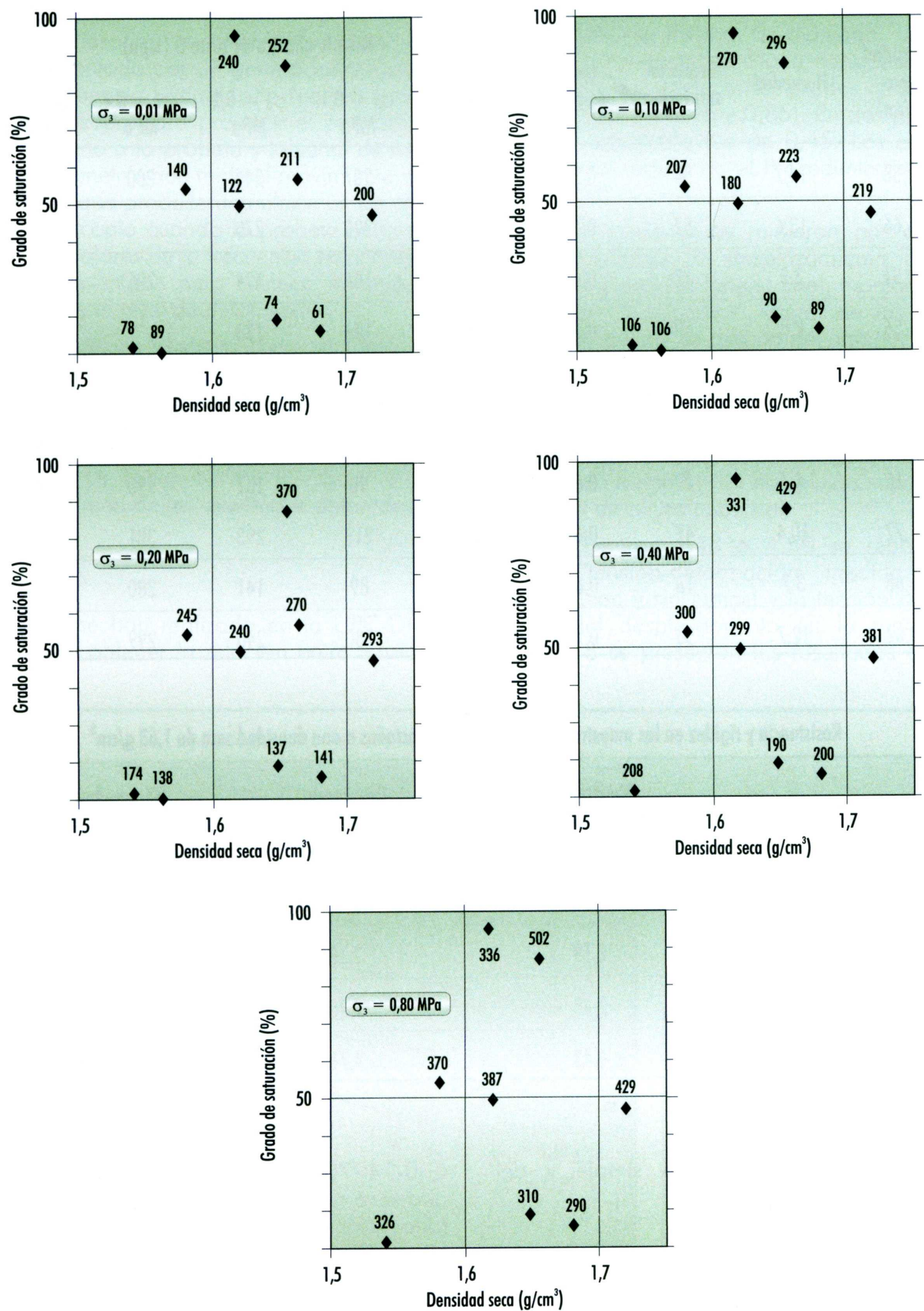


Figura 4.47: Módulo de corte a pequeñas deformaciones tangenciales para varios grados de saturación y densidades secas.

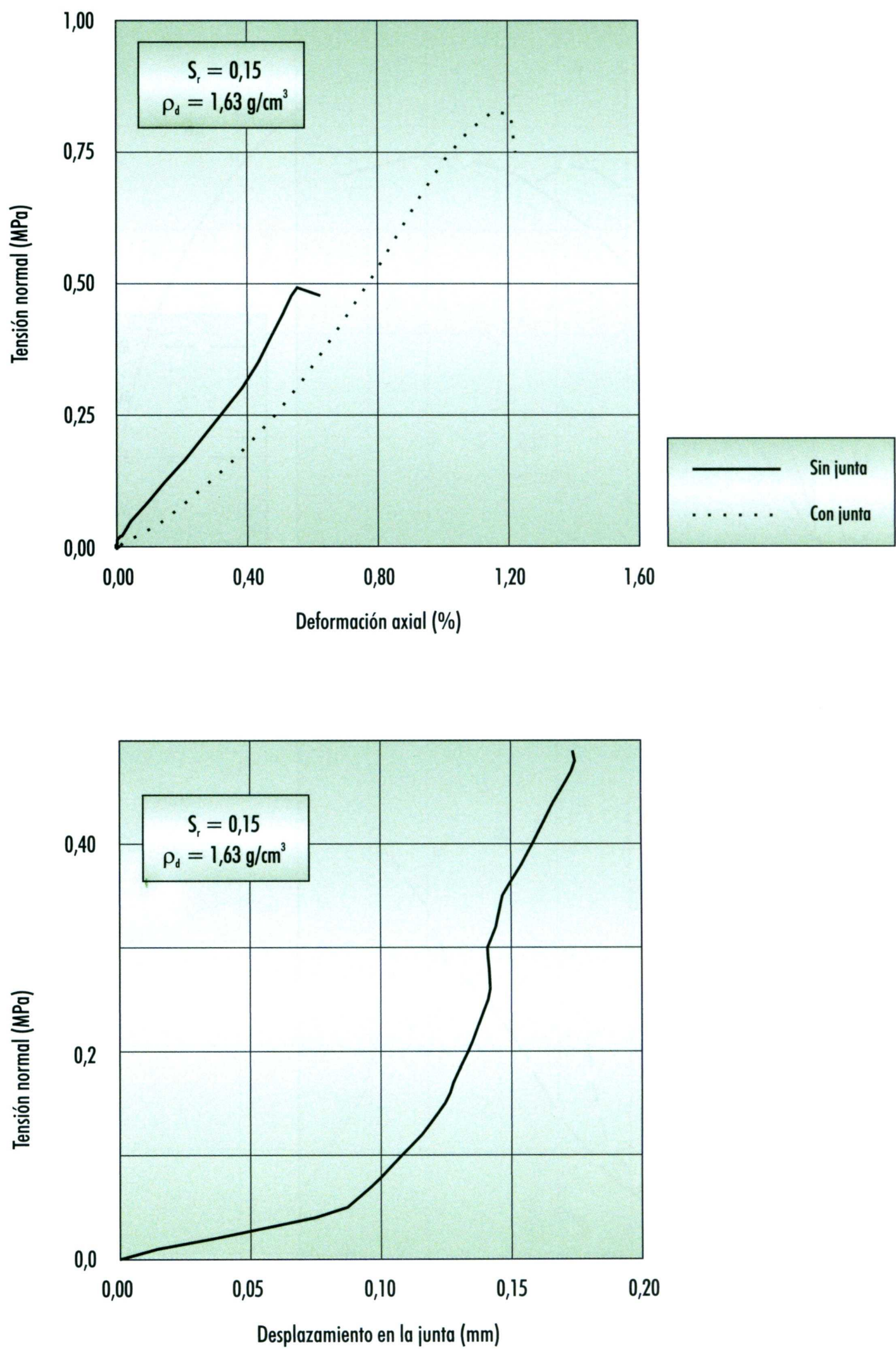


Figura 4.48: Relación entre la carga normal-desplazamiento en una muestra de bentonita compactada a un grado de saturación de 0,15.

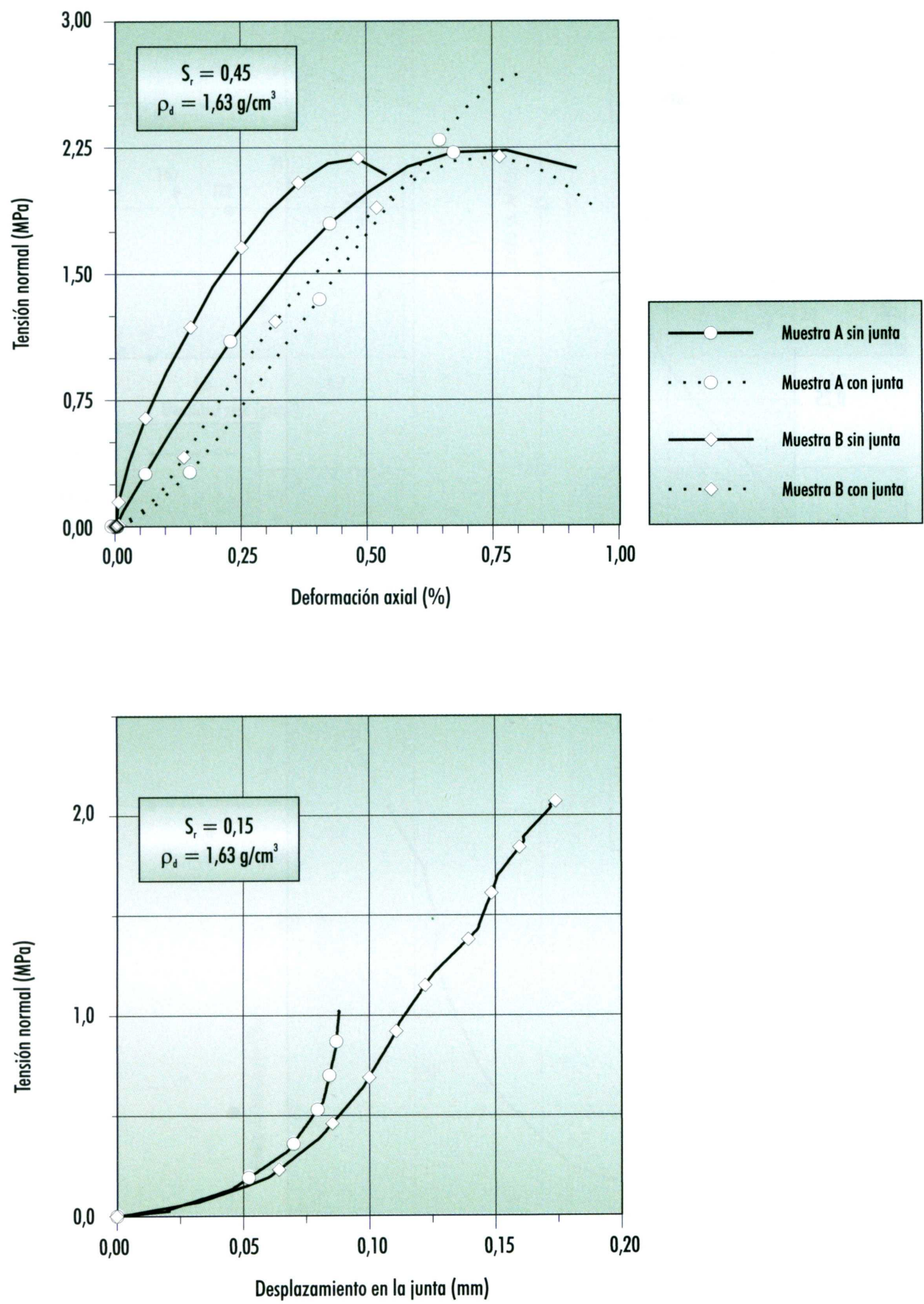


Figura 4.49: Relación entre la carga normal-desplazamiento en una muestra de bentonita compactada a un grado de saturación de 0,45.

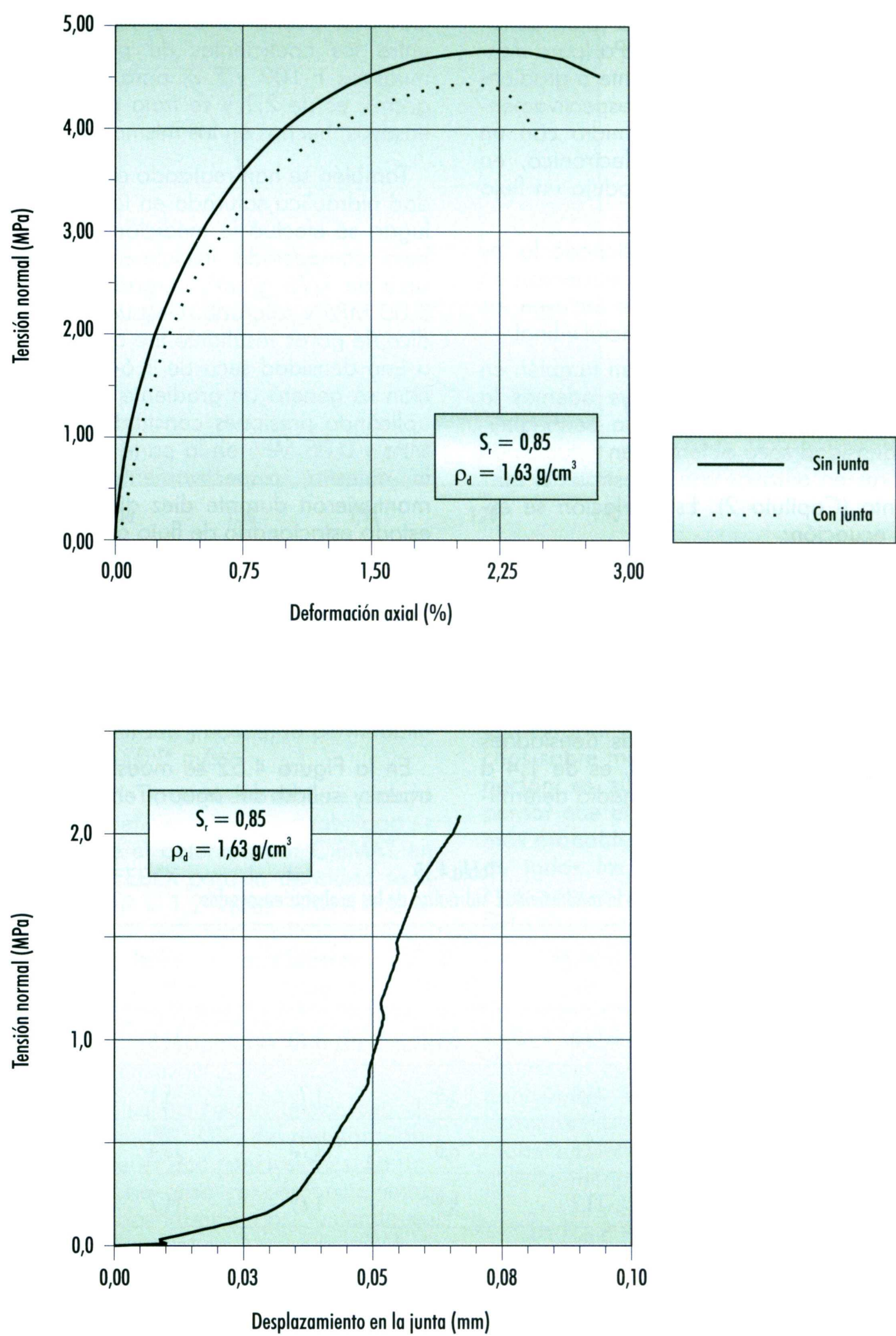


Figura 4.50: Relación entre la carga normal-desplazamiento en una muestra de bentonita compactada a un grado de saturación de 0,85.

0,6 MPa. Después de saturadas las probetas, se aplicó un gradiente hidráulico: la presión se incrementó en la parte inferior a 5,2 MPa (para densidad seca de 1,60 g/cm³) y a 7,2 MPa (para densidad seca de 1,70 g/cm³), equivalente a gradientes hidráulicos de 18400 y 25600, respectivamente. El flujo de agua resultante se midió con un aparato de cambio de volumen electrónico, en función del tiempo, hasta que se produjo un flujo estacionario.

La permeabilidad *k* se calculó aplicando la ley de Darcy y los valores obtenidos se presentan en la Tabla 4.19, en la que además se incluyen las densidades secas y las humedades inicial y final.

Los valores obtenidos se representan también en la Figura 4.51, en la que se incluye además la gráfica experimental que relaciona la permeabilidad con la densidad seca obtenida en estudios de años anteriores en ensayos con muestras del mismo yacimiento (Capítulo 2). Esta relación se expresa por la ecuación:

$$\text{Log } k = -2,97 \rho_d - 8,29 \quad (r^2=0,80),$$

para ρ_d entre 1,4 y 1,9 g/cm³

donde *k* es el coeficiente de permeabilidad en m/s y ρ_d la densidad seca en g/cm³.

El coeficiente de permeabilidad obtenido mediante la ecuación anterior, para las densidades secas medias de los ensayos FEBEX, es de 1,4 a 1,5 veces mayor que el coeficiente medio determi-

nado en estos ensayos; sin embargo, esta diferencia es muy pequeña en ensayos de permeabilidad. Como se puede ver en la Tabla 4.19, la relación entre los coeficientes de permeabilidad de las muestras F-109 y F-2, para densidad seca 1,59 g/cm³, es de 2,1 y se trata de la misma serie de ensayos, hechos en las mismas fechas.

También se han realizado ensayos de conductividad hidráulica saturada en la UPC-DIT. En primer lugar, se efectuó la medición directa en una probeta compactada inicialmente a una densidad seca de 1,75 g/cm³, cargada en un edómetro a 5,00 MPa y saturada. Después de saturada, el índice de poros resultante fue de 0,65, que equivale a una densidad seca de 1,64 g/cm³. A continuación se generó un gradiente de presión de agua, aplicando presiones constantes de agua de 0,50 MPa y 0,05 MPa en la parte inferior y superior de la muestra, respectivamente. Las presiones se mantuvieron durante diez días para conseguir el estado estacionario de flujo a través de la probeta. Durante este período se midieron los caudales de entrada y salida. Las presiones y volúmenes de agua se midieron con dos controladores GDS. El hinchamiento total de la probeta durante el ensayo de permeabilidad fue menor de 10 μm. La metodología utilizada se describe en el Procedimiento 70-UPC-G-0-05 [71].

En la Figura 4.52 se muestran los flujos de entrada y salida del agua. Teniendo en cuenta los

Tabla 4.19
Valores de la conductividad hidráulica de las probetas ensayadas

Referencia muestra	Densidad seca g/cm³	w inicial %	k 10 ⁻¹⁴ m/s	Densidad seca g/cm³	w inicial %	k 10 ⁻¹⁴ m/s
F-2	1,59	14,8	3,1	1,70	14,8	3,8
F-18	1,60	15,0	5,9	1,70	15,1	2,9
F-37	1,60	13,3	6,0	1,70	13,4	3,8
F-75	1,61	11,7	5,9	1,69	11,7	3,2
F-109	1,59	12,5	6,4	1,70	11,9	4,1
F-119	1,58	14,0	8,3	1,67	14,5	3,7
MEDIA	1,60	13,5	5,9	1,69	13,6	3,6
DESV. EST.	0,01	1,3	1,7	0,01	1,5	0,4

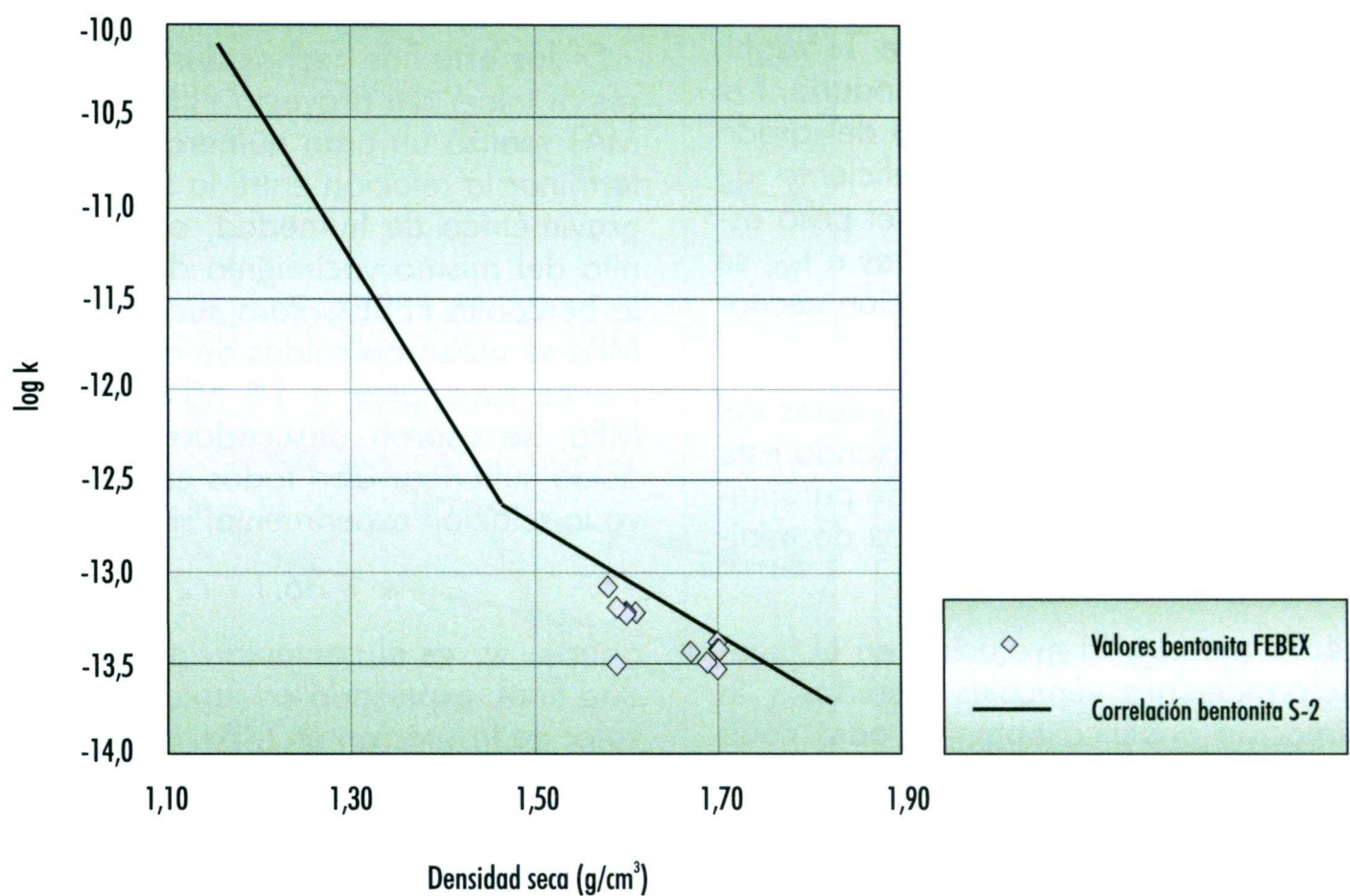


Figura 4.51: Valores de conductividad hidráulica de las probetas ensayadas y líneas de regresión previamente obtenidas para la bentonita S-2.

flujos promedio de entrada y salida, la permeabilidad resultante es $6,9 \cdot 10^{-14}$ m/s.

La densidad seca de la probeta de este ensayo es $1,64 \text{ g/cm}^3$ y el coeficiente de permeabilidad es 1,9 veces mayor que el obtenido por CIEMAT en la serie de ensayos FEBEX para la densidad seca media de $1,69 \text{ g/cm}^3$ y 1,2 veces mayor que el obtenido para la densidad seca media de $1,60 \text{ g/cm}^3$. Si se aplica la ecuación obtenida por CIEMAT, para la arcilla S-2 el coeficiente de permeabilidad calculado para densidad seca $1,64 \text{ g/cm}^3$ es $6,9 \cdot 10^{-14}$ m/s, que es justamente el mismo que el determinado en el ensayo.

Aunque solamente se ha hecho un ensayo de medición directa en la UPC-DIT, del resultado obtenido se pueden obtener dos conclusiones. La primera es que existe una gran concordancia entre los resultados de ambos laboratorios, teniendo en cuenta que desviaciones incluso por un factor de 5 son normales en ensayos de permeabilidad hechos sobre el mismo material en un mismo laboratorio; esta gran concordancia es una prueba de la fiabilidad de los resultados. La segunda conclusión es que, aunque el coeficiente de permeabilidad de las probetas ensayadas en CIEMAT sobre la bentonita FEBEX muestra una tendencia a ser ligeramen-

te inferior al valor medio de ensayos anteriores hechos sobre muestras del mismo yacimiento, su variación es suficientemente pequeña como para pensar que el coeficiente medio de permeabilidad más probable está determinado por la integración de todos los resultados obtenidos hasta ahora. Esto parece confirmado por el ensayo de UPC-DIT.

En la UPC-DIT se ha determinado también el coeficiente de permeabilidad por medio de ensayos edométricos en las mismas probetas en que se habían realizado previamente los ensayos de hinchamiento bajo carga, al final del proceso de saturación por inundación. Con el fin de calcular la permeabilidad saturada se ha utilizado el siguiente modelo analítico para evaluar la relación deformación-tiempo.

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

Donde δ es el asentamiento de la probeta, δ_0 el asentamiento instantáneo debido a la compresión elástica del aparato y del apoyo de la probeta, $\Delta\sigma$

el incremento de carga, $2H$ la altura de la probeta, E_m el módulo confinado, $U(t, c_v, H)$ el grado de consolidación derivado de la teoría de Terzaghi, C_α el coeficiente de consolidación secundaria, t el tiempo, t_{90} el tiempo asociado al 90% del grado de consolidación primaria, c_v el coeficiente de consolidación, k la permeabilidad y γ_w el peso específico del agua. Para tiempos inferiores a t_{90} , se ha supuesto despreciable la consolidación secundaria.

Minimizando las diferencias entre los valores del asentamiento —medidos y calculados usando este modelo—, se puede obtener una serie de parámetros del modelo por medio de la técnica de mínimos cuadrados.

La Figura 4.53 muestra la evolución en el tiempo de las deformaciones verticales medidas y la mejor aproximación analítica obtenida para cada ensayo. En la Tabla 4.20 se consignan los datos de los ensayos edométricos y los parámetros que se han obtenido siguiendo la técnica descrita.

La Figura 4.54 muestra el coeficiente de permeabilidad en función de la densidad seca obtenido en los ensayos edométricos convencionales y en la medición directa.

Relación succión/humedad

En los estudios hechos durante los años anteriores al inicio del proyecto FEBEX (Capítulo 2), CIEMAT realizó un gran número de ensayos para determinar la relación entre la succión y el contenido gravimétrico de humedad, en muestras de bentonita del mismo yacimiento del que se ha extraído la bentonita FEBEX. Para succiones inferiores a 14 MPa se utilizaron celdas de membrana y para succiones superiores a 13 MPa e inferiores a 400 MPa, se usaron desecadores con soluciones de ácido sulfúrico. Con todos estos ensayos, se obtuvo la relación experimental siguiente:

$$w = 36,1 - 12,0 \log s$$

donde w es el contenido gravimétrico de humedad final, expresado en tanto por ciento, y s es el valor de la succión en MPa.

Se comprobó que esta relación es independiente de la humedad y de la densidad seca iniciales, así como del tamaño máximo de grano de la bentonita, para granulometrías inferiores a 5 y 2 mm.

Con el objeto de comprobar si esta relación se cumplía para la bentonita FEBEX, CIEMAT realizó otra serie de ensayos con muestras F y A y otras

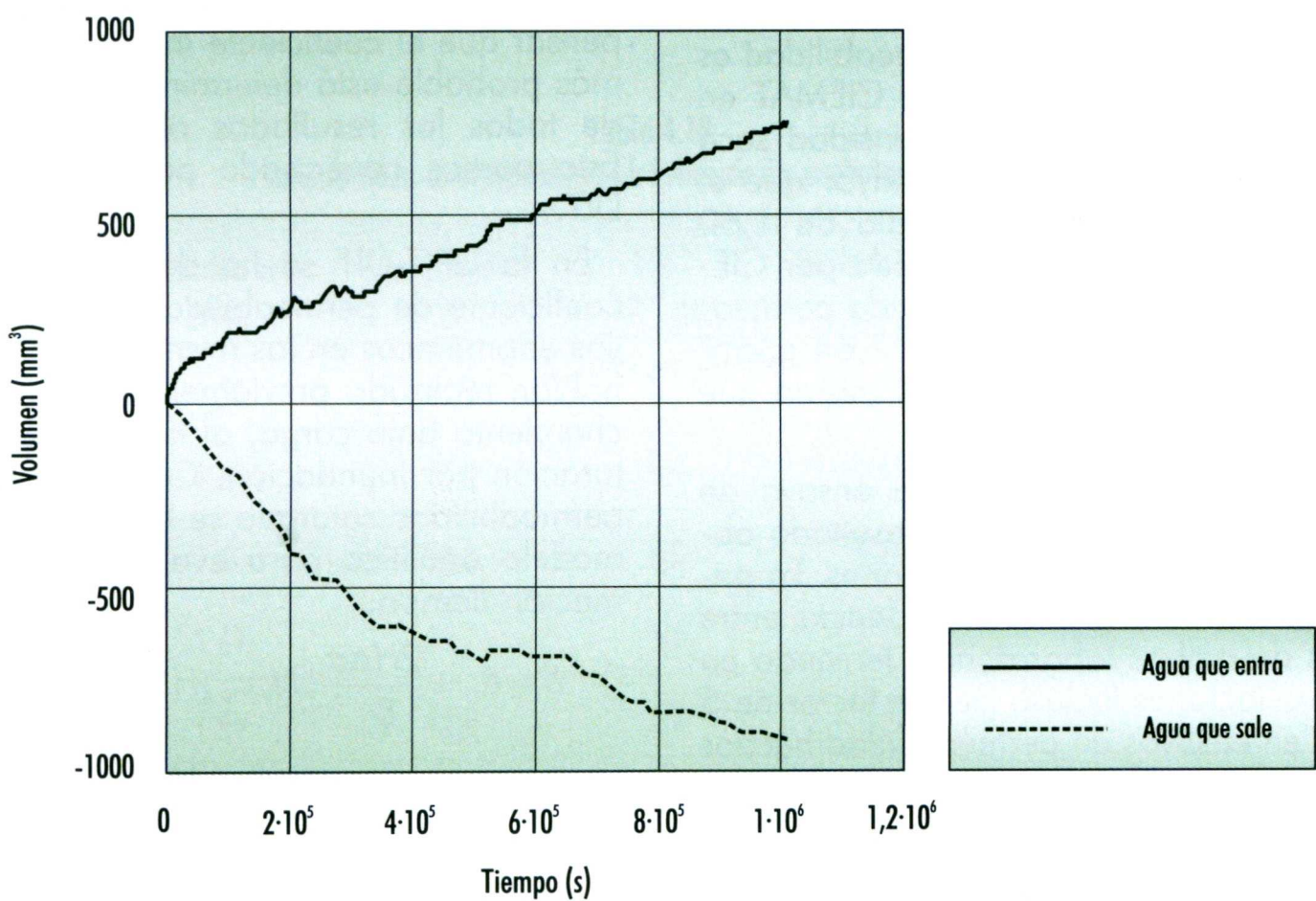


Figura 4.52: Evolución de los flujos de agua durante el ensayo de permeabilidad.

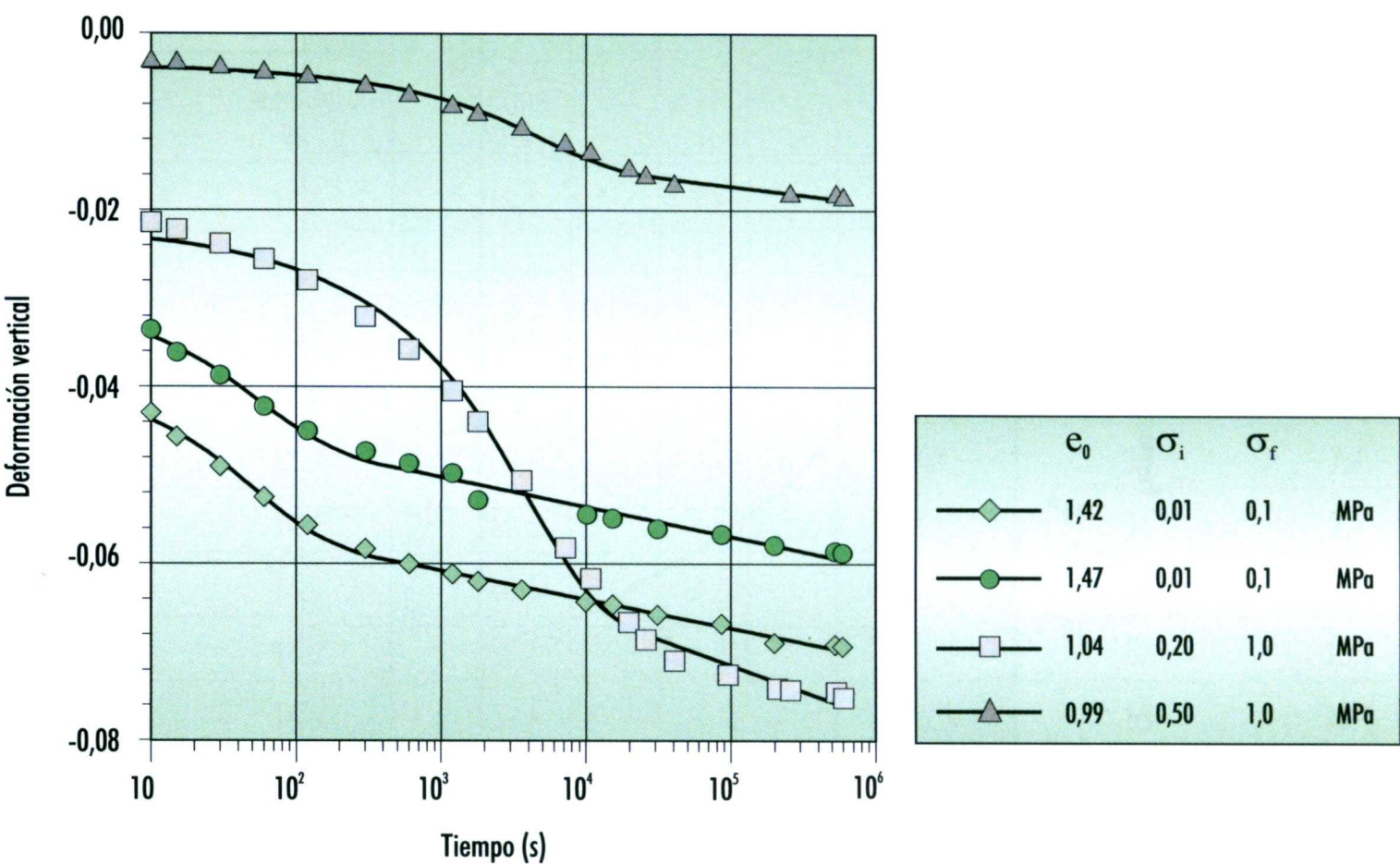


Figura 4.53: Evolución en el tiempo de las deformaciones verticales en los ensayos edométricos.

tomadas arbitrariamente de la muestra homogénea 70-IMA-3-4-0. Los ensayos han sido hechos en desecadores de ácido sulfúrico, siguiendo el Procedimiento 70-IMA-G-0-19 [72]. Se han aplicado succiones nominales de 260, 140 y 14 MPa, en probetas cilíndricas de 1,5 cm de diámetro y 1,2 cm de altura, compactadas a 1,60 g/cm³ de densidad seca nominal, con la humedad que la

muestra mantenía almacenada en sacos de plástico cerrados (Tabla 4.1). La succión de 140 MPa es la correspondiente aproximadamente a la humedad de equilibrio de las muestras almacenadas en el laboratorio.

Se ha determinado para cada probeta la humedad inicial y final, el valor de la succión, la densi-

Tabla 4.20
Ensayos edométricos

ρ_d g/cm ³	e_i	σ_i MPa	σ_f MPa	c_v 10 ⁻³ cm ² /s	E_m MPa	k m/s	C_α 10 ⁻³	δ_0 μm	ε μm
1,15	1,417	0,01	0,1	4,39	4,42	9,9·10 ⁻¹⁰	3,26	597	6,6
1,12	1,473	0,01	0,1	4,47	4,90	9,12·10 ⁻¹⁰	3,37	446	12,0
1,36	1,036	0,2	1,0	0,0415	18,27	2,27·10 ⁻¹²	6,00	273	15,4
1,39	0,999	0,5	1,0	0,0320	42,46	7,53·10 ⁻¹³	1,99	43	5,5

ρ_d = la densidad seca inicial; e_i = índice de poros inicial; σ_i = carga inicial; σ_f = carga final; c_v = coeficiente de consolidación; E_m = módulo confinado; k = permeabilidad; C_α = coeficiente de consolidación secundaria; δ_0 = asentamiento instantáneo debido a la compresión elástica del aparato y del apoyo de la probeta; ε_γ = diferencia media entre los valores medidos y la aproximación analítica.

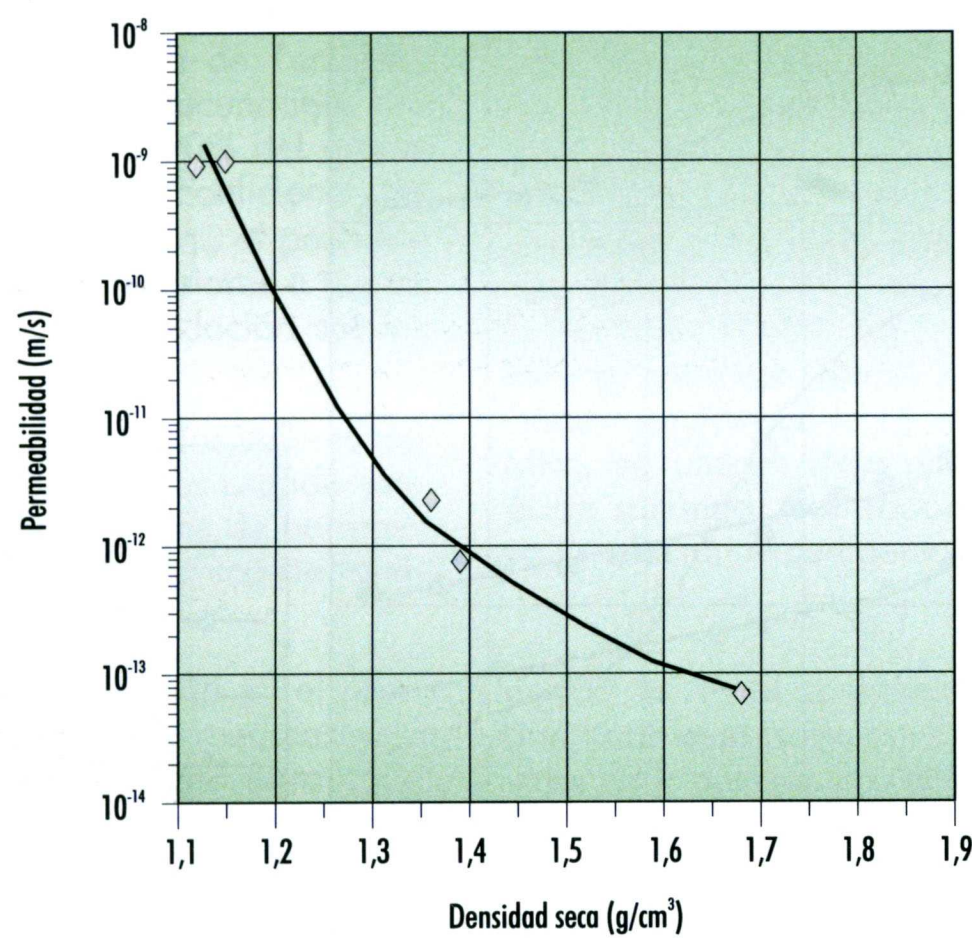


Figura 4.54: Relación entre la permeabilidad saturada obtenida mediante ensayos edométricos y la densidad seca.

dad seca final y el grado de saturación. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 4.21. Cada determinación se ha hecho por duplicado (es decir, se han ensayado dos probetas) y los resultados indicados en la tabla para cada muestra son el valor medio de las dos probetas mencionadas. En la última columna de la tabla se presenta también el valor de la humedad calculado para cada succión, utilizando la ecuación anterior. En la Figura 4.55 se muestra la gráfica de la ecuación anterior y los resultados de los ensayos con la bentonita FEBEX.

Como se puede observar, tanto en los datos de la tabla como en la figura, para succiones bajas la humedad de los ensayos actuales coincide prácticamente con la de la relación empírica de la bentonita S-2, mientras que es del 10% al 15% superior para las succiones altas.

La UPC-DIT ha realizado también este tipo de ensayo, siguiendo el Procedimiento 70-UPC-G-0-03 [73]. Las probetas ensayadas eran cilíndricas, de 1,5 cm de diámetro y 1,2 cm de altura, compactadas a densidades secas nominales iniciales de 1,53 , 1,63 y 1,73 g/cm³.

Las probetas se ensayaron en cámaras herméticas a una temperatura especificada (27° y 72°C y

en algún caso, adicionalmente, a 40° y 57°C) y sometidas a una humedad relativa del aire controlada por medio de soluciones de ácido sulfúrico y cloruro de sodio a diferentes concentraciones. No se determinó la densidad seca correspondiente a cada succión, con el objeto de evitar la alteración de la muestra.

En la Figura 4.56 se muestran las curvas succión/humedad, con indicación de la densidad seca inicial y la temperatura del ensayo. En la Figura 4.57 se muestra el conjunto de todos los resultados para las diferentes densidades y succiones. Los efectos de la densidad inicial y de la temperatura son muy pequeños, de tal forma que no es posible cuantificar y separar estos efectos en la curva succión/humedad.

Con todos los datos obtenidos, para humedad inferior al 20%, la relación succión/humedad puede ser expresada por la ecuación siguiente:

$$w = 40,7 - 14,3 \log s$$

donde w es el contenido gravimétrico de humedad final, expresado en tanto por ciento, y s es la succión en MPa.

Las ecuaciones experimentales de ambos laboratorios son muy similares y de hecho la humedad

Tabla 4.21
Relación succión / humedad

Referencia muestra	w inicial %	Succión MPa	ρ_d final g/cm ³	w final %	S _r final %	w (*) %
F-2	14,8	255,5	1,65	9,0	39	7,8
F-17	16,0	255,5	1,61	9,0	36	7,8
F-37	13,3	255,5	1,63	9,1	38	7,8
F-59	12,7	255,5	1,63	9,2	38	7,8
F-75	11,7	260,6	1,62	8,3	34	7,7
A-1	14,4	260,6	1,65	8,4	36	7,7
A-5	14,5	260,6	1,65	8,3	35	7,7
F-2	14,8	138,6	1,61	13,2	52	10,9
F-17	16,0	138,6	1,62	13,3	55	10,9
F-37	13,3	138,6	1,60	13,0	51	10,9
F-59	12,7	138,6	1,60	12,8	49	10,9
F-75	11,7	144,1	1,60	10,9	43	10,8
F-109	11,9	143,3	1,62	11,1	45	10,8
F-119	12,3	143,3	1,63	11,5	47	10,8
A-1	14,4	144,1	1,63	11,7	48	10,8
A-5	14,5	144,1	1,62	11,6	48	10,8
70-IMA-3-4-0	13,1	143,3	1,62	11,5	47	10,8
F-109	11,9	126,6	1,60	12,1	48	11,4
F-119	12,3	126,6	1,59	12,7	49	11,4
70-IMA-3-4-0	13,1	126,6	1,60	12,3	48	11,4
F-2	14,8	14,5	1,39	22,7	65	22,5
F-17	16,0	14,5	1,43	22,6	69	22,5
F-37	13,3	14,5	1,35	22,6	61	22,5
F-59	12,7	14,5	1,36	22,8	62	22,5
F-75	11,7	14,0	1,35	21,9	59	22,6
F-109	11,9	14,9	1,35	21,9	59	22,3
F-119	12,3	14,9	1,35	22,2	60	22,3
A-1	14,4	14,0	1,34	22,4	60	22,6
A-5	14,5	14,0	1,35	22,4	61	22,6
70-IMA-3-4-0	13,1	14,9	1,36	22,0	60	22,3

(*) Según la relación establecida previamente para la bentonita S-2

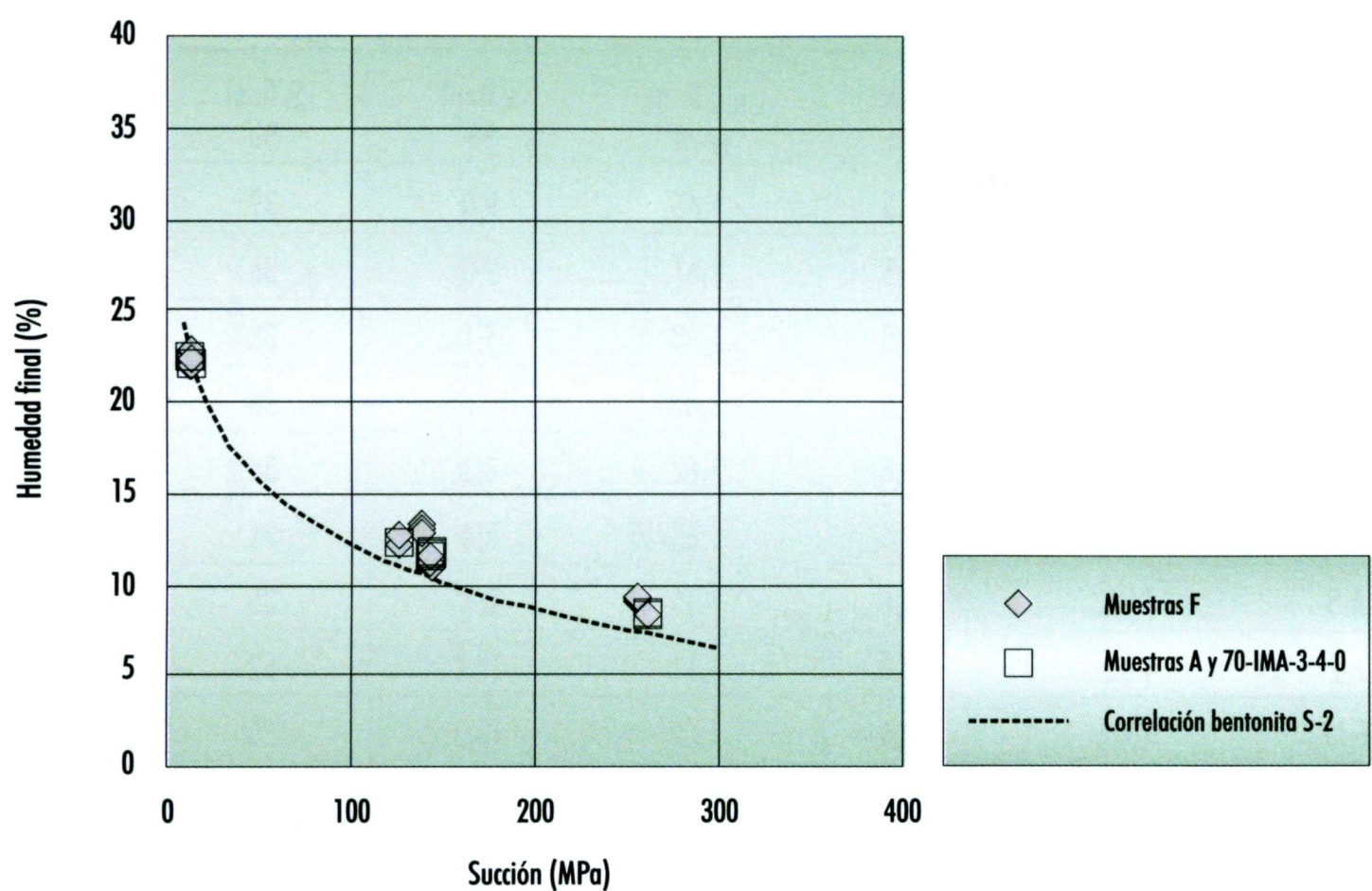


Figura 4.55: Relación succión / humedad.

medida en tanto por ciento difiere solamente en uno o dos puntos, para el intervalo de succiones de los ensayos, que es del mismo orden de magnitud que las dispersiones que se pueden detectar en el mismo laboratorio para series diferentes de ensayos con muestras de la misma bentonita.

4.4.3 Ensayos térmicos

Conductividad térmica

La conductividad térmica superficial se midió con una sonda colocada en la parte superior de probetas de arcilla compactada, tal como se describe en el Procedimiento 70-IMA-G-0-13 [74].

Las probetas fueron compactados uniaxialmente a densidades secas nominales de 1,60 y 1,70 g/cm³ con humedades de alrededor del 14%, que corresponde a un grado de saturación (S_r) en el entorno del 60%, y con humedades en el entorno de 26 y 23% que corresponden a un grado de saturación del 100%, para las densidades secas de 1,60 y 1,70, respectivamente. Las presiones de compactación fueron del orden de 14 MPa para

las densidades secas de 1,60 g/cm³ y entre 22 y 30 MPa para densidades secas de 1,70 g/cm³. La conductividad se midió también en las mismas probetas después de secadas a 100°C durante 24 horas. Las probetas secadas fueron pesadas y medidas para comprobar el cambio de densidad.

Los ensayos se han hecho sobre 37 probetas de 11 muestras sin mezclar (muestras F), y en todos los casos la medida se ha efectuado aplicando la sonda en la superficie de compactación, por lo que el valor obtenido es la conductividad en la dirección paralela al esfuerzo de compactación.

En la Tabla 4.22 se presentan los valores medidos de la conductividad térmica, de la densidad seca, de la humedad y del grado de saturación de cada probeta ensayada.

En la Figura 4.58 se muestran gráficamente los valores de la conductividad térmica (λ , W/mK) en la dirección paralela al esfuerzo de compactación en función de la humedad (w , %). Se ha realizado un ajuste polinómico independiente para cada grupo de valores correspondientes a densidades secas nominales de 1,60 y 1,70 g/cm³. Las ecuaciones obtenidas son las siguientes:

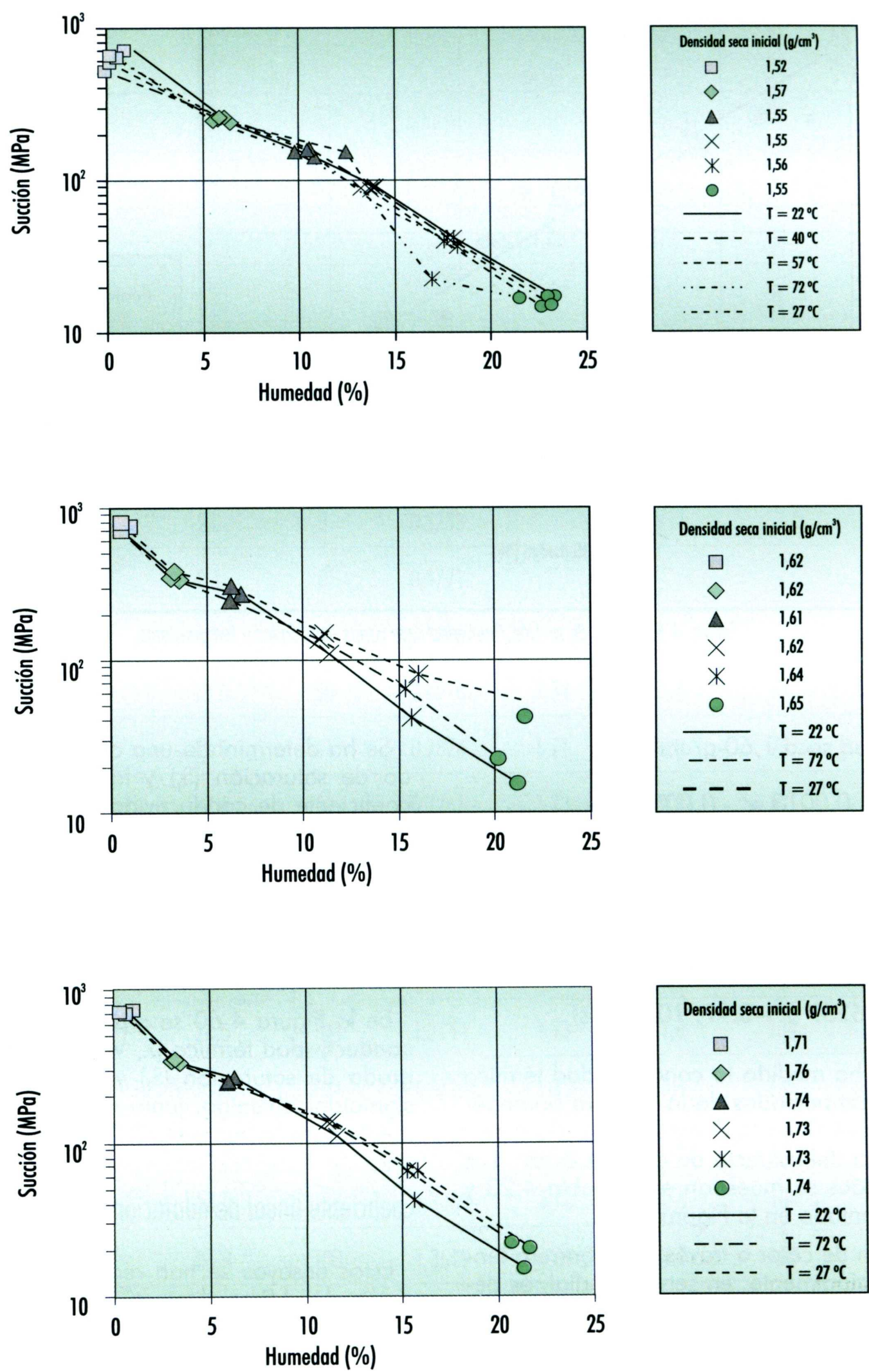


Figura 4.56: Curvas succión/humedad para diferentes densidades y temperaturas.

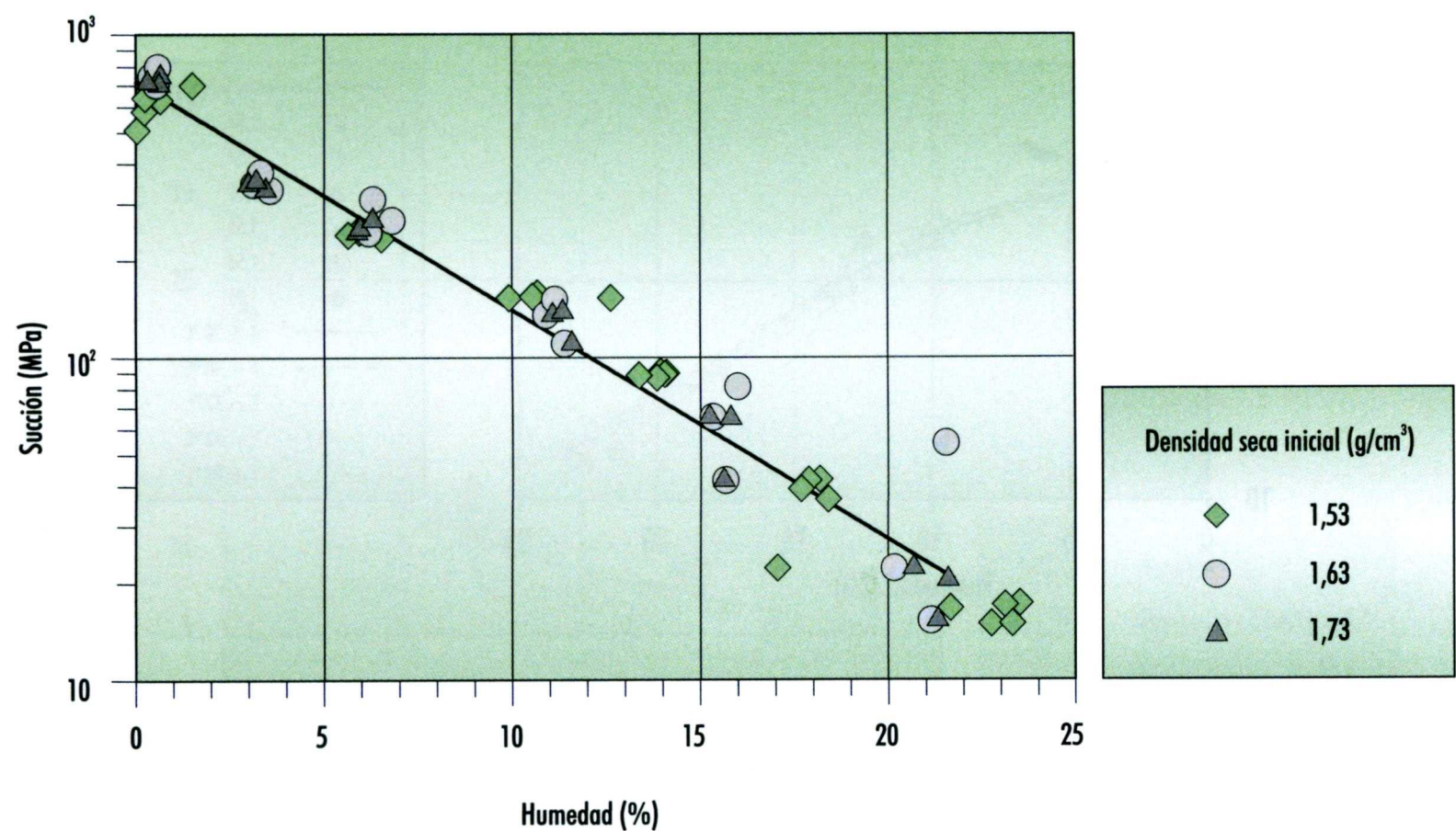


Figura 4.57: Curva de succión/humedad para varias densidades y temperaturas.

Para densidad seca 1,60 g/cm³:

$$\lambda = 0,0013 w^2 - 0,0052 w + 0,5201 \quad (r^2=0,97; 18 \text{ puntos})$$

Para densidad seca 1,70 g/cm³:

$$\lambda = 0,0012 w^2 - 0,0016 w + 0,6237 \quad (r^2=0,97; 10 \text{ puntos})$$

También se ha medido la conductividad térmica en probetas compactadas de la muestra homogénea (70-IMA-3-4-0) en la dirección paralela y perpendicular a la del esfuerzo de compactación. Los valores obtenidos se muestran en la Tabla 4.23 y se han representado en la Figura 4.59.

La disipación de calor a través de la barrera tendrá lugar principalmente, en sentido radial, es decir, perpendicular a la dirección del esfuerzo de compactación de los bloques. No hay variación importante de la conductividad térmica en ambas direcciones, aunque siempre es ligeramente más alta cuando se mide paralelamente a la dirección del esfuerzo de compactación.

Se ha determinado una correlación entre el grado de saturación, (S_r) y los valores medidos del coeficiente de conductividad térmica (λ) en dirección paralela al esfuerzo de compactación, tanto para las muestras F (Tabla 4.22) como para la muestra homogénea 70-IMA-3-4-0 (Tabla 4.23):

$$\lambda = 1,30 - \frac{0,75}{1 + e^{(S_r - 0,67)/0,11}} \quad 39 \text{ puntos}$$

En la Figura 4.60 se representan los valores de conductividad térmica (λ , W/m . K) en función del grado de saturación (S_r) y la curva de regresión sigmoideal obtenida, junto con la obtenida previamente para la bentonita S-2.

Coeficiente lineal de dilatación térmica

Estos ensayos se han realizado en la UPC-DIT, siguiendo el Procedimiento 70-UPC-G-0-11 [75].

Se ensayaron dos probetas cilíndricas de bentonita compactada de 38 mm de diámetro y 78 mm de altura. Las probetas fueron calentadas en un baño de agua con temperatura controlada en el intervalo de 14° a 50°C.

Tabla 4.22
Conductividad térmica (λ) en dirección paralela al esfuerzo de compactación

Referencia muestra	ρ_d g/cm ³	w %	S _r %	λ W/mK	ρ_d g/cm ³	w %	S _r %	λ W/mK
F-18	1,53	1,7	6	0,5013				
F-37	1,55	0,9	3	0,4797				
F-75					1,66	1,9	8	0,6195
F-75					1,67	0,1	0	0,6356
F-75					1,72	0,5	2	0,6293
F-109	1,53	0,1	0	0,4841				
F-18	1,60	1,0	4	0,5473				
F-37	1,60	2,0	8	0,5738				
F-109	1,58	0,1	0	0,4771				
F-119	1,59	1,1	4	0,5763				
F-2	1,59	15,5	60	0,6978	1,74	13,7	67	0,8992
F-18	1,60	15,5	61	0,7824	1,71	15,0	70	0,9402
F-37	1,63	12,6	52	0,7261	1,73	11,9	57	0,8339
F-75	1,60	13,1	51	0,6825	1,72	12,9	61	0,8077
F-102	1,59	15,4	60	0,6995				
F-119	1,60	13,3	52	0,6114	1,70	13,1	60	0,7923
F-2	1,62	26,0	105	1,2754	1,73	21,6	104	1,2183
F-17	1,63	25,3	104	1,2726	1,75	20,4	101	1,2450
F-37	1,62	26,2	106	1,3043	1,72	21,6	102	1,1247
F-59	1,64	25,4	106	1,3069	1,76	20,5	104	1,2342
F-75	1,61	25,8	103	1,3619	1,69	22,7	103	1,2717
F-79	1,61	27,1	108	1,2854	1,71	22,6	103	1,2541
F-102	1,59	27,4	106	1,2613	1,70	21,8	100	1,2709
F-119	1,60	26,6	104	1,2472	1,69	22,3	101	1,2531

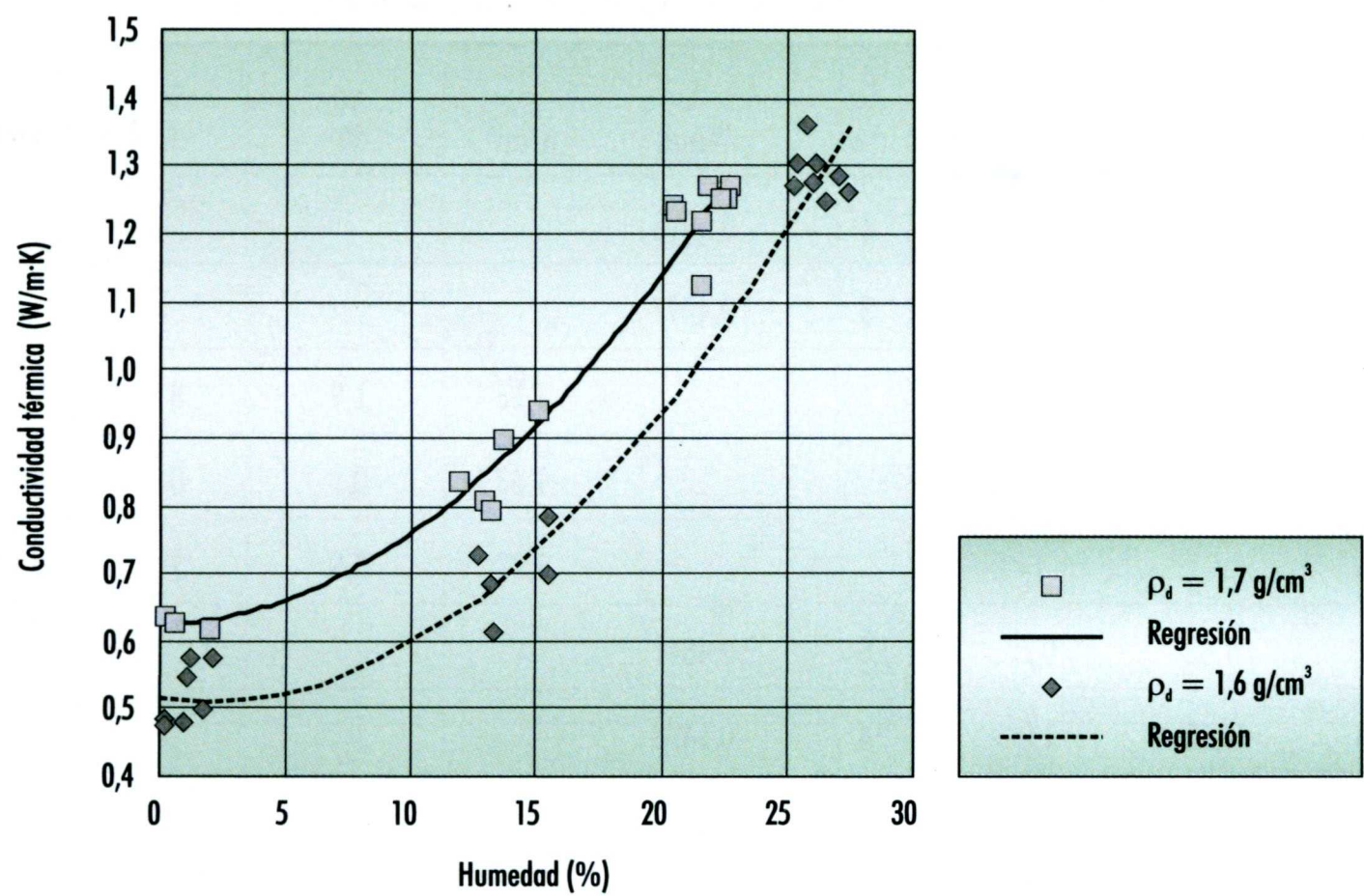


Figura 4.58: Conductividad térmica en función de la humedad, muestras F.

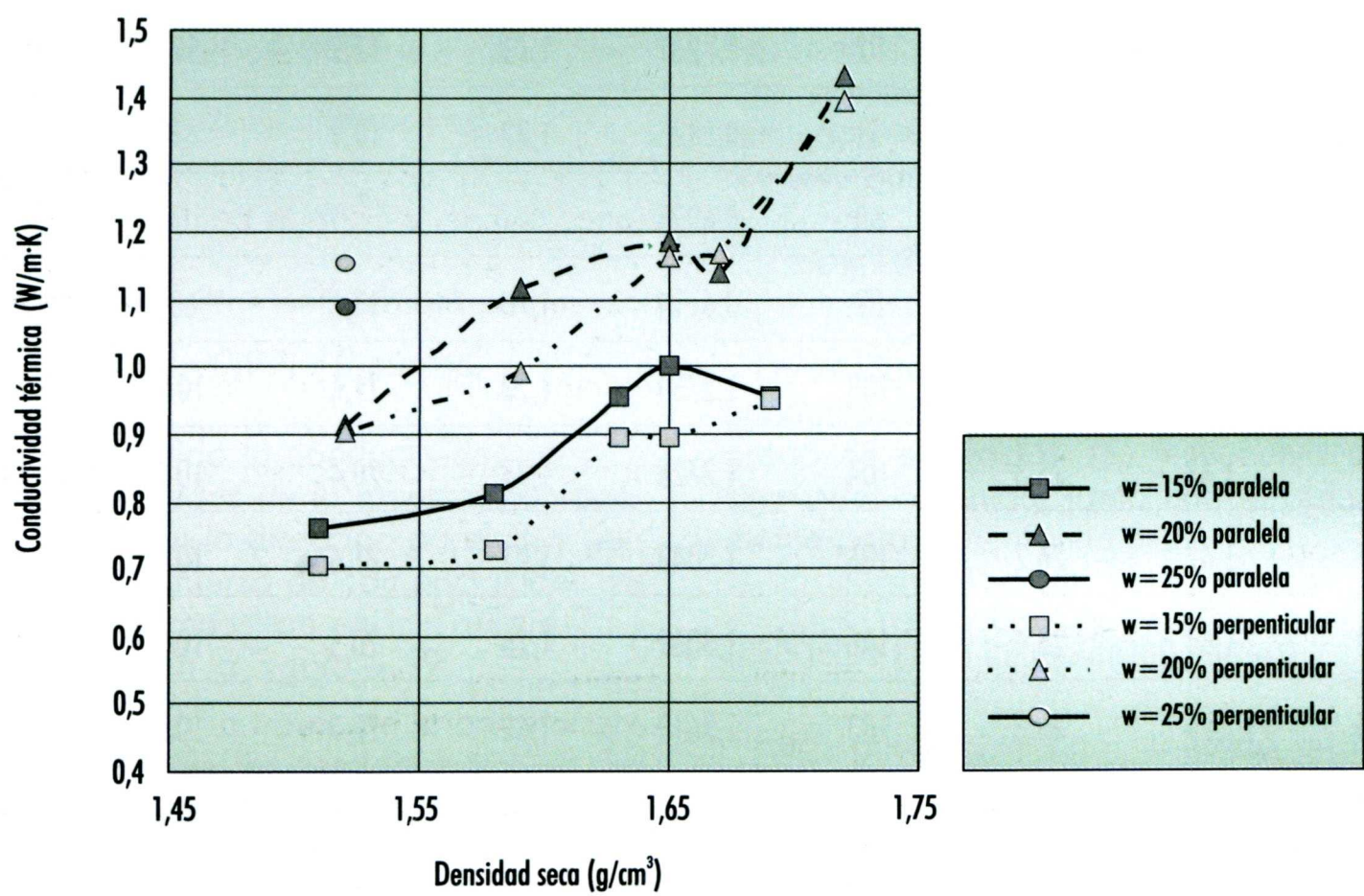


Figura 4.59: Conductividad térmica, medida en dirección paralela y perpendicular al esfuerzo de compactación, para la muestra 70-IMA-3-4-0.

Tabla 4.23
Conductividad térmica, medida en dirección paralela y perpendicular al esfuerzo de compactación,
de probetas compactadas de la muestra 70-IMA-3-4-0

ρ_d g/cm ³	w %	S _r %	λ paralela W/mK	λ perpendicular W/mK
1,51	15	51	0,7621	0,7077
1,58	15	57	0,8114	0,7283
1,63	15	62	0,955	0,8934
1,65	15	64	1,0003	0,894
1,69	15	68	0,9531	0,9525
1,52	20	70	0,9128	0,903
1,59	20	77	1,1187	0,993
1,65	20	85	1,1851	1,1622
1,67	20	88	1,1405	1,1686
1,72	20	95	1,4319	1,3918
1,52	25	87	1,0913	1,1517

En la Tabla 4.24 se indican las características de las probetas y los valores de los coeficientes de dilatación térmica resultantes. En la Figura 4.61 se muestran las deformaciones medidas, una vez alcanzada la estabilidad después de cada cambio de temperatura.

4.5 Capacidad de sorción

Se ha iniciado una serie de experimentos de laboratorio de sorción en “batch” para comprobar el comportamiento de algunos trazadores bajo condiciones similares a las esperadas en los ensayos en “maqueta” e “in situ”. Los trazadores utilizados en esta serie de experimentos son análogos químicos de los radionucleidos que estarán presentes en los residuos radioactivos o formas estables de los mismos [76]. Dependiendo de su comportamiento respecto a la sorción, los trazadores son: conservativos (aquellos que no serán absorbidos en el medio, y son indicadores del movimiento del agua) y no conservativos (que se moverán su-

friendo retención y/o retardo debido a sus propiedades de sorción).

Los experimentos se llevaron a cabo bajo condiciones óxicas, utilizando bentonita molida a un tamaño de grano inferior a 63 μm. Se seleccionaron dos temperaturas diferentes de trabajo (25° y 90°C). El tiempo de contacto se fijó en 7 días, la relación sólido a líquido ha sido 1:10 y la concentración inicial de cada trazador fue 200 μg/l. Se mantuvo agitación constante durante todos los ensayos. Para los ensayos a 25°C, se utilizó un agua subterránea granítica natural procedente de El Berrocal, mientras que para los experimentos a 90°C se escogió otra agua subterránea granítica de composición química natural, pero con un contenido inferior de bromo.

Para los experimentos a 25°C se emplearon tubos de polietileno para contener las muestras, mientras que para llevar a cabo los experimentos a 90°C se utilizaron tubos de vidrio Pyrex herméticamente cerrados. Para el boro, se utilizaron tubos de polietileno sellados con cinta de Teflón para

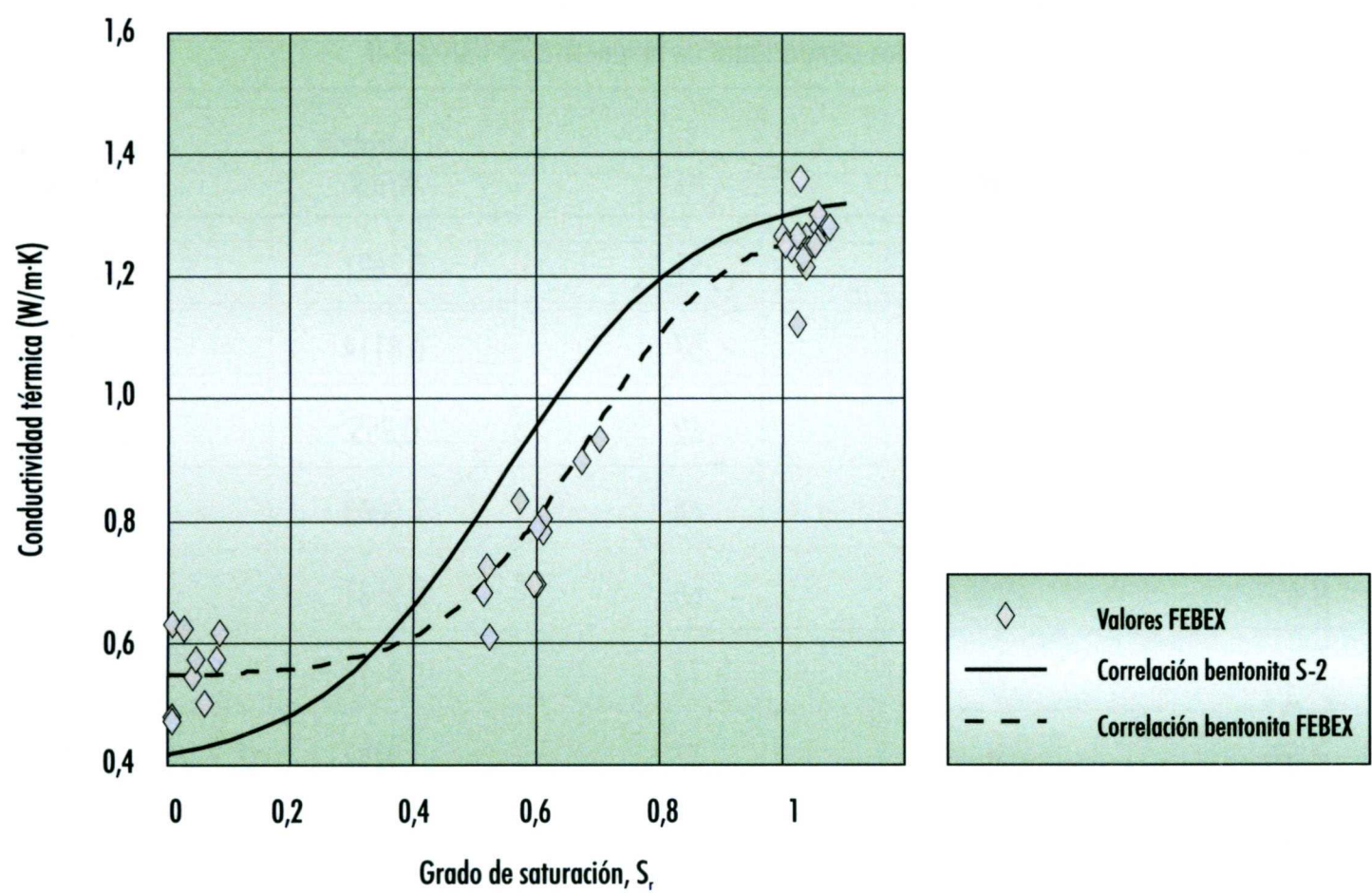


Figura 4.60: Conductividad térmica en función del grado de saturación para las muestras F y 70-IMA-3-4-0 y correlación obtenida previamente para la bentonita S-2.

evitar una posible contaminación de boro procedente del vidrio.

La relación de distribución (R_d , ml/g) de un elemento es la relación entre la concentración del elemento en la fase sólida y la concentración en la fase líquida, para un experimento de una duración dada en que no se ha alcanzado el equilibrio termodinámico. La R_d de cada trazador está dada por:

$$R_d = \frac{C_o - C_f}{C_f} \cdot \frac{V}{M}$$

donde C_o ($\mu\text{g/l}$) es la concentración inicial del trazador en la solución, C_f ($\mu\text{g/l}$) es la concentración final del trazador en la solución, V (ml) es el volumen de la solución empleada y M (g) es la masa de arcilla. Los valores de R_d obtenidos en los experimentos de laboratorio de sorción en “batch” se resumen en la Tabla 4.25.

El yoduro, selenato (VI) y perrenato (VIII) actúan como trazadores no absorbentes (conservativos), mientras los restantes elementos actúan como trazadores reactivos (no conservativos).

4.6 Caracterización microbiológica

Los estudios microbiológicos han comenzado por detectar la presencia de grupos bacterianos y estimar el número de bacterias cuya actividad podría tener incidencia en las propiedades de la arcilla (capacidad tamponadora de pH, capacidad de adsorción, estado de óxido-reducción) o producir directa o indirectamente alguna sustancia corrosiva (por ejemplo SH_2). Los estudios realizados han consistido en [30]:

- Estimar el número de los siguientes grupos de bacterias: aerobias heterótrofas, anaerobias (obligadas y facultativas) heterótrofas, microaerófilas, sulfato reductoras, autótrofas, oxidantes del azufre, autótrofas oxidantes del sulfuro, nitrosantes, nitrantes y oxidantes del Fe (*Leptothrix*, *Thiobacillus ferroxidans*).
- Recuento y estudio morfológico de las distintas colonias bacterianas en medios sólidos específicos.

Tabla 4.24
Ensayos de dilatación térmica

Muestra	Densidad seca inicial g/cm ³	Humedad %	Intervalo de temperatura °C	Coefficiente de dilatación lineal térmica 1/°C
090996a	1,68	14,42	22,6-14,8	5 · 10 ⁻⁵
090996a	1,68	14,42	16,6-41	8 · 10 ⁻⁵
120996e	1,71	12,53	31-51	21 · 10 ⁻⁵
120996e	1,71	12,53	51-41	6 · 10 ⁻⁵

- Estimar la actividad metabólica bacteriana, con [¹⁴C-U]-glucosa, de todos los grupos de bacterias heterotróficas.
- Análisis para determinar la presencia de bacterias hierro reductoras en la arcilla.

los introducidos en el tratamiento previo de la arcilla. Las muestras se almacenan y manipulan en condiciones estériles para no introducir otros microorganismos ajenos a los propios de la arcilla “in situ” y a los introducidos durante la extracción y el tratamiento previo (secado, transporte, etc).

Para revelar la presencia de determinado tipo de bacteria, las muestras de arcilla se pusieron en contacto directo con los diferentes medios de cultivo. Los medios de cultivo empleados, así como el

Tanto la extracción de la muestra en cantera, como su posterior tratamiento (secado y homogeneizado), no se realizó en condiciones de esterilidad; por lo tanto, los microorganismos presentes en la muestra serán una mezcla de los naturales y

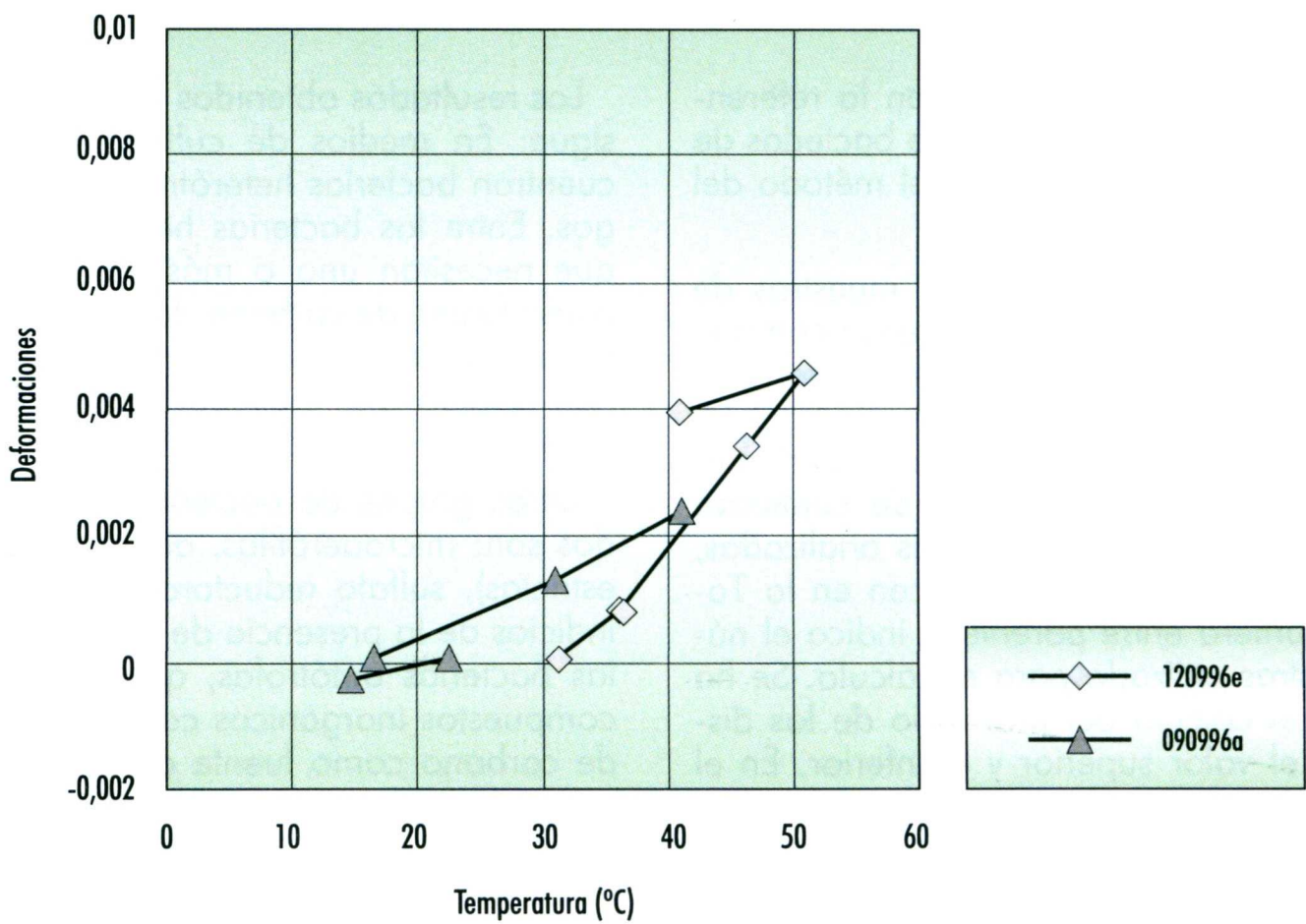


Figura 4.61: Resultados de los ensayos de dilatación térmica.

Tabla 4.25
Resultados de sorción en "batch" y R_d

ELEMENTO	25°C		90°C	
	R_d ml/g	% de sorción	R_d ml/g	% de sorción
I	1,9	16,5	0,2	2
Re	0	0	0	0
Se	0 (a)	0 (a)	0	0
B	22,5	69,3	38,7	79,5
Cs	$\geq 1\ 990$	≥ 99	$\geq 1\ 990$	≥ 99
Sr	90	90	98	91
La	$\geq 1\ 990$	≥ 99	$\geq 1\ 990$	≥ 99
Nd	$\geq 1\ 990$	≥ 99	$\geq 1\ 990$	≥ 99
Eu	$\geq 1\ 990$	≥ 99	$\geq 1\ 990$	≥ 99
Th	$\geq 1\ 990$	≥ 99	$\geq 1\ 990$	≥ 99
U	1,1	9,8	≥ 920	≥ 98

(a) Experimentos realizados usando la misma agua subterránea granítica que en el experimento en "batch" a 90°C.

procedimiento seguido, se detallan en la referencia [30]. La estimación del número de bacterias de los diferentes grupos se realizó por el método del número más probable.

Se han realizado análisis sobre 7 muestras de entre 5 y 58 g. Los resultados se expresan como el número más probable (MPN) de bacterias por gramo de arcilla analizado (con una humedad del 13 %). Calculando la media aritmética de los números más probables y de sus límites de confianza respectivos, en las diferentes muestras analizadas, se obtuvieron los valores que aparecen en la Tabla 4.26. El número entre paréntesis indica el número de muestras utilizado para el cálculo. Se ha excluido para el cálculo del promedio de los distintos grupos, el valor superior y el inferior. En el caso de las bacterias aerobias también se ha estimado su número mediante la técnica de recuento en placa. El límite 95 % corresponde a los límites inferior y superior, con un 95 % de confianza, para los números más probables estimados. El signo (-) indica que no se han detectado bacterias.

Los resultados obtenidos pueden resumirse como sigue: En medios de cultivos específicos se encuentran bacterias heterótrofas y autótrofas y hongos. Entre las bacterias heterótrofas, que son las que necesitan uno o más compuestos orgánicos como fuente de carbono, las que se encuentran en mayor número son las aerobias, entre las que se han podido distinguir bacterias del género *Streptomyces*.

Otros grupos de bacterias heterótrofas detectados son: microaerófilas, anaerobias (facultativas y estrictas), sulfato reductoras y se han encontrado indicios de la presencia de hierro reductoras. Entre las bacterias autótrofas, que son las que utilizan compuestos inorgánicos como nutrientes y dióxido de carbono como fuente de carbono, se han encontrado bacterias oxidantes de azufre y oxidantes del sulfuro. No se encuentran las bacterias autótrofas del ciclo del nitrógeno, nitrantes y nitrosantes. Tampoco se han encontrado *Leptothrix* y *Thiobacillus ferrooxidans*, oxidantes del hierro a pH neutro y ácido, respectivamente.

Tabla 4.26
Recuento de los diferentes grupos de bacterias encontrados en la muestra de bentonita 70-IMA-3-4-0

Tipo de bacteria	MPN
Aerobias Límite 95 %	100 000 (6) 18 000 -363 000
Aerobias (placas)	90 000 (5)
Anaerobias Límite 95 %	1 400 (4) 260 - 5 600
Microaerófilas Límite 95 %	78 200 (5) 12 000 -398 000
Azufre oxidantes Límite 95 %	2 600 (5) 400- 11 000
Sulfuro oxidantes Límite 95 %	28 (4) 2 - 140
Sulfato reductoras Límite 95 %	48 (4) 8 - 200
Nitrantes	- (6)
Nitrosantes	- (6)
<i>T. ferroxidans</i>	- (2)

5

DISEÑO, FABRICACION Y CARACTERISTICAS DE LOS BLOQUES DE BENTONITA

5.1 General

Los bloques para construcción de la barrera de arcilla de la “maqueta” se han fabricado en la empresa Jesús Castro, S.L. (Torrejón de Ardoz, Madrid), bajo la dirección y control de CIEMAT. Los utilizados en la barrera de arcilla del ensayo “in situ” han sido fabricados, bajo la dirección y control de AITEMIN, en la empresa Refracta (Quart de Poblet, Valencia).

5.2 Ensayo en “maqueta”

En el ensayo en “maqueta” —que está siendo realizado en el laboratorio de CIEMAT (Madrid)— se simula la galería de almacenamiento del residuo mediante una estructura confinante, de longitud y diámetro interiores 6,00 y 1,62 m, respectivamente. Dos calentadores de 1,625 m de longitud y 0,340 m de diámetro exterior, separados entre sí 0,75 m y centrados en la estructura confinante, simulan las cápsulas de residuo y su efecto térmico. La barrera de arcilla rellena el espacio entre los calentadores y la estructura de confinamiento y está formada por bloques de bentonita altamente compactada. En las Figuras 5.1, y 5.2 se muestran una sección longitudinal y dos transversales esquemáticas del sistema.

Los pasos seguidos hasta la obtención de los bloques han sido los siguientes: diseño de los bloques; fabricación de los moldes; fabricación de los bloques; embalaje y almacenamiento de los bloques. Todas estas actividades se describen en detalle en el Informe Técnico 70-IMA-L-3-29 *Fabricación de bloques para el ensayo en maqueta del Proyecto FEBEX* [77].

5.2.1 Diseño de los bloques

El diseño de los bloques ha consistido en definir su geometría, sus propiedades físicas (densidad seca y humedad) y la cantidad necesaria para construir la barrera.

La geometría de los bloques se ha definido atendiendo al criterio de reducir al mínimo el volumen de huecos de la barrera de arcilla, así como reducir el número de bloques a fabricar y evitar superficies de compactación superiores a 0,1 m² (a causa de la limitación de la fuerza de la prensa). Por ello se optó por una disposición en dos coronas concéntricas y un núcleo interior en las zonas fuera de los calentadores (Figura 5.2). Esta disposición

se ha conseguido con cuatro tipos de bloques llamados A, B, C y E, cuyos esquemas se representan en las Figura 5.3.

Los bloques A y B se fabricaron directamente por compactación de la bentonita en los moldes apropiados. Los bloques C se obtuvieron mecanizando los B para formar la cara interior plana (Figura 5.3). Después de fabricados los bloques B, se modificó su molde eliminando las orejetas, con el que se fabrican unos bloques auxiliares, de los que se obtuvieron por mecanización los bloques E, de forma semihexagonal.

La corona externa está formada por 12 bloques A y la interna, en las zonas de calentador, por 6 bloques B y por 6 bloques C en las zonas sin calentador; el núcleo interior de las zonas sin calentador se rellena con 2 bloques E (Figura 5.2).

Definidas las dimensiones de los bloques en sección transversal de la barrera de arcilla, su espesor quedaba determinado por la condición de que su peso máximo fuese de unos 25 kg, para su fácil manejo manual. Las dimensiones nominales de los bloques se presentan en la Tabla 5.1.

Teniendo en cuenta que la longitud interior de la estructura de confinamiento es de 6,00 m y el espesor de los bloques de 0,125 m, la barrera de arcilla está formada por 48 rebanadas, de las cuales 26 están en zona de calentador. Son necesarios 576 bloques A, 156 B, 132 C y 44 E: un total de 908 bloques. Se consideró conveniente fabricar 1.000, un 10% más de los teóricamente necesarios, para suplir las pérdidas que por rotura se podrían producir durante el transporte e instalación.

La densidad seca media nominal de la barrera de arcilla debía ser, como máximo, igual a la del concepto de referencia (1,65 g/cm³), que corresponde a una presión de hinchamiento del orden de 6,0 MPa, de acuerdo con los ensayos de caracterización que se habían realizado con anterioridad al proyecto FEBEX. La barrera de arcilla construida con bloques tiene inicialmente huecos entre los bloques y entre bloques, calentadores y estructura de confinamiento; se estimó que el volumen total de estos huecos podría estar comprendido entre el 6% y el 10% del volumen a rellenar, por lo que se decidió fabricar los bloques con una densidad seca nominal de 1,75 g/cm³.

En los trabajos anteriores al FEBEX (Capítulo 2) se determinó que la humedad óptima de compactación está en torno al 14% y que con la compactación uniaxial se consiguen los mejores resultados en cuanto a relación presión/densidad obtenida.

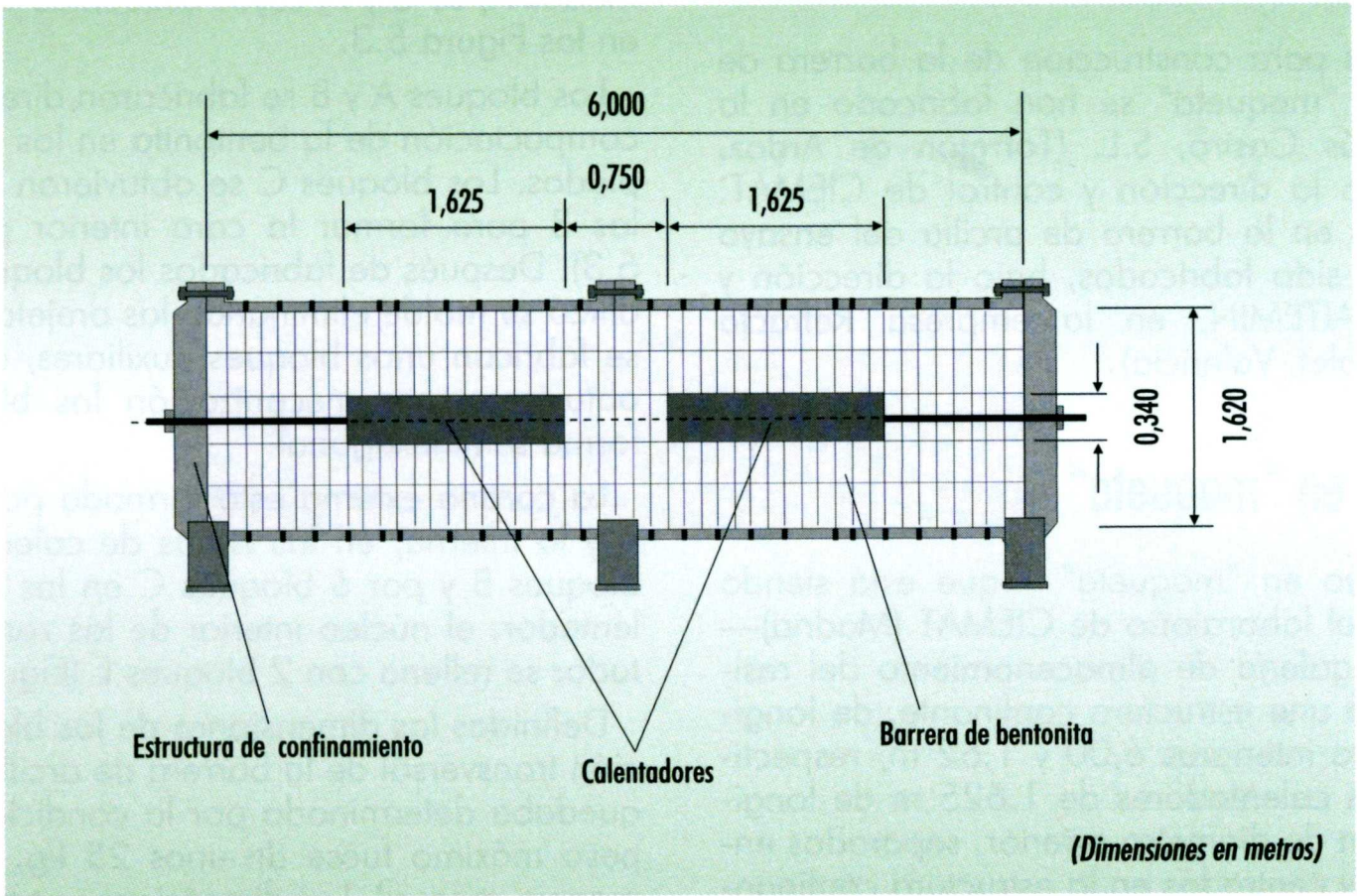


Figura 5.1: "Maqueta": sección longitudinal..

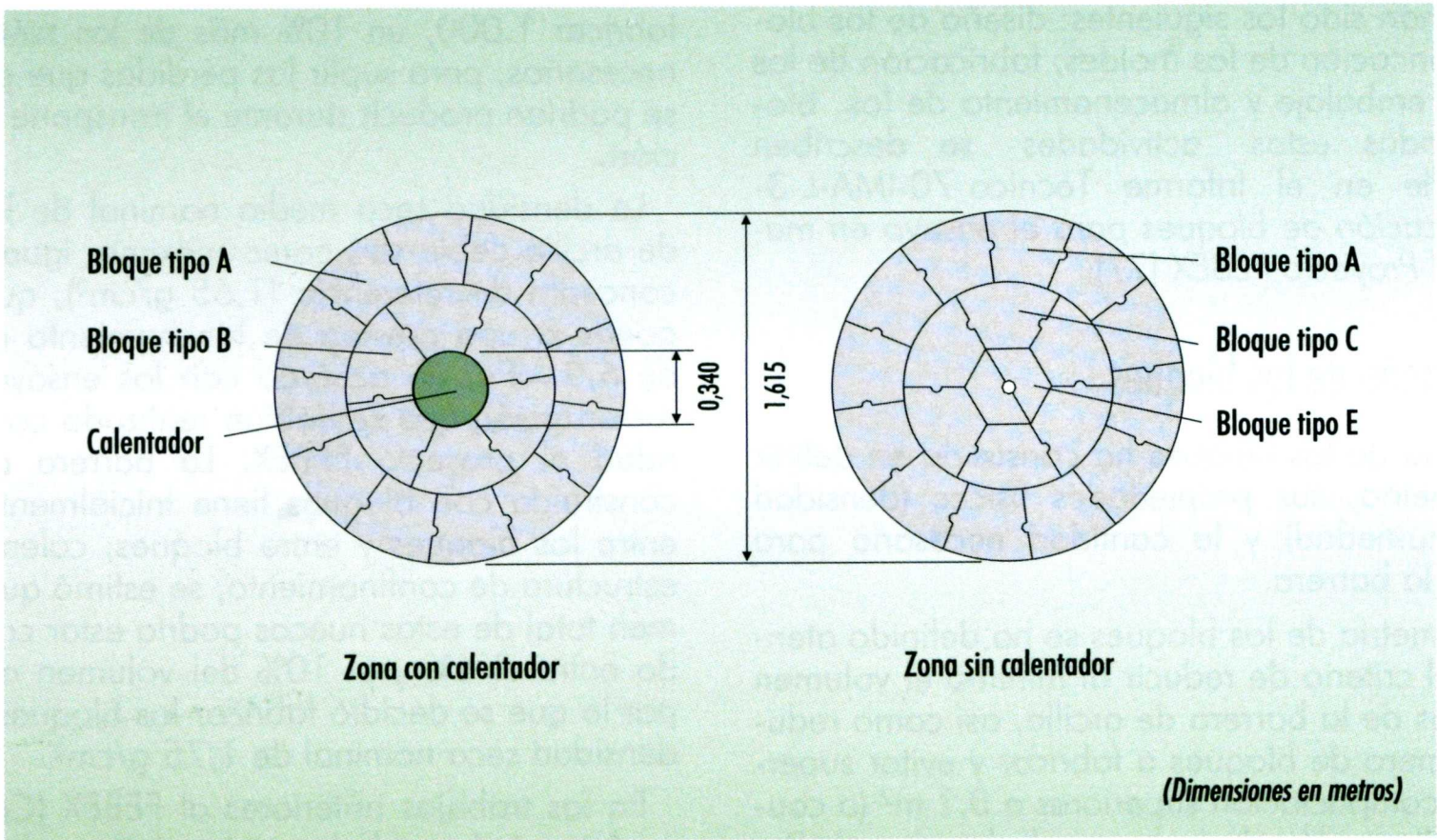


Figura 5.2: "Maqueta": sección transversal.

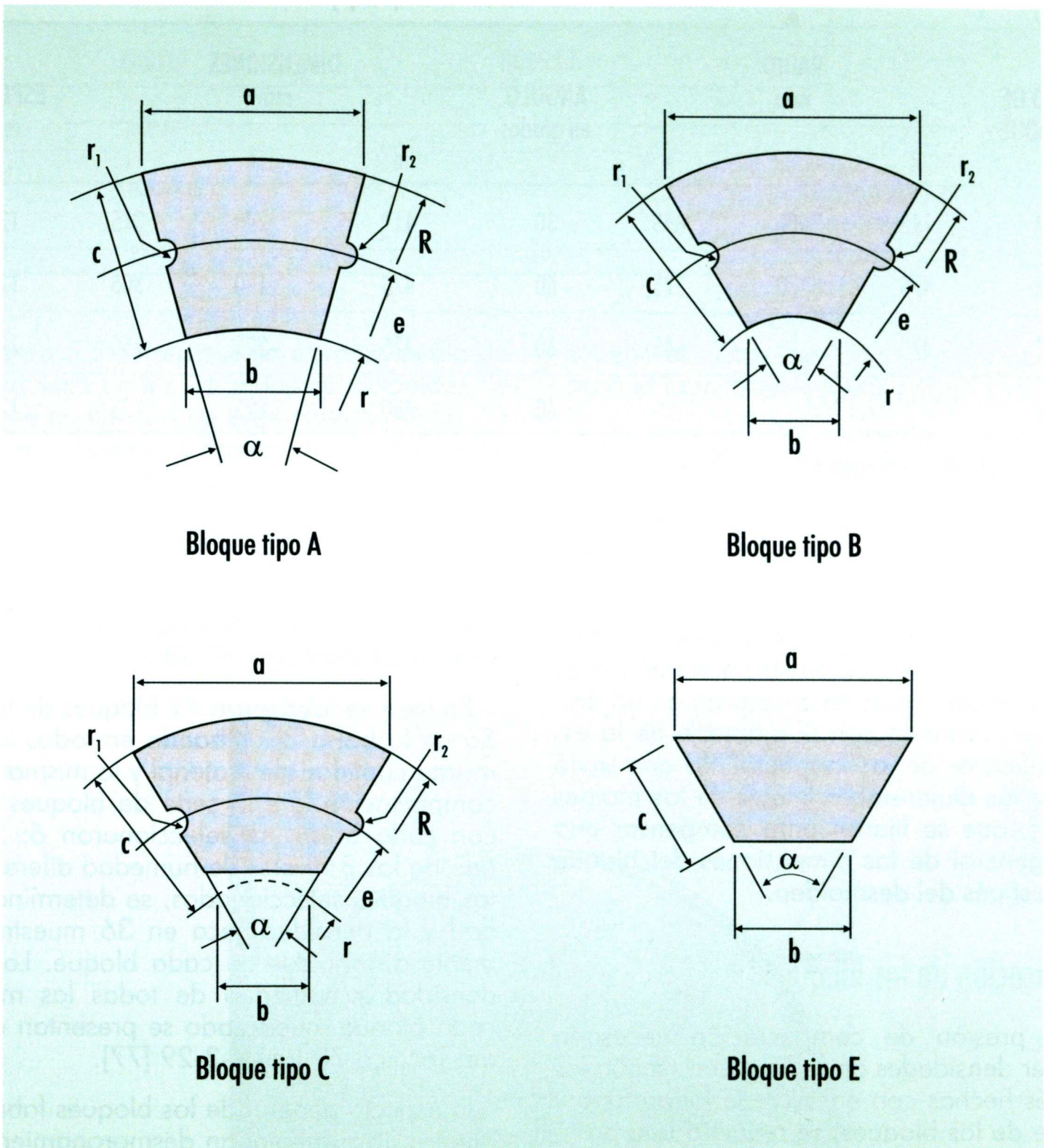


Figura 5.3: Representación esquemática de los bloques A, B, C y E.

En laboratorio, la obtención de densidades secas de 1,75 g/cm³ mediante compactación uniaxial requiere presiones entre 45 y 60 MPa.

5.2.2 Fabricación de los moldes

Los moldes se fabricaron también en la empresa Jesús Castro, S.L., dedicada fundamentalmente a matricería.

Los moldes fueron diseñados y fabricados teniendo en consideración las condiciones de trabajo, como presiones, desgaste, etc; y se han fabricado de acero al carbono.

Sólo ha sido necesario fabricar dos tipos de molde: el de bloques A y el de bloques B. Como se ha indicado en el apartado anterior, tras la fabricación de todos los bloques B, el molde se modificó para adaptarlo a la fabricación de los bloques au-

Tabla 5.1
Dimensiones nominales de los bloques (*)

TIPO DE BLOQUE	RADIO mm			ANGULO en grados	DIMENSIONES mm			ESPESOR mm
	R	r	e		a	b	c	
A	795	480	645	30	411	248	315	125
B	475	170	325	60	475	170	305	125
C	475		645	60	475	225	250	125
E				60	450	225	225	125

(*) Para los símbolos, ver la Figura 5.3.

xiliares (llamados D), de los que se obtuvieron los E por mecanizado.

Después de diseñados, se fabricaron los prototipos de los moldes y se compactaron varias piezas de cada tipo. Estas piezas se encajaron en un anillo de hierro construido con el diámetro de la estructura confinante de la “maqueta”, lo que sirvió para ajustar las dimensiones finales de los moldes (Figura 5.4), que se fijaron para compensar una expansión general de las dimensiones del bloque del 1,5% después del desmoldeo.

5.2.3 Fabricación de los bloques

Dada la presión de compactación necesaria para obtener densidades de 1,75 g/cm³, según las estimaciones hechas con ensayos de laboratorio y la superficie de los bloques, se requería una prensa de 1000 t de fuerza efectiva.

La empresa Jesús Castro, S.L. tiene una prensa de las siguientes características: es hidráulica de efecto simple, tiene una fuerza efectiva de 1000 t, es de pistón inferior (con diámetro interno de 780 mm) que actúa sobre el bastidor superior, y la máxima presión de trabajo del circuito hidráulico es de 20 MPa.

5.2.3.1 Pruebas previas

Con los prototipos de los moldes mencionados en el apartado anterior, se realizó una serie de pruebas de compactación. Para estas pruebas se utilizó bentonita proveniente del mismo yacimiento que la FEBEX, que se había almacenado a la in-

temperie durante 4 años en 2 grandes bolsas (A y B), por lo que la distribución de humedades en cada bolsa no era homogénea (Tabla 5.2) y los granos estaban aglomerados.

En total se fabricaron 49 bloques de la bolsa A y 36 de la bolsa B, utilizando en todos los casos la misma cantidad de material y la misma presión de compactación. De la serie de bloques fabricados con cada bolsa, se seleccionaron 6: 2 de cada uno de los 3 niveles de humedad diferente. De estos bloques seleccionados, se determinó la humedad y la densidad seca en 36 muestras debidamente distribuidas de cada bloque. Los datos de densidad y humedad de todas las muestras de cada bloque muestreado se presentan en el Informe Técnico 70-IMA-L-3-29 [77].

El aspecto general de los bloques fabricados era bueno: no presentaban desmoronamientos importantes. Sin embargo, se observaron fisuras en los bloques fabricados con más humedad, es decir, los correspondientes a la parte inferior de ambas bolsas y en algunos de los correspondientes a la parte media de la bolsa B. Estas fisuras son debidas a la retracción experimentada por la bentonita al perder humedad durante el almacenamiento de los bloques.

La densidad seca media obtenida fue de 1,62±0,01 g/cm³, y no se observaron grandes variaciones en el interior de las piezas, aunque siempre se obtuvieron densidades algo mayores en la parte superior del bloque, sobre todo en las caras interior y externa, lo que es debido al rozamiento producido entre pistón y molde durante la compactación.

Tabla 5.2
Humedades de la bentonita utilizada para las pruebas previas de compactación (en %)

PARTES	BOLSA A	BOLSA B
Superior	11	15
Media	12	19
Inferior	26	38

En la Figura 5.5 se representa el valor medio de la densidad seca de las 36 muestras obtenidas de cada bloque en función de la humedad media. Se observa que la humedad óptima de compactación se sitúa en torno al 16%, algo superior al 14% obtenido en los ensayos de compactación de laboratorio. Las fisuras observadas durante el almacenamiento, en los bloques fabricados con humedades

superiores, aconsejan no superar esta humedad para la fabricación de los bloques definitivos.

5.2.3.2 Fabricación

Los bloques se han fabricado con la bentonita FEBEX (Capítulos 3 y 4), con la forma y dimensiones nominales indicadas en las Figura 5.3 y en la

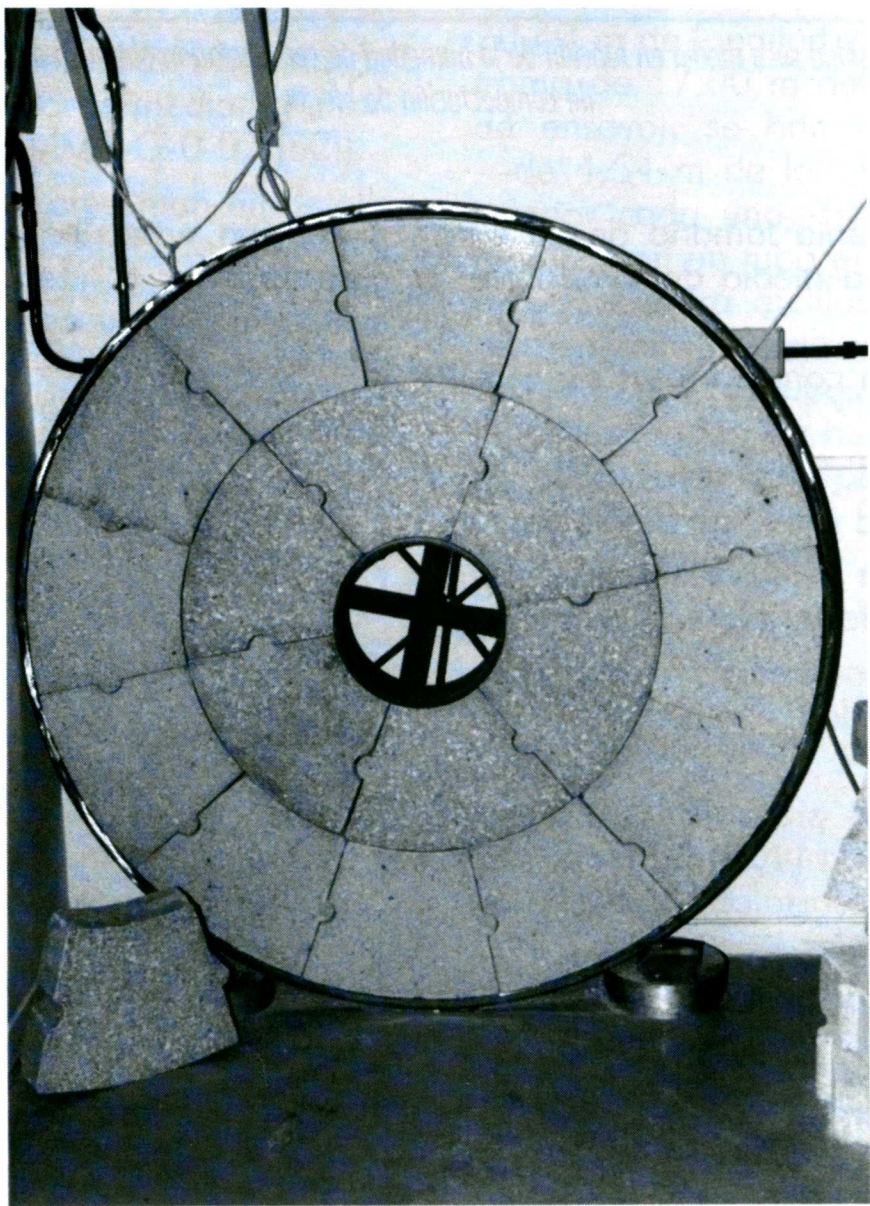


Figura 5.4: Ensayo de ajuste entre piezas para definir dimensiones de los moldes.

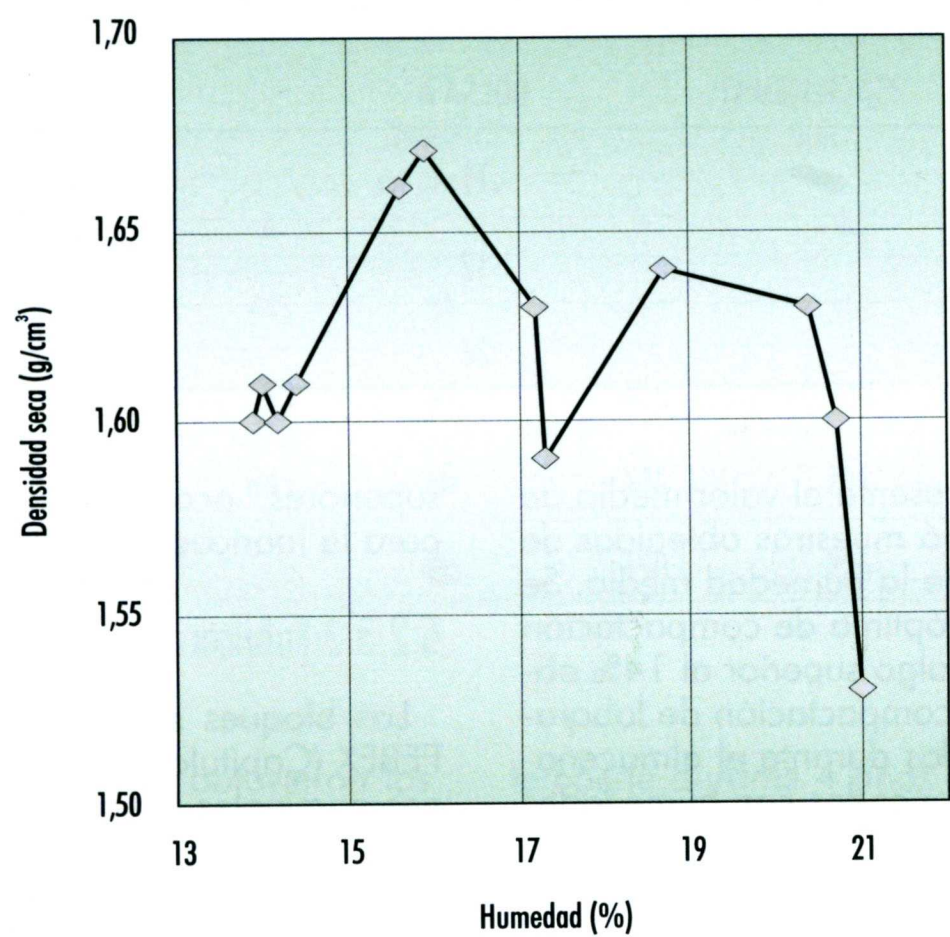


Figura 5.5: Densidad seca media en función de la humedad de compactación obtenida en las pruebas previas de compactación de bloques.

Tabla 5.1. La bentonita tenía tamaño de grano inferior a 5 mm y humedad media del orden del 14%.

El proceso de fabricación consta de las siguientes actividades:

1. Pesado de la masa de arcilla calculada en función de la humedad y del tipo de bloque.
2. Trasvase de la arcilla a la matriz del molde de compactación mediante vertido en una tolva.
3. Distribución del material en la matriz para evitar zonas de debilidad en las aristas del bloque.
4. Compactación, en tres prensados sucesivos, a la presión especificada (40 a 50 MPa) mediante control (por presostato) de la presión del circuito (15 a 18 MPa).
5. Desmoldeo mecánico y retirada manual del bloque.
6. Observación visual y control dimensional del bloque: aceptado o rechazado.

El control de calidad de fabricación se realizó diariamente en planta según lo estipulado en el Procedimiento 70-IMA-G-0-75 [78]. Se pesaba el bloque y se medía el espesor en los 4 lados y la

dimensión entre los lados curvos ($R - r$), por la cara superior e inferior. Los pesos, dimensiones, evaluación de su aspecto externo, densidad y humedad de todos los bloques fabricados están recogidos en el Informe Técnico 70-IMA-L-3-29 [77].

En total se han fabricado por compactación 598 bloques A, 322 bloques B (de los que se obtienen también los C) y 92 bloques auxiliares (D), de los que, por mecanización, se han obtenido los E. En la Tabla 5.3 se presenta un resumen de las características de los diferentes tipos de bloques utilizados en la construcción de la barrera.

5.2.4 Embalaje y almacenamiento de los bloques

Los bloques aceptados se acondicionaron para transporte, en grupos de 24, protegidos con una lámina de plástico en el interior de cajas de madera sobre "pallets" estándar (Procedimiento 70-IMA-G-0-77 [79]).

Cada caja de transporte se ha considerado un lote de fabricación, siendo consignadas sus carac-

terísticas (masa, dimensiones y aspecto) en hojas de control independientes según el Procedimiento 70-IMA-G-0-75 [78].

A medida que se fabricaban, los bloques eran transportados a CIEMAT, donde han permanecido almacenados hasta el montaje de la “maqueta”.

5.2.5 Caracterización de los bloques

Siguiendo lo especificado en el Procedimiento 70-IMA-G-0-76 [80] sobre caracterización de los bloques de bentonita, se ha realizado un muestreo sistemático, tomando uno de cada 100 bloques fabricados, con el objetivo de determinar y analizar la homogeneidad de sus características. De cada uno de los bloques seleccionados se ha determinado la conductividad térmica en la dirección perpendicular y paralela a la del esfuerzo de compactación. Después se han seccionado para obtener 15 muestras, distribuidas entre la parte superior, media e inferior del bloque. De cada una de estas muestras se ha determinado la densidad seca y la humedad por el método de desplazamiento de Hg (Procedimiento 70-IMA-G-0-10 [81]). De 3 de ellas se ha determinado además la distribución del tamaño de poros mediante intrusión de Hg (Procedimiento 70-IMA-G-0-07 [82]).

Los resultados obtenidos se presentan en detalle en el Informe 70-IMA-L-3-30 [83]. En la Tabla 5.4 se incluye el resumen de las características obtenidas para los diferentes tipos de bloque.

Se ha observado mayor densidad en la parte superior de los bloques, aunque las desviaciones sobre la media son inferiores a 0,04 g/cm³. La con-

ductividad térmica medida en la dirección perpendicular a la del esfuerzo de compactación es siempre algo mayor, contrariamente a lo que se había observado en ensayos de laboratorio (Apartado 4.4.3).

El estudio porosimétrico no muestra variaciones entre las distintas posiciones dentro de un mismo bloque ni entre diferentes tipos de bloque. El tanto por ciento de poros con radio mayor de 3 μm es de 23±6, con una moda de 9±4 μm, el de poros con radios comprendidos entre 3 y 0,05 μm es de 26±6 con una moda de 0,4±0,3 μm y el de poros con radio menor de 0,05 μm es del 50±10, con moda alrededor de 0,008±0,003 μm. La Figura 5.6 muestra la distribución de los tamaños de poros obtenida para la parte superior, media e inferior de los bloques muestreados.

5.3 Ensayo “in situ”

El ensayo “in situ” está siendo realizado en el laboratorio subterráneo de Grimsel (Suiza). Para su construcción, se excavó una nueva galería de 70,40 m de longitud y 2,28 m de diámetro. En el tramo de 17,00 m del fondo de la galería (zona de ensayo), se han instalado dos calentadores —de 4,54 m de longitud y 0,90 m de diámetro exterior cada uno, separados 1,00 m entre sí— alojados en un tubo guía concéntrico con la galería. La barrera arcillosa, construida con bloques de bentonita densamente compactada, rellena el espacio entre los tubos guía, las paredes de la galería y un tapón de hormigón que cierra el tramo de ensayo. En las Figuras 5.7 y 5.8 se muestran

Tabla 5.3
Características de los bloques (*)

TIPO DE BLOQUE	A	B+C (*)	D+E (*)
Espesor (cm)	12,25±0,08	12,25±0,06	12,24±0,14
R-r (cm)	31,50±0,00	30,60±0,00 (B)	30,60±0,00 (D)
Densidad húmeda (g/cm ³)	2,02±0,02	1,99±0,02	2,06±0,04
Densidad seca (g/cm ³)	1,77±0,02	1,76±0,02	1,82±0,04
Humedad (%)	14,2±1,4	13,2±0,9	13,1±0,9
Masa (kg)	25,8±0,3	25,2±0,2	25,3±0,4

(*) Para los símbolos, ver la Figura 5.3.

una sección longitudinal y dos transversales esquemáticas del tramo de ensayo.

Las actividades de diseño y fabricación de los bloques para la construcción de la barrera de arcilla, se describen en detalle en el Documento 70-AIT-L-3-10 *Informe final sobre las actividades realizadas por AITEMIN para la construcción de una barrera de bentonita* [84].

Es de destacar la referencia de partida que han supuesto los conocimientos y experiencias extraídos del ensayo en “maqueta”.

Las actividades fundamentales han sido: diseño de los bloques y de los moldes; fabricación de los moldes; fabricación de los bloques; embalaje y almacenamiento de los bloques.

5.3.1 Diseño de los bloques y de los moldes

Se han elaborado las dos especificaciones siguientes para los bloques y moldes: 70-AIT-H-3-01 *Specification for bentonite blocks* [85] y 70-AIT-H-3-02 *Specification of moulds* [86].

Tabla 5.4
Resultados de caracterización de bloques

	TIPO DE BLOQUE		
	A	B	C
Nº piezas compactadas	598	322	92
Nº piezas muestreadas	8	5	2
w saca (1), en %	12,6±0,3	14,4±1,5	
ρ _d dimensiones (2), en g/cm³	1,77±0,01	1,77±0,02	
ρ _d secciones (3), en g/cm³	1,72±0,01	1,71±0,02	1,75
w secciones (3), en %	13,6±0,4	14,5±1,1	12,8
S _r secciones (3), en %	65	67	64
ρ _d superior (4), en g/cm³	1,74±0,01	1,73±0,01	1,77
ρ _d media (4), en g/cm³	1,73±0,01	1,72±0,02	1,76
ρ _d inferior (4), en g/cm³	1,70±0,01	1,67±0,06	1,74
Conductividad térmica paralela, en W/m·K	0,91±0,06	0,94±0,04	0,99
Conductividad térmica perpendicular, en W/m·K	0,96±0,05	0,95±0,07	1,02
Conductividad térmica paralela, en W/m·K (5)	0,88	0,92	0,87

- (1) Humedad de la arcilla de la saca con la que se fabricó el bloque.
- (2) Calculada teniendo en cuenta el peso del bloque, la humedad de la arcilla de la saca con la que se fabricó el bloque y las dimensiones del bloque medidas después de compactación.
- (3) Media de las determinaciones realizadas en 15 muestras distribuidas en el interior del bloque.
- (4) Media de las 5 determinaciones realizadas en 5 muestras distribuidas en la parte superior, media e inferior del bloque.
- (5) Según el ajuste teórico determinado para la bentonita FEBEX: $\lambda = 1,30 - 0,75 / (1 + \exp (S - 0,67) / 0,11)$

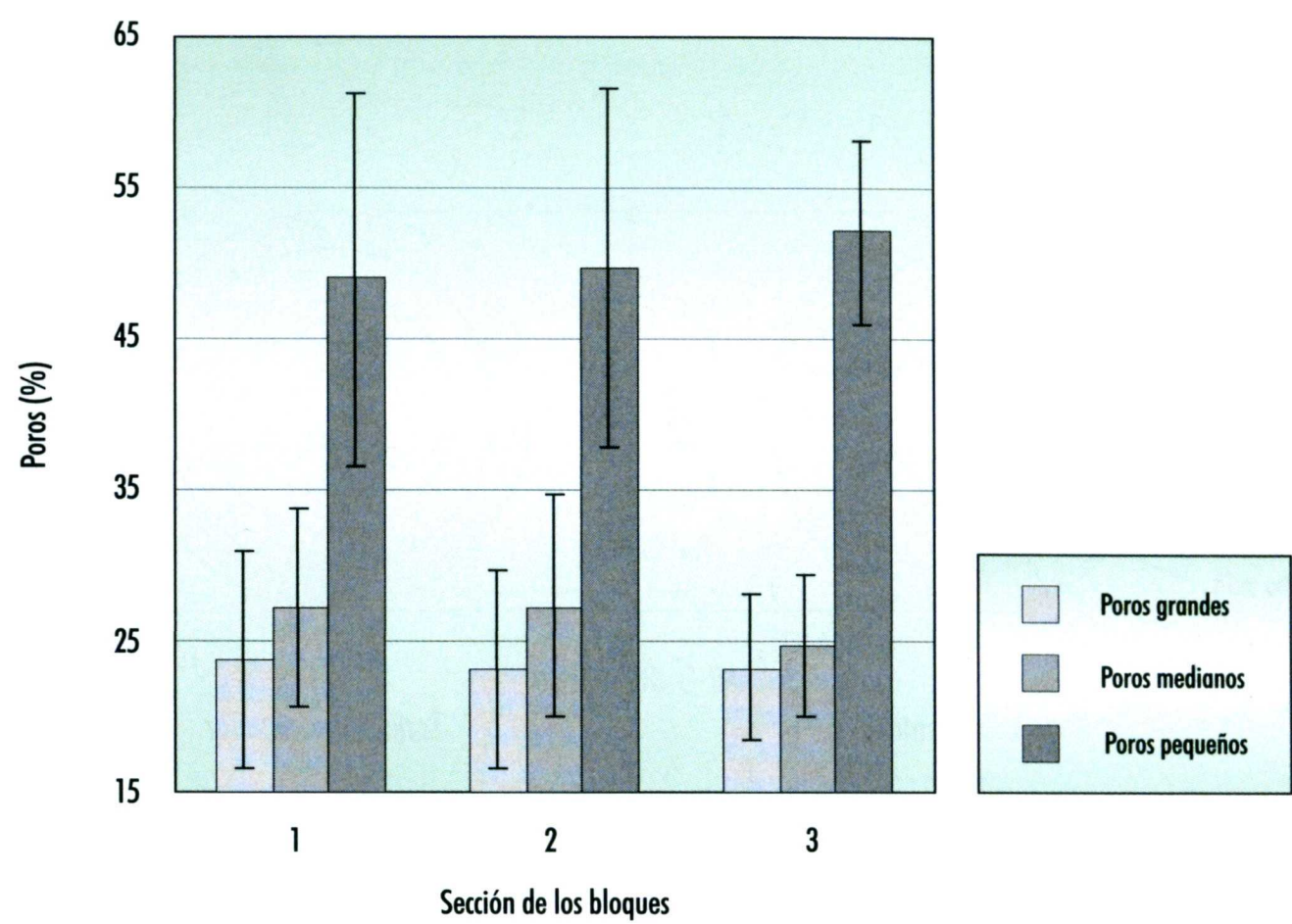


Figura 5.6: Distribución del tamaño de poros en las secciones superior (1), media (2) e inferior (3) de los bloques muestreados.

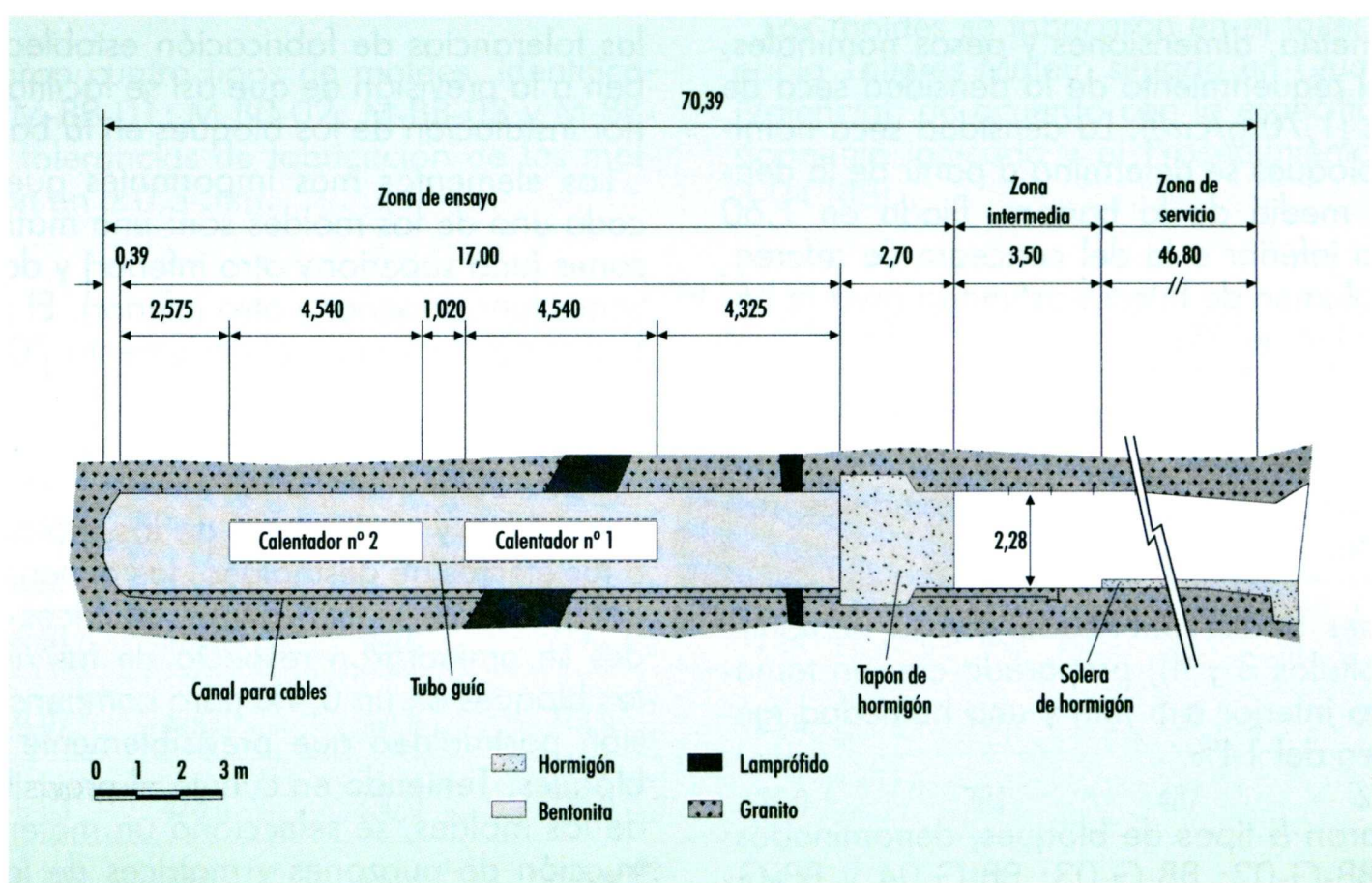


Figura 5.7: Ensayo "in situ", sección longitudinal.

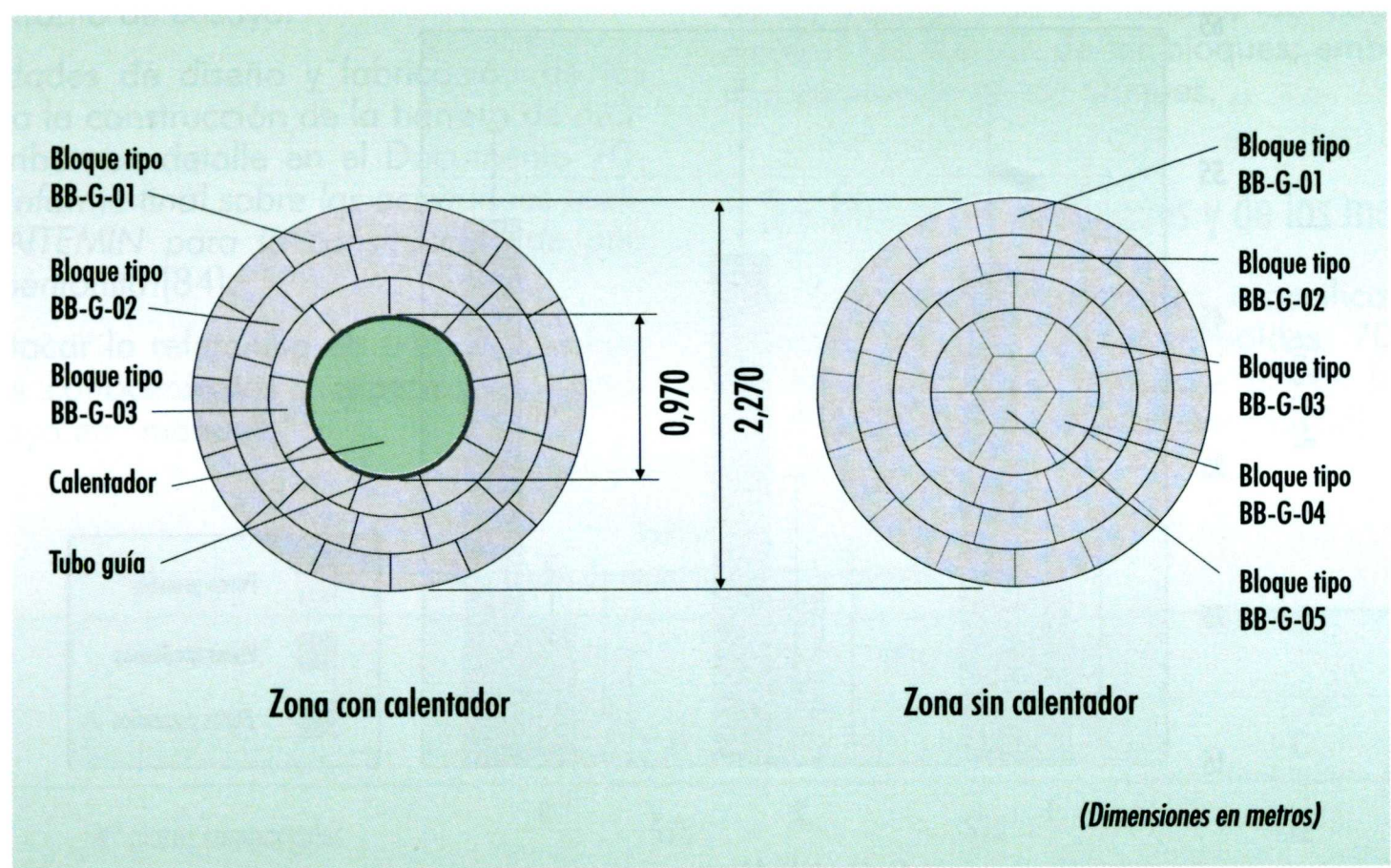


Figura 5.8: Disposición de los bloques en zonas con y sin calentador.

En la especificación de los bloques de bentonita se tuvieron en consideración, fundamentalmente, los datos de diseño de la barrera de arcilla, tales como geometría, dimensiones y pesos nominales, así como el requerimiento de la densidad seca de los bloques ($1,70 \text{ g/cm}^3$). La densidad seca nominal de los bloques se determinó a partir de la densidad seca media de la barrera, fijada en $1,60 \text{ g/cm}^3$ (algo inferior a la del concepto de referencia) y del volumen de huecos estimado para la barrera, del orden del 7%.

La disposición de los bloques en coronas concéntricas se representa en la Figura 5.8 para las secciones con calentadores y sin calentadores, respectivamente.

Los bloques se han fabricado con la bentonita FEBEX (Capítulos 3 y 4), preparada con un tamaño de grano inferior a 5 mm y una humedad media del orden del 14%.

Se fabricaron 5 tipos de bloques, denominados: BB-G-01; BB-G-02; BB-G-03; BB-G-04 y BB-G-05. Su forma, dimensiones nominales y tolerancias de fabricación, se muestran en la Figura 5.9 y en la Tabla 5.5.

Las dimensiones nominales de fabricación de los bloques son aproximadamente 2 mm inferiores a las de diseño. Esta reducción de las dimensiones y las tolerancias de fabricación establecidas, se deben a la previsión de que así se facilitaría la posterior instalación de los bloques en la barrera.

Los elementos más importantes que conforman cada uno de los moldes son: una matriz, dos punzones (uno superior y otro inferior) y dos portapunzones (uno superior y otro inferior). El plano de los moldes se incluye en el documento 70-AIT-K-3-01 [87].

En la especificación de los moldes se tuvieron en consideración, fundamentalmente, los efectos de desmoldeo y el desgaste de los moldes. Respecto a los efectos de desmoldeo, las dimensiones de fabricación de los punzones y matrices de los moldes se aminoraron respecto de las nominales de los bloques en un 0,4% para compensar la expansión postmoldeo que previsiblemente sufrirían los bloques. Teniendo en cuenta el previsible desgaste de los moldes, se seleccionó un material de construcción de punzones y matrices de las siguientes características:

- Matrices: acero aleado indeformable F521, muy resistente al desgaste.

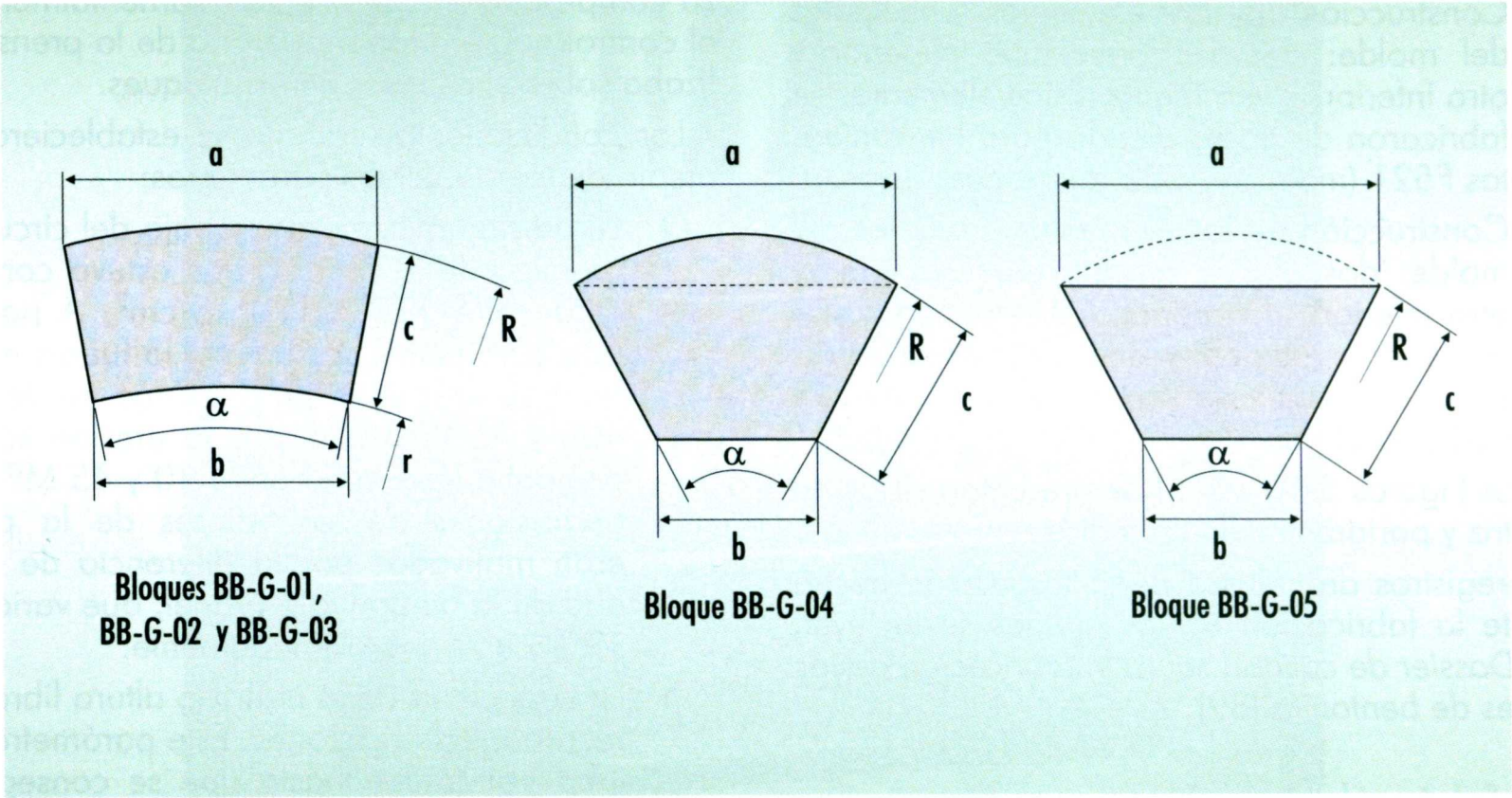


Figura 5.9: Dimensiones y forma de los bloques de bentonita.

- ❑ Punzones: acero aleado indeformable F522, de alta tenacidad y dureza.

Se fabricaron cuatro tipos de moldes, identificados como: M-BB-01; M-BB-02; M-BB-03 y M-BB-04/05. Las tolerancias de fabricación de los moldes se fijaron en $\pm 0,3$ mm.

5.3.2 Fabricación de los moldes

Los moldes se fabricaron en el taller de la compañía Talleres Mateu, situado en Quart de Poblet (Valencia), de acuerdo con la especificación anteriormente indicada y el Procedimiento 70-AIT-G-3-04 [88].

Tabla 5.5
Dimensiones constructivas de los bloques

Tipo de bloque	Dimensiones superficiales mm			Espesor mm	Radio mm		Angulo nominal α
	a	b	c		R	r	
BB-G-01	470,0 ^{+2,0} _{-5,0}	380,0 ^{+2,0} _{-4,0}	214,0 ^{+2,0} _{-3,0}	125,0 ^{+2,0} _{-2,0}	1 133	919	24°
BB-G-02	473,0 ^{+2,0} _{-5,0}	361,0 ^{+2,0} _{-4,0}	214,0 ^{+2,0} _{-3,0}	125,0 ^{+2,0} _{-2,0}	917	703	30°
BB-G-03	478,0 ^{+2,0} _{-5,0}	330,0 ^{+2,0} _{-3,0}	214,0 ^{+2,0} _{-3,0}	125,0 ^{+2,0} _{-2,0}	701	487	40°
BB-G-04	483,0 ^{+2,0} _{-5,0}	240,0 ^{+2,0} _{-3,0}	240,0 ^{+2,0} _{-3,0}	125,0 ^{+2,0} _{-2,0}	485	-	60°
BB-G-05	483,0 ^{+2,0} _{-5,0}	240,0 ^{+2,0} _{-3,0}	240,0 ^{+2,0} _{-3,0}	125,0 ^{+2,0} _{-2,0}	-	-	60°

La fabricación de los moldes consistió fundamentalmente en las actividades siguientes:

- Construcción de los elementos principales del molde: dos punzones (uno superior y otro inferior) y una matriz. Estos elementos se fabricaron de acero aleado para herramientas F521 (matriz) y F522 (punzones).
- Construcción de los elementos auxiliares del molde: dos placas soporte (una superior y otra inferior), dos portapunzones (uno superior y otro inferior) y una caja portamatriz. Estos elementos se fabricaron de acero al carbono ST-52.

En las Figuras 5.10 y 5.11 se presentan vistas de la matriz y portamatriz de un molde.

Los registros de calidad de la inspección hecha durante la fabricación de los moldes se incluyen en el *Dossier de calidad sobre la fabricación de los bloques de bentonita* [89].

5.3.3 Fabricación de los bloques

Como se ha indicado anteriormente, los bloques se fabricaron en la planta de procesamiento de la compañía Refracta, de acuerdo con la especificación anteriormente indicada y el Procedimiento 70-AIT-G-3-01 [90].

5.3.3.1 Proceso de fabricación

Los bloques se fabricaron con una prensa hidráulica uniaxial de doble efecto y de 550 t de fuerza efectiva máxima, siguiendo las operaciones que se describen a continuación.

Preparación del material de carga

Esta operación consistía en mezclar la bentonita a granel en una máquina mezcladora, durante 15 minutos. Después de mezclada, se tomaba una muestra para determinar con cierta aproximación la humedad de la bentonita de la bolsa, con el objeto de poder equilibrar humedades, si fuera necesario, mezclando la bentonita de varias bolsas. Esta operación se realizaba cada 500 kg de bentonita.

Selección de las condiciones de trabajo de la prensa

Esta operación se realizaba al comienzo de la fabricación de cada tipo de bloque y de cada jornada de trabajo. Después, durante el prensado de

bloques, se comprobaba continuamente si las condiciones de trabajo seguían siendo las mismas. La comprobación consistía, fundamentalmente, en el control que el propio operario de la prensa realizaba sobre el espesor de los bloques.

Las condiciones de trabajo se establecieron por medio de los siguientes parámetros:

- La presión máxima de trabajo del circuito hidráulico de la prensa, que estuvo comprendida entre 170 y 190 kg/cm². A partir de este parámetro, se conocía la fuerza efectiva de trabajo de la prensa (que osciló entre 400 y 450 toneladas) y la presión sobre la bentonita (que varió entre 40 y 45 MPa). Las oscilaciones de los valores de la presión eran motivadas por la diferencia de humedad de la bentonita a granel, que varió entre 12% y 16%, aproximadamente.
- La capacidad de la matriz o altura libre entre recorridos de punzones. Este parámetro se fijaba por tanteo hasta que se conseguía el valor nominal del espesor del bloque (125 mm).

Normalmente, fijados estos parámetros, la simple verificación del espesor de los bloques permitía tener bajo control el proceso de prensado. De esta forma se detectaron las siguientes incidencias:

- Mayor humedad de la esperada en la materia prima, lo que se ponía de manifiesto porque se obtenían bloques de menor espesor para las condiciones normales de trabajo fijadas.
- Pérdida de masa en el material de carga, lo que se ponía de manifiesto por la obtención de bloques de menor espesor.
- Calentamiento del aceite del circuito hidráulico de la prensa, lo que se ponía de manifiesto por cambios arbitrarios en el espesor del bloque. Cuando esto sucedía, se procedía a la interrupción del trabajo durante varias horas o incluso durante el resto de la jornada de trabajo.

En estos tres casos, como en cualquier otro, se actuaba sobre la prensa para solucionar la incidencia cuando el espesor del bloque difería del nominal en ± 1 mm. Por tanto, el proceso de compactado estaba siempre bajo control.

Ejecución del bloque

Esta operación consistía en pesar la masa de bentonita estipulada para cada tipo de bloque; en



Figura 5.10: Vista de la matriz de un molde. Sobre la matriz están situados los dos punzones del molde.

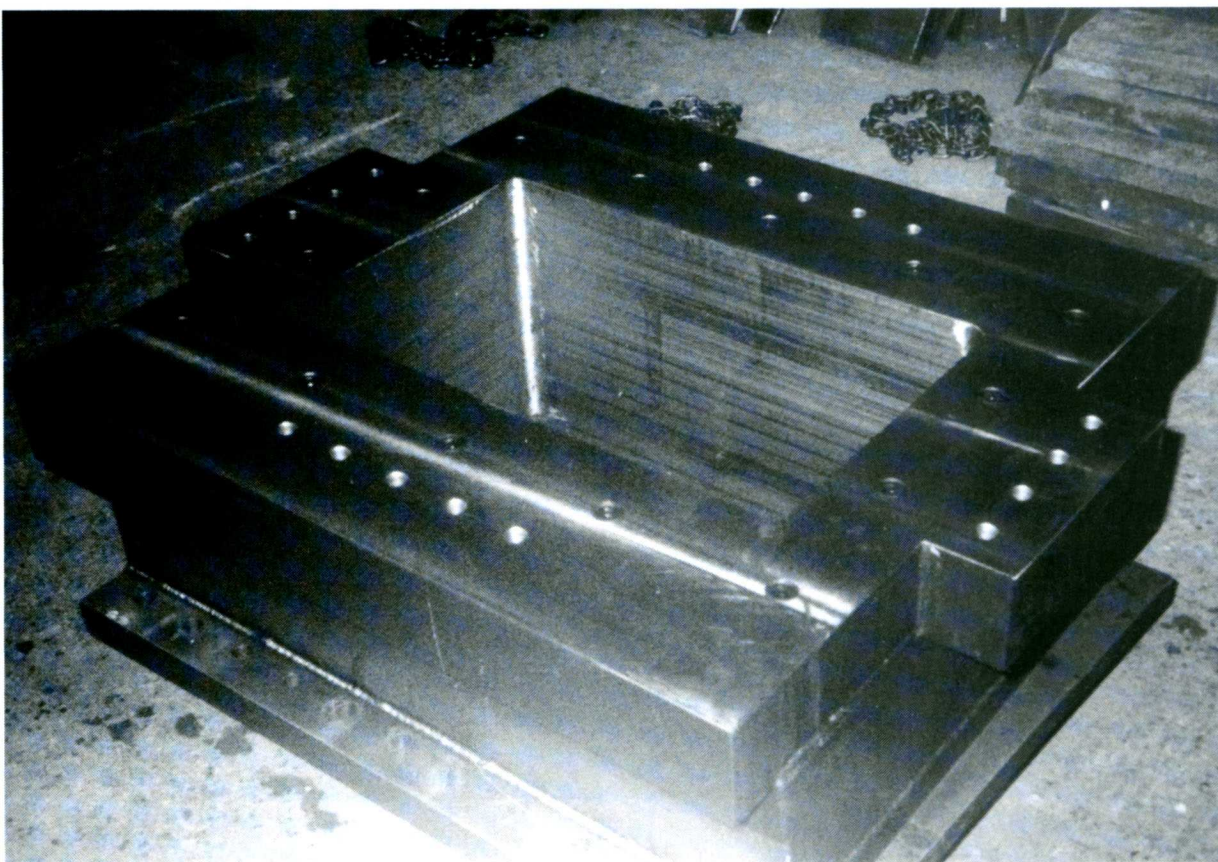


Figura 5.11: Vista de la caja portamatriz de un molde.

introducirla en la matriz; en compactar y expulsar mecánicamente el bloque; en retirarlo manualmente; y en su control por el operario de la prensa (Figura 5.12).

El peso nominal para los distintos tipos de bloques de bentonita era de: 22,1 kg para el tipo BB-G-01; 21,8 kg para el tipo BB-G-02; 21,3 kg para el tipo BB-G-03 y 23,1 kg para el tipo BB-G-04/05.

Con estas operaciones se completaba la fabricación de los bloques de los tipos BB-G-01, BB-G-02, BB-G-03 y BB-G-04 (Figuras 5.13 y 5.14).

El bloque tipo BB-G-05 se ha obtenido a partir del bloque BB-G-04, mediante el corte de su segmento cilíndrico (Figura 5.15). Esto se hizo por medio de una máquina cortadora de disco diamantado de 800 mm de diámetro y 7,5 mm de

espesor. El corte se practicaba perpendicularmente a las dos caras del bloque.

5.3.3.2 Control de calidad y características de los bloques de bentonita

En la Tabla 5.6 se indica el número de bloques fabricados de cada tipo y su destino. La mayor parte de los bloques se enviaron a Grimsel, pero una cierta cantidad se envió a las instalaciones de AITEMIN, en Toledo, para realizar una prueba de montaje.

Los métodos de inspección y ensayo de los bloques se describen en los cinco procedimientos siguientes: 70-AIT-G-3-02 [91], 70-AIT-G-3-05 [92], 70-AIT-G-3-06 [93], 70-AIT-G-3-07 [94] y 70-AIT-G-3-08 [95].

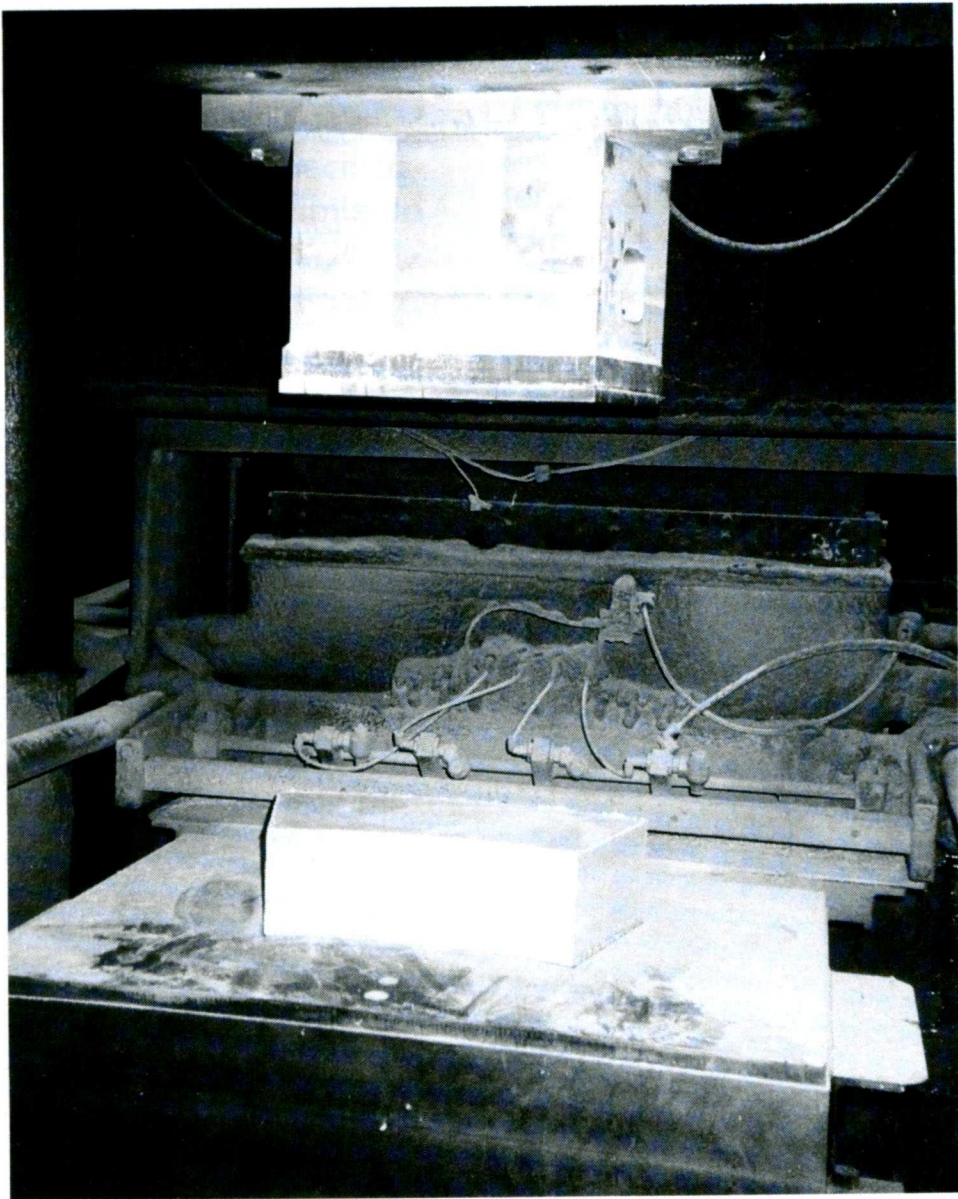


Figura 5.12: Vista frontal de un molde montado en la prensa (En esta instantánea el punzón superior está en posición de reposo y el punzón inferior (no se ve) está a la altura de la cara superior de la matriz (mesa de prensa), soportando el bloque de bentonita que acaba de ser compactado).

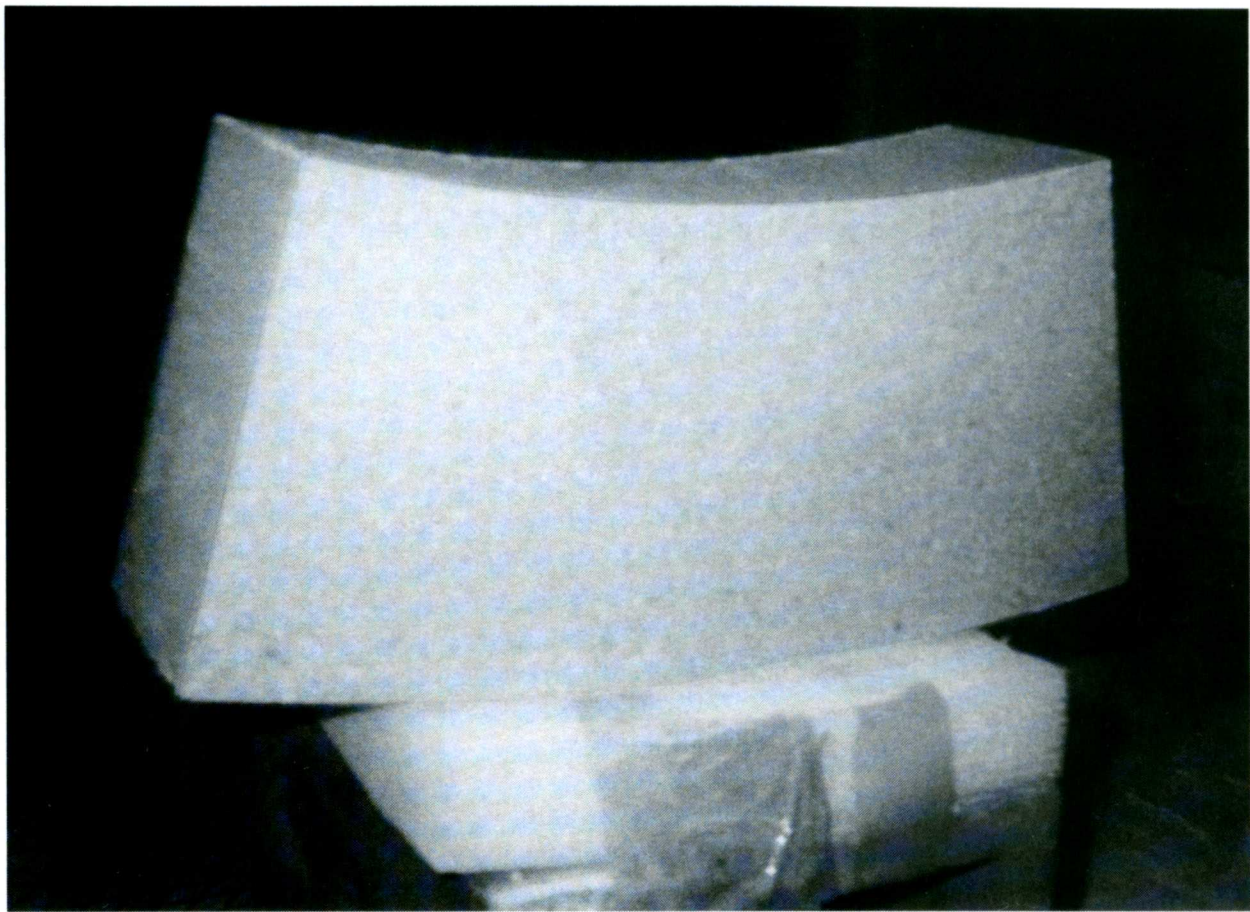


Figura 5.13: Primer plano de bloque (BB-G-01) fabricado.

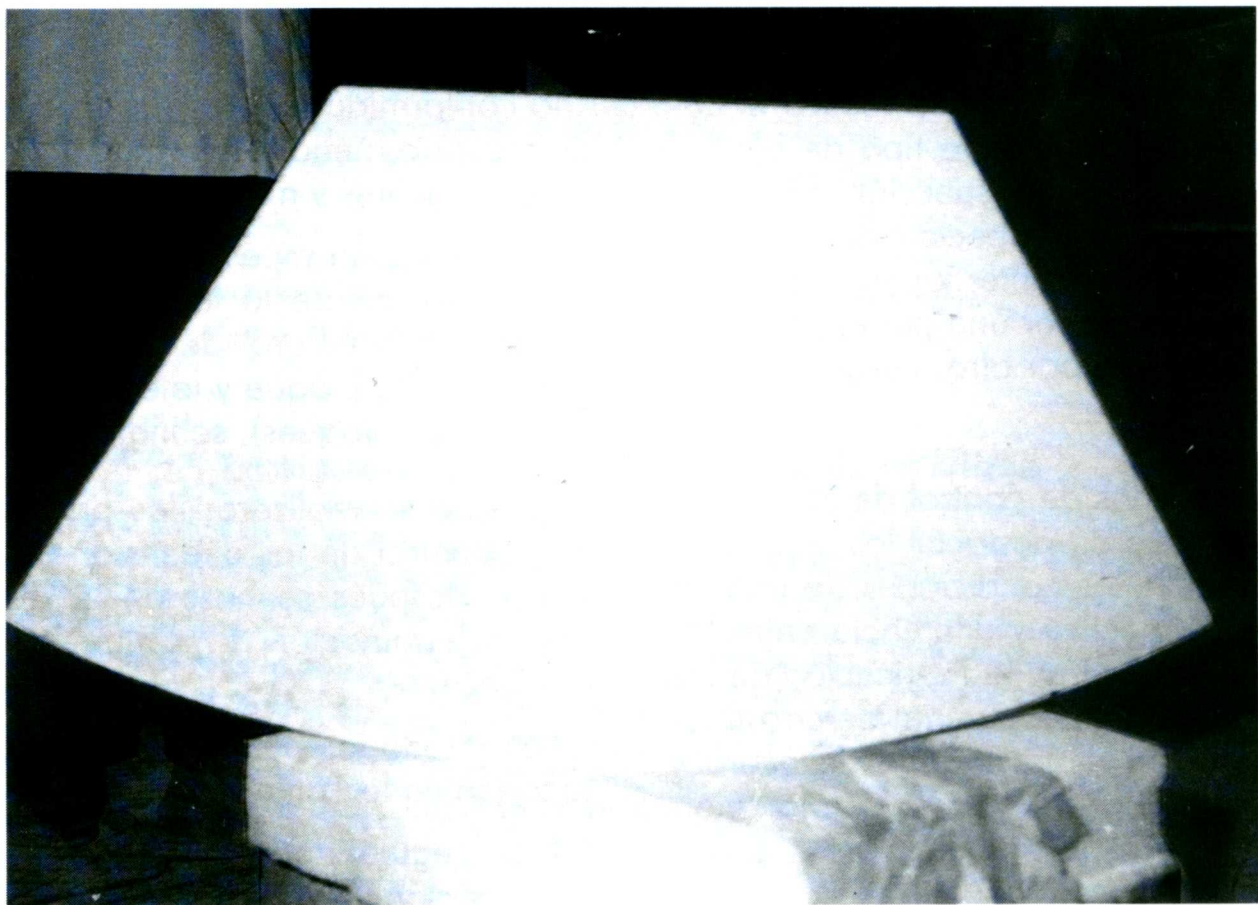


Figura 5.14: Primer plano de bloque (BB-G-04) fabricado.

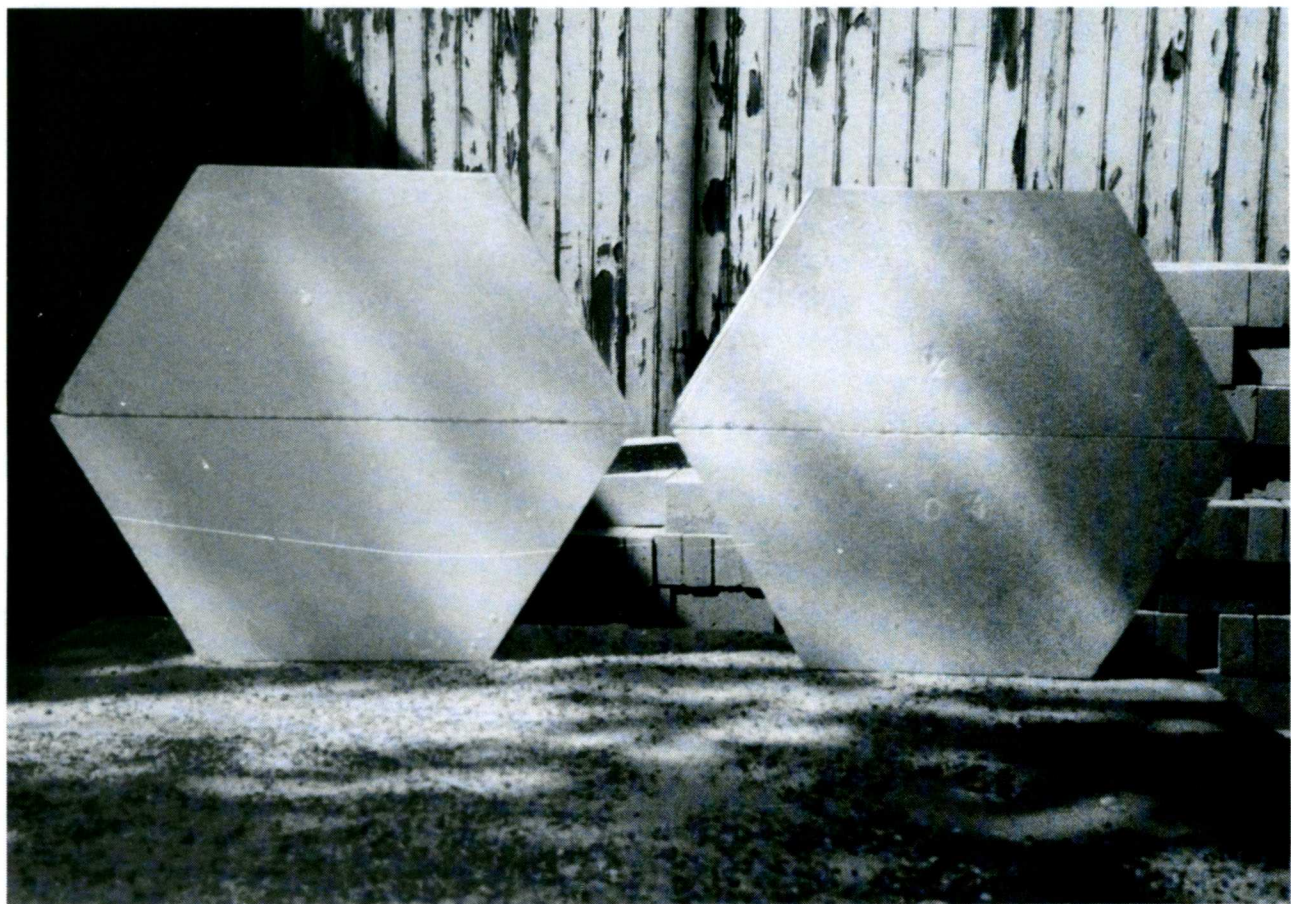


Figura 5.15: Primer plano de cuatro bloques del tipo BB-G-05 dispuestos según su (futuro) montaje después de haber sido cortados (los planos de corte coinciden con los planos de superposición entre bloques).

De todos ellos, es de destacar el procedimiento 70-AIT-G-3-02 [91]. El control de los bloques se ha basado en las siguientes inspecciones secuenciales: una inspección única, que se realizó al comienzo de la fabricación de cada tipo de bloque por parte del fabricante; una inspección total, que se realizó sobre el espesor y aspecto externo de los bloques por parte del fabricante; y una inspección muestral doble, realizada, por una parte, por el fabricante de los bloques, y por otra, llevada a cabo por AITEMIN.

Respecto a los métodos de control de los procesos de fabricación, son de destacar los siguientes controles: selección de las condiciones de trabajo de la prensa (fuerza efectiva y diferencia entre los recorridos de los pistones), en la fabricación de los bloques; y características del material de construcción de los punzones y matrices (tipo de acero y tratamiento térmico), en la fabricación de los moldes.

La inspección muestral, definida teniendo en consideración la norma ISO 5022/79 [96], se sustenta sobre los resultados de las verificaciones no

destruictivas (aspecto externo y dimensiones) y de los ensayos destruictivos (humedad y densidad seca) de los bloques de bentonita. Los defectos o “no conformidades” se clasificaron, según el caso, de mayor o menor importancia, en defectos principales, mayores y menores.

La inspección muestral de AITEMIN fue hecha a la finalización de la fabricación de cada tipo de bloque. El número de muestras analizadas de cada tipo de bloque y lote de inspección (15% del total de los bloques), se indican en la Tabla 5.7.

Primero se realizaron las pruebas “no destruictivas”: control de las dimensiones y del aspecto externo. Después se hicieron las pruebas destruictivas: determinación de la humedad y de la densidad seca.

Los resultados de las pruebas no destruictivas se recogen en la Tabla 5.8.

Las irregularidades encontradas consistieron en la aparición de pequeñas fisuras superficiales en las caras y en los cantos redondeados de algunos bloques. La primera se detectó al comienzo de la fabricación y se solucionó reduciendo el caudal de

Tabla 5.6:
Número de bloques fabricados

Tipo Peso unitario (kg)		BB-G-01 22,1	BB-G-02 21,8	BB-G-03 21,3	BB-G-04 23,1	BB-G-05 18,0
Grimsel	Uds.	2 520	1 974	1 483	486	162
	Pesos (kg)	55 692	43 034	31 588	11 227	2 916
Toledo	Uds.	360	288	144	48	16
	Pesos (kg)	7 956	6 279	3 068	1 109	288
Total	Uds.	2 880	2 262	1 627	534	178
	Pesos (kg)	63 648	49 312	34 655	12 335	3 204

Tabla 5.7
Lotes y muestras de inspección ejecutadas por AITEMIN

Tipo		BB-G-01	BB-G-02	BB-G-03	BB-G-04	BB-G-05
Total de bloques	Uds.	2 880	2 262	1 627	534	178
	Pesos (t)	63,65	49,31	34,66	12,33	3,20
Lote de inspección	Uds.	432	340	244	80	27
	Pesos (t)	9,55	7,40	5,20	1,85	0,48
Muestra de inspección	Uds.	50	50	32	13	13
	Para END	50	50	32	13	13
	Para ED	9	9	9	6	6

T=Toneladas; END=Ensayos no destructivos; ED=Ensayos destructivos.

Tabla 5.8
Resultados de las pruebas no destructivas realizadas por AITEMIN

Tipo	BB-G-01	BB-G-02	BB-G-03	BB-G-04	BB-G-05
Aspecto externo	R (46) I (4)	R (50)	R (32)	R (13)	R (10) I (3)
Planitud caras y cantos	R (50)	R (50)	R (32)	R (13)	R (13)
Dimensiones	DT (50)	DT (50)	DT (32)	DT (13)	DT (13)

R = Regular; I = Irregular; DT = Dentro de tolerancia; (50) significa número de unidades

la prensa; la segunda apareció al final de la fabricación y se resolvió compactando en dos tiempos.

También aparecieron pequeños desprendimientos de aristas o vértices en los bloques cortados, originados a la entrada y salida del disco de corte en el bloque.

Estas irregularidades o “no conformidades” menores aparecidas en un pequeño número de los bloques analizados, estaban dentro de los límites especificados en el plan de inspección.

Los resultados de los ensayos destructivos se presentan en la Tabla 5.9.

Como se puede observar en la tabla, los valores medios, tanto de la humedad como de la densidad seca, están dentro de los límites establecidos en la especificación de diseño de los bloques: 1,68 a 1,72 g/cm³, para la densidad seca y 11 a 15%, para la humedad.

Los registros de calidad de la inspección hecha sobre el proceso de fabricación y sobre los bloques de bentonita, se incluyen en el *Dossier de ca-*

lidad sobre la fabricación de los bloques de bentonita [89].

5.3.4 Embalaje y almacenamiento de los bloques

El embalaje y almacenado de los bloques en la planta de procesamiento se realizó de acuerdo con el Procedimiento 70-AIT-G-3-03 [97]. El número de embalajes que se precisaron para los distintos tipos de bloques, se indican en la Tabla 5.10.

Los bloques se embalaron en cajas de cartón colocadas sobre “pallets” de madera, que servían de base. En las paredes internas de la caja se colocó una bolsa de plástico y sobre la base interna del embalaje una plancha de asiento de material plástico esponjoso, sobre la que se colocaron los bloques en 6 tongadas de 7 bloques cada una (excepto para el bloque BB-G-04, con 6 bloques por tongada); la última tongada se cubrió con una plancha de cierre del mismo material que la de asiento. Entre cada tongada y entre los bloques de

Tabla 5.9
Resultado de los ensayos destructivos realizados por AITEMIN

MUESTRA	BB-G-01		BB-G-02		BB-G-03		BB-G-04		BB-G-05	
	ρ_d	w	ρ_d	w	ρ_d	w	ρ_d	w	ρ_d	w
1	1,67	13,9	1,69	13,4	1,71	14,7	1,69	15,3	1,71	13,1
2	1,70	14,1	1,70	14,4	1,69	15,3	1,72	13,0	1,70	13,5
3	1,70	14,9	1,69	14,7	1,70	15,0	1,70	12,7	1,69	13,1
4	1,69	14,9	1,70	13,8	1,68	14,3	1,71	13,2	1,72	12,9
5	1,71	13,8	1,69	14,2	1,70	14,8	1,68	15,3	1,72	12,8
6	1,68	15,0	1,68	15,4	1,69	14,1	1,68	12,6	1,71	13,1
7	1,70	14,3	1,69	13,2	1,68	15,3	-	-	-	-
8	1,69	14,1	1,69	12,3	1,68	15,6	-	-	-	-
9	1,70	15,4	1,68	15,3	1,69	14,8	-	-	-	-
MEDIA ARITMÉTICA	1,69	14,45	1,69	14,1	1,69	14,9	1,70	13,7	1,70	13,1

Tabla 5.10
Embalajes utilizados para los distintos tipos de bloques

Tipo		BB-G-01	BB-G-02	BB-G-03	BB-G-04	BB-G-05
Nº Bloques por embalaje completo		42	42	42	36	42
Peso bruto por embalaje completo (kg)		980	950	950	880	810
Nº de embalajes	Grimsel	60	47	36	14	4
	Toledo	9	7	4	1	1

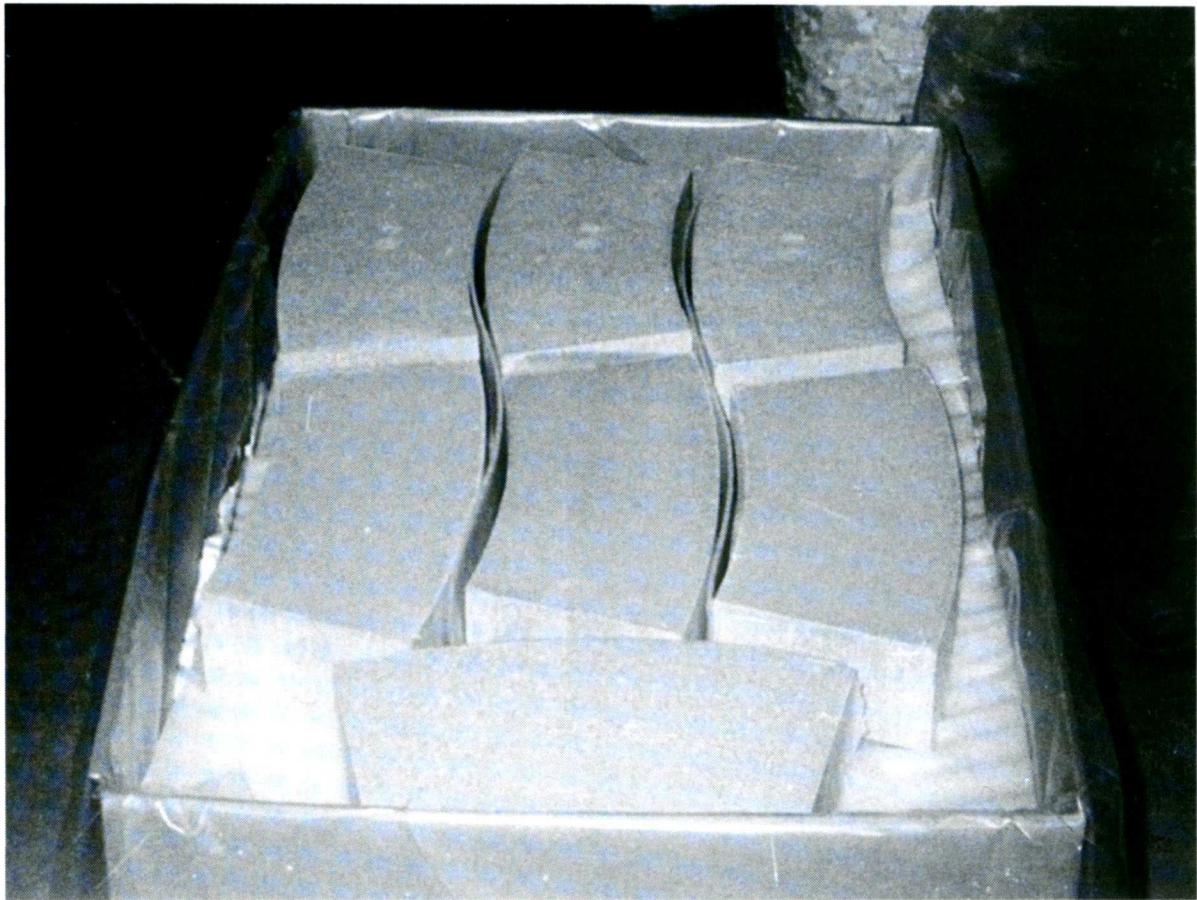


Figura 5.16: Instantánea del proceso de embalaje de los bloques.

la misma tongada, se colocaron tiras separadoras y los espacios vacíos entre bloques se llenaron con material de relleno.

Después de plegada la caja, se colocaron las etiquetas, protectores de las aristas, flejes, bolsa exterior de plástico y se introdujo el embalaje cargado en una cámara térmica para que la bolsa de plástico se plegase herméticamente sobre el contorno de la caja.

En las Figuras 5.16 y 5.17 se muestra una instantánea del proceso de embalaje y el aspecto del embalaje terminado.

Los registros de calidad de la inspección llevada a cabo sobre el proceso de manipulación, embalaje y almacenaje de los bloques, se incluyen en el *Dossier de calidad sobre la fabricación de los bloques de bentonita* [89].



Figura 5.17: Embalaje de bloques terminado. Obsérvese la base del embalaje (pallet), los protectores de aristas superiores, el flejado, el etiquetado y el recubrimiento termorretráctil del conjunto.

6

CONCLUSIONES

6.1 Origen y aspectos generales de la bentonita FEBEX

La bentonita FEBEX ha sido extraída del yacimiento Cortijo de Archidona, explotado por Minas de Gádor, S.A., en la zona de Serrata de Níjar (provincia de Almería). Este yacimiento había sido seleccionado, en planes de I+D de ENRESA anteriores al proyecto FEBEX, como el de material más idóneo para relleno y sellado de un repositorio de RAA, por su muy alto contenido de montmorillonita, gran presión de hinchamiento, baja permeabilidad, aceptable conductividad térmica, buenas propiedades de adsorción y su fácil compactación para fabricación de bloques.

Después de la elección de este yacimiento como bentonita de referencia (denominada muestra o bentonita S-2 en informes y publicaciones), durante varios años anteriores al FEBEX, se han hecho numerosos estudios de caracterización y comportamiento (térmico, hidráulico, mecánico y geoquímico) de esta bentonita. Por consiguiente, existe una extensa base de datos de sus propiedades. Estos datos fueron utilizados en las modelizaciones preliminares para el diseño de los dos ensayos a gran escala del proyecto FEBEX.

Para el FEBEX se adquirieron unas 300 toneladas de bentonita adecuadamente homogeneizada y tratada. Basados en los estudios mencionados, se exigió que la bentonita cumpliera las especificaciones siguientes:

- ❑ Contenido de partículas mayores de 5 mm, inferior al 5%; y fracción de partículas menores de 74 μm , superior al 85%.
- ❑ Límite líquido superior al 90%.
- ❑ Presión de hinchamiento comprendida entre 3,0 y 7,0 MPa, para densidad seca de 1,60 g/cm³.
- ❑ Contenido de humedad, después del tratamiento, entre el 12,5 y el 15,5%.

Un yacimiento de bentonita, por muy homogéneo que sea, tiene variaciones espaciales, tanto horizontalmente como en profundidad. Para un proyecto de investigación como FEBEX, se debe utilizar material tan homogéneo como se pueda conseguir y, además, sus propiedades deben ser determinadas mediante ensayos específicos sobre muestras de ese mismo material; de esta forma se reducen las incertidumbres en las modelizaciones y en la interpretación final de los resultados del experimento. Para la evaluación del comportamiento

(PA) de un repositorio, sin embargo, es necesario conocer el intervalo de variación de las propiedades relevantes de la bentonita en una masiva fuente de aprovisionamiento. Por consiguiente, es importante la comparación de las propiedades de la bentonita S-2 y de la FEBEX, obtenidas en dos fases (niveles) de explotación del yacimiento, con más de cinco años de diferencia entre ellas.

Por otra parte, el plazo disponible para la caracterización de la bentonita FEBEX, en la etapa preoperacional, ha sido de pocos meses, que es un plazo insuficiente para su caracterización detallada, por lo que en las modelizaciones ha sido necesario utilizar algunas propiedades obtenidas en la bentonita S-2.

La comparación de los resultados de las dos series de ensayos de caracterización —bentonita S-2 y bentonita FEBEX— indica que el yacimiento es muy homogéneo, lo que legitima la utilización de ciertos parámetros de la bentonita S-2 para las modelizaciones de la etapa preoperacional. No obstante, existen ciertas diferencias entre las dos series de ensayos, que permiten una evaluación del intervalo de variación de las propiedades. Esta evaluación puede ser utilizada para establecer los límites en los análisis de sensibilidad de las modelizaciones, con lo que se puede tener una primera idea de las consecuencias para la evaluación del comportamiento de un repositorio. Las diferencias también indican la necesidad de una caracterización detallada de la bentonita FEBEX a realizar durante los tres o cuatro años de la etapa operacional, para reducir incertidumbres en la evaluación final de los resultados globales del experimento.

En los apartados siguientes se presentan las conclusiones generales acerca de las propiedades relevantes de la bentonita del yacimiento y las líneas generales del programa de ensayos a realizar durante la etapa operacional.

6.2 Composición mineralógica y química

Composición mineralógica

La bentonita del yacimiento Cortijo de Archidona tiene un muy alto contenido de esmectita dioctaédrica de tipo montmorillonita; además, desde el punto de vista mineralógico, es muy homogénea: el contenido de montmorillonita de las dos bentonitas (S-2 y FEBEX) varía entre el 88 y el 96%. Algunos minerales accesorios son cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico, calcita y tridimita.

Los análisis de CSIC-Zaidín han detectado, en la bentonita FEBEX, la existencia de interestratificados de esmectita/illita, cuyo contenido se estima en un 15%; en la bentonita S-2, sin embargo, no se habían detectado. En esta etapa no se ha determinado la influencia que los interestratificados pueden tener en el comportamiento físico-químico de la bentonita.

Composición química

En la Tabla 6.1 se muestran los valores de algunos elementos mayores de las dos bentonitas.

El contenido de la mayor parte de los elementos, obtenido en los dos laboratorios, es muy similar para ambas bentonitas. Hay, sin embargo, diferencias relativamente grandes entre los dos laboratorios para algunos elementos: K₂O (bentonita S-2), Na₂O y Fe₂O₃ (bentonita FEBEX). No se ha analizado la causa de estas diferencias, ni su influencia en el comportamiento físico-químico.

La bentonita FEBEX muestra una cierta disminución de la salinidad respecto de la S-2, debido básicamente a la disminución de la concentración del ion cloruro.

En la Tabla 6.2, se recogen los valores medios del contenido de cationes de cambio y de la capacidad de cambio (CCC).

Los valores de la concentración de cationes obtenidos en los dos laboratorios, para la bentonita FEBEX, son prácticamente iguales; la CCC difiere debido a que se han empleado diferentes métodos para su determinación (Apartado 4.3.5.). Sin embargo, hay diferencias relativamente grandes no solo entre los resultados de los dos laboratorios para la bentonita S-2, sino también entre la bentonita FEBEX y la S-2, especialmente en los resultados de CSIC-Zaidín; por otra parte, las desviaciones estándar de los dos laboratorios son mayores para los resultados de la bentonita S-2 que para la FEBEX, especialmente en los valores de la CCC. En cualquier caso, parece que la CCC es inferior para la bentonita S-2 que para la FEBEX, lo que puede implicar ciertas diferencias en el comportamiento físico-químico.

6.3 Propiedades de identificación

Los datos que se presentan en la Tabla 6.3 se han llamado propiedades de identificación (siguiendo la terminología de la ingeniería geotécnica), porque permiten obtener una primera idea del tipo de comportamiento físico-químico de una arcilla, mediante ensayos sencillos.

El valor del límite líquido de las bentonitas S-2 y FEBEX es muy similar en los ensayos de CIEMAT y es algo más bajo el obtenido por UPC-DIT para la

Tabla 6.1
Composición química de las bentonitas S-2 y FEBEX

Oxido %	Bentonita S-2		Bentonita FEBEX	
	CSIC-Zaidín ⁽¹⁾	CIEMAT ⁽²⁾	CSIC-Zaidín ⁽³⁾	CIEMAT ⁽³⁾
SiO ₂	59,9	57,3	58,9	59,4
Al ₂ O ₃	18,7	19,6	19,5	18,1
Fe ₂ O ₃	3,6	3,9	3,5	2,9
MgO	5,8	4,7	4,8	4,2
CaO	2,0	2,9	2,5	1,9
Na ₂ O	2,2	1,9	2,3	1,4
K ₂ O	0,7	1,4	1,2	1,1

(1) Valores medios de varias determinaciones. (2) Valores de una sola determinación. (3) Valores medios de cuatro determinaciones

Tabla 6.2
Valores medios del complejo de cambio

Cationes y CCC meq/100 g	Bentonita S-2		Bentonita FEBEX	
	CSIC-Zaidín	CIEMAT	CSIC-Zaidín	CIEMAT
Ca ²⁺	31 ± 6	41 ± 7	47 ± 2	48 ± 4
Mg ²⁺	33 ± 6	31 ± 7	36 ± 2	38 ± 2
Na ⁺	30 ± 3	22 ± 3	26 ± 1	25 ± 1
K ⁺	3 ± 1	2,5 ± 0,4	2,3 ± 0,1	2,2 ± 0,0
CCC	92 ± 12	97 ± 17	106 ± 3	113 ± 6

Tabla 6.3
Propiedades de identificación

Propiedad	Bentonita S-2		Bentonita FEBEX		
	CSIC-Zaidín	CIEMAT	CIEMAT	UPC-DIT	CSIC-Zaidín
Humedad de equilibrio en condiciones de laboratorio, en %		10 a 13	12 a 15		
Límite líquido, en %		105 ± 10	103 ± 4	93 ± 1	
Peso específico		2,78	2,70 ± 0,05		
Granulometría, en %					
Fracción menor de 74 μm	93 ± 3	86	93 ± 1	87	
Fracción menor de 2 μm	82 ± 6	65 ± 1	65 ± 3	45	
Superficie específica, en m ² /g					
Total	614 ± 74	516 ± 37			640 a 659
Externa, BET		37	32 ± 3		

bentonita FEBEX; pero, cualquiera que sea el valor que se considere, es demasiado bajo para una bentonita con tan alto contenido de montmorillonita, que además tiene una relativamente alta concentración de sodio como catión de cambio. El límite líquido es un índice del comportamiento mecánico de una arcilla, por lo que un límite bajo en relación con la mineralogía implica, en principio, que el comportamiento físico de esta bentonita no se corresponde con sus características mineralógicas.

Independientemente de las diferencias en las granulometrías entre las bentonitas S-2 y FEBEX, es necesario resaltar la gran diferencia entre los resultados de CIEMAT y UPC-DIT en el contenido de la fracción inferior a 2 μm (tamaño arcilla). La proporción de la fracción de tamaño arcilla depende del tratamiento previo de la bentonita para la determinación granulométrica. Las diferencias se explican porque en el CIEMAT se ha hecho una dispersión muy intensa utilizando incluso ultrasoni-

dos, mientras que en la UPC-DIT se ha empleado la técnica estándar en geotecnia. O sea, los resultados de una simple determinación granulométrica también pueden ser un índice del comportamiento físico-químico.

Los valores medios de la superficie específica total, muy similares para las bentonitas S-2 y FEBEX, son algo bajos para una bentonita con tan alto contenido de montmorillonita. De hecho, comparados con una montmorillonita media típica, parece que el contenido real de montmorillonita en la bentonita del Cortijo de Archidona debería ser algo inferior al estimado en los análisis mineralógicos, lo que corroboraría la existencia de un cierto porcentaje de interestratificados de esmectita/illita [44]. Asimismo, el valor obtenido para la superficie externa (BET) es algo bajo respecto de los valores medios (que aparecen en la literatura científica) para esmectitas.

El bajo contenido de la fracción menor de 2 μm ya fue señalado en los primeros estudios realizados con la bentonita S-2 [9], y se propuso como explicación el que las partículas más pequeñas pudieran estar aglutinadas o cementadas con sílice coloidal (durante la desvitrificación del material volcánico del que provienen), lo que dificultaría la dispersión de la arcilla, y por tanto la de la separación de la fracción menor de 2 μm . Este argumento está apoyado por el elevado contenido de filosilicatos (62%) encontrados en la fracción mayor de 20 μm [13]. Otra explicación es que la mayor parte del material de tamaño limo y algo del tamaño arena está formado por pseudomorfo de esmectita, que mantienen el tamaño y la forma de los granos de la roca volcánica originaria; los pseudomorfo son relativamente estables y moderarían el comportamiento físico de la bentonita: actúan químicamente como esmectita, pero no tienen el comportamiento físico de una bentonita [98].

En todo caso, parece que el hecho de que exista una fuerte aglomeración de las partículas finas puede explicar los bajos valores del límite líquido y de la superficie específica externa.

En esta etapa del estudio no se ha investigado la influencia que las peculiaridades descritas pueden tener en el comportamiento físico-químico de la bentonita FEBEX. Solamente se ha comprobado que, con varios ciclos de calentamiento (de 150° a 200°C)/enfriamiento, el límite líquido aumenta de 98% a más de 190%.

6.4 Presión de hinchamiento

Para la presión de hinchamiento de la bentonita S-2 se ha determinado una curva de regresión en función de la densidad seca, que se presenta en la Figura 6.1 y está expresada por la ecuación (Apartado 4.4.1).

$$P_s = \exp (5,9 \rho_d - 7,9)$$

donde P_s es la presión de hinchamiento en MPa y ρ_d es la densidad seca en g/cm^3 .

Para la bentonita FEBEX se han hecho dos series de ensayos para densidades secas nominales de 1,60 y 1,70 g/cm^3 . Los valores medios determinados para la bentonita FEBEX son ligeramente superiores a los correspondientes de la S-2 obtenidos aplicando la fórmula anterior: del orden del 7 y 10% para las densidades secas nominales de 1,60 y 1,70 g/cm^3 , respectivamente.

Es posible que realmente exista una diferencia en las presiones de hinchamiento. En cualquier caso, para los efectos prácticos de la evaluación del comportamiento de un repositorio, se puede considerar que no existe diferencia alguna.

6.5 Relación succión/humedad

Para succiones comprendidas entre 2,0 y 385,0 MPa se determinó, para la bentonita S-2, la ecuación empírica (Apartado 2.5.10.)

$$w = 36,1 - 12,0 \log s \quad r^2 = 0,94 \quad 191 \text{ puntos}$$

Para la bentonita FEBEX, UPC-DIT ha obtenido la ecuación (Apartado 4.4.2)

$$w = 40,7 - 14,3 \log s$$

donde, para ambas ecuaciones, w es el contenido gravimétrico de humedad final, expresado en tanto por ciento, y s es la succión en MPa.

También CIEMAT ha hecho ensayos de succión/humedad para la bentonita FEBEX, pero solo para tres valores de la succión, lo que no permite establecer una relación matemática.

En la Figura 6.2 se muestran las curvas de regresión para ambas bentonitas y los puntos obtenidos por CIEMAT para las bentonitas S-2 y FEBEX.

Como se puede observar, las diferencias entre ambas curvas son muy pequeñas, de uno a dos puntos en porcentaje en el contenido de humedad dependiendo del valor de la succión. No obstan-

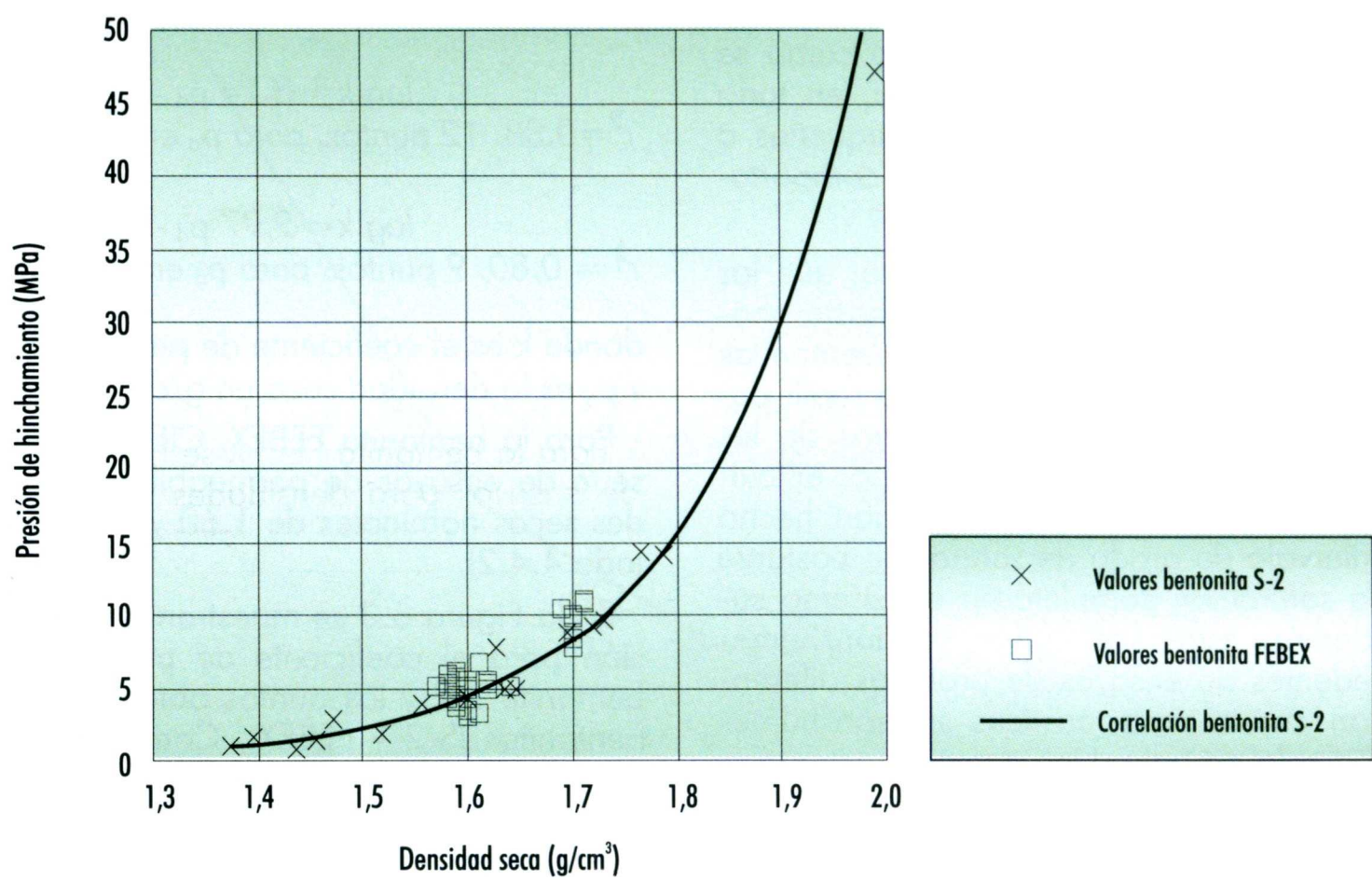


Figura 6.1: Presión de hinchamiento en función de la densidad seca.

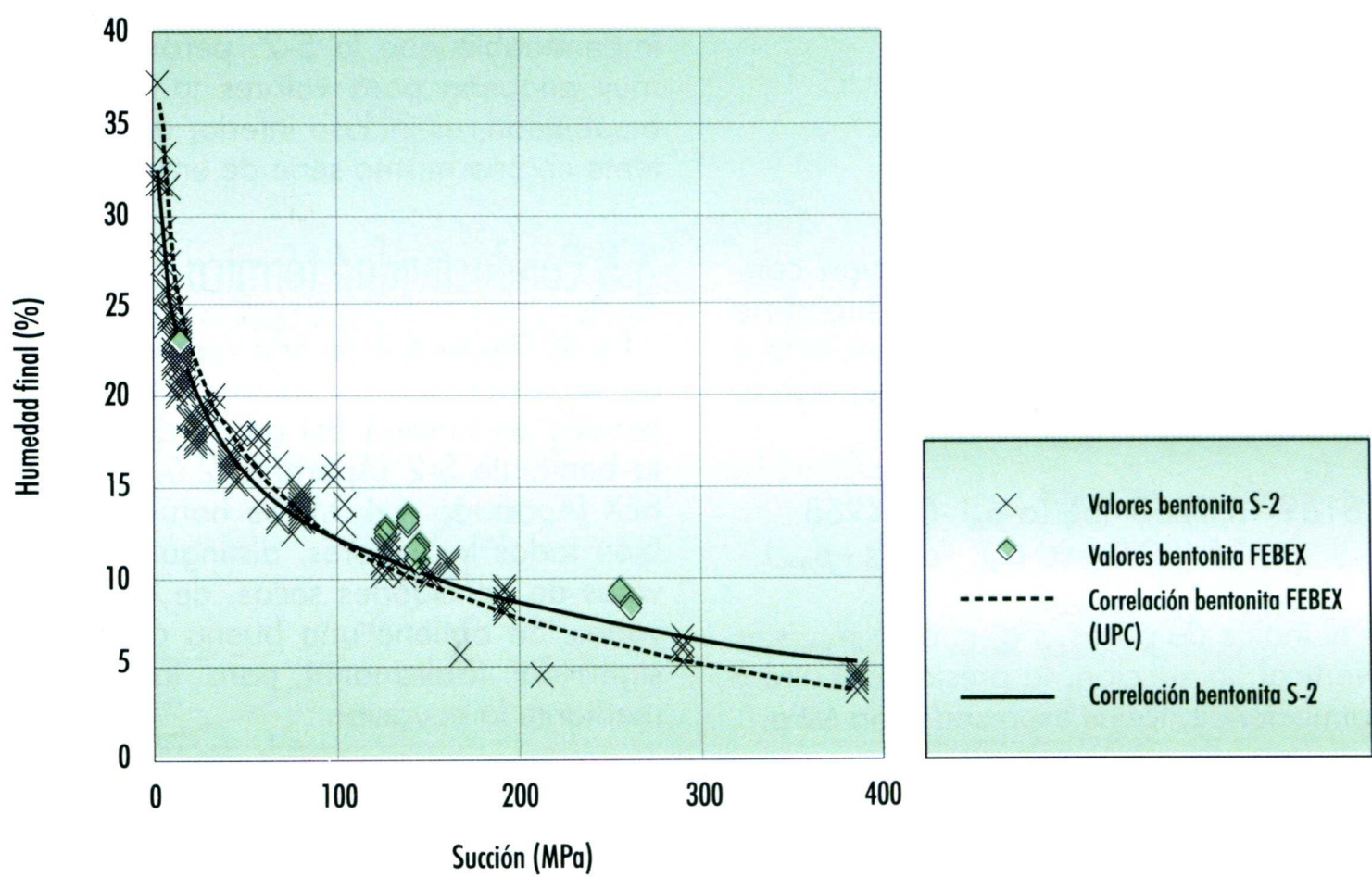


Figura 6.2: Relación succión / humedad.

te, se puede decir que existe una cierta diferencia, que se refleja también en la humedad de equilibrio con las condiciones de laboratorio como se indica en la Tabla 6.3. Las diferencias, en todo caso, entre ambas arcillas, son muy pequeñas a efectos prácticos de la evaluación del comportamiento.

Hay que tener en cuenta, sin embargo, que las relaciones succión/humedad obtenidas hasta ahora en las series de ensayos para las dos bentonitas tienen varias carencias, que es necesario suplir durante la etapa operacional. Los extremos de las curvas no están bien definidos ya que, por dificultades experimentales, los ensayos se han hecho para un intervalo de grado de saturación bastante lejos de la saturación completa en el extremo superior. Además, éstas son curvas succión/humedad procedentes de ensayos de probetas diferentes, no son curvas características succión/humedad de una sola probeta. Una curva característica succión/humedad para trayectoria de humectación difiere de la que se obtiene para trayectoria de desecación y este aspecto no ha sido analizado.

Tampoco se ha definido hasta ahora, con fiabilidad suficiente, la influencia de la temperatura en la relación succión/humedad.

En resumen, durante la etapa operacional, es necesario completar el estudio de la relación succión/humedad, porque además este factor tiene una gran influencia en la predicción del tiempo de saturación de la barrera de arcilla.

6.6 Superficie de estado

Mediante ensayos edométricos de succión controlada, UPC-DIT ha determinado una superficie de estado preliminar, para succión decreciente y con cambios pequeños de tensiones, expresada por la ecuación

$$e = 0,8169 - 0,1268 \log (\sigma - p_a) - 0,04968 \log (s + p_{atm}) + 0,05409 \log (\sigma - p_a) \log (s + p_{atm})$$

donde e es el índice de poros, y σ , s , p_a y p_{atm} son la tensión vertical, la succión, la presión del aire y la presión atmosférica, todas expresadas en MPa.

6.7 Conductividad hidráulica saturada

Para la bentonita S-2 se obtuvo una relación empírica, en probetas saturadas, del coeficiente de

permeabilidad en función de la densidad seca, expresada por las ecuaciones (Apartado 2.5.8)

$$\log k = -8,14 \rho_d - 0,72, \\ r^2 = 0,88, 12 \text{ puntos, para } \rho_d \text{ entre } 1,1 \text{ y } 1,4 \text{ g/cm}^3$$

$$\log k = -2,97 \rho_d - 8,29, \\ r^2 = 0,80, 9 \text{ puntos, para } \rho_d \text{ entre } 1,4 \text{ y } 1,9 \text{ g/cm}^3$$

donde k es el coeficiente de permeabilidad en m/s y ρ_d es la densidad seca en g/cm³.

Para la bentonita FEBEX, CIEMAT ha hecho una serie de ensayos de permeabilidad para densidades secas nominales de 1,60 y 1,70 g/cm³ (Apartado 4.4.2).

En la Figura 6.3 se muestran las líneas de regresión para el coeficiente de permeabilidad de la bentonita S-2 y los puntos obtenidos para las dos bentonitas (S-2 y FEBEX). Como se puede observar, los datos indican que la arcilla FEBEX es más impermeable que la S-2. Si se comparan los valores medios de los coeficientes de permeabilidad para las dos bentonitas, la relación entre los valores de la S-2 y los de la FEBEX es de 1,4 a 1,5, para las densidades secas nominales de 1,60 y 1,70 g/cm³, respectivamente. Un ensayo hecho por UPC-DIT para la bentonita FEBEX da un coeficiente permeabilidad similar al valor medio de la S-2; sin embargo, parece que se debe concluir que la bentonita FEBEX tiene tendencia a ser más impermeable que la S-2, pero es una diferencia muy pequeña para valores tan bajos de la permeabilidad, es incluso inferior a la dispersión existente en una misma serie de ensayos.

6.8 Conductividad térmica

En la Figura 6.4 se han representado las curvas de regresión de los valores de la conductividad térmica en función del grado de saturación, para la bentonita S-2 (Apartado 2.5.11.) y para la FEBEX (Apartado 4.4.3.). Se han representado también todos los valores, distinguiéndolos por intervalos de densidades secas, de las probetas ensayadas. Se obtiene una buena correlación de tipo sigmoidal (Boltzmann) para las dos bentonitas, mediante la ecuación

$$\lambda = A_2 + \frac{A_1 - A_2}{1 + E^{(S_r - x_0)/d_x}}$$

donde λ es la conductividad térmica en W/m · K, S_r es el grado de saturación, A_1 es el valor de λ

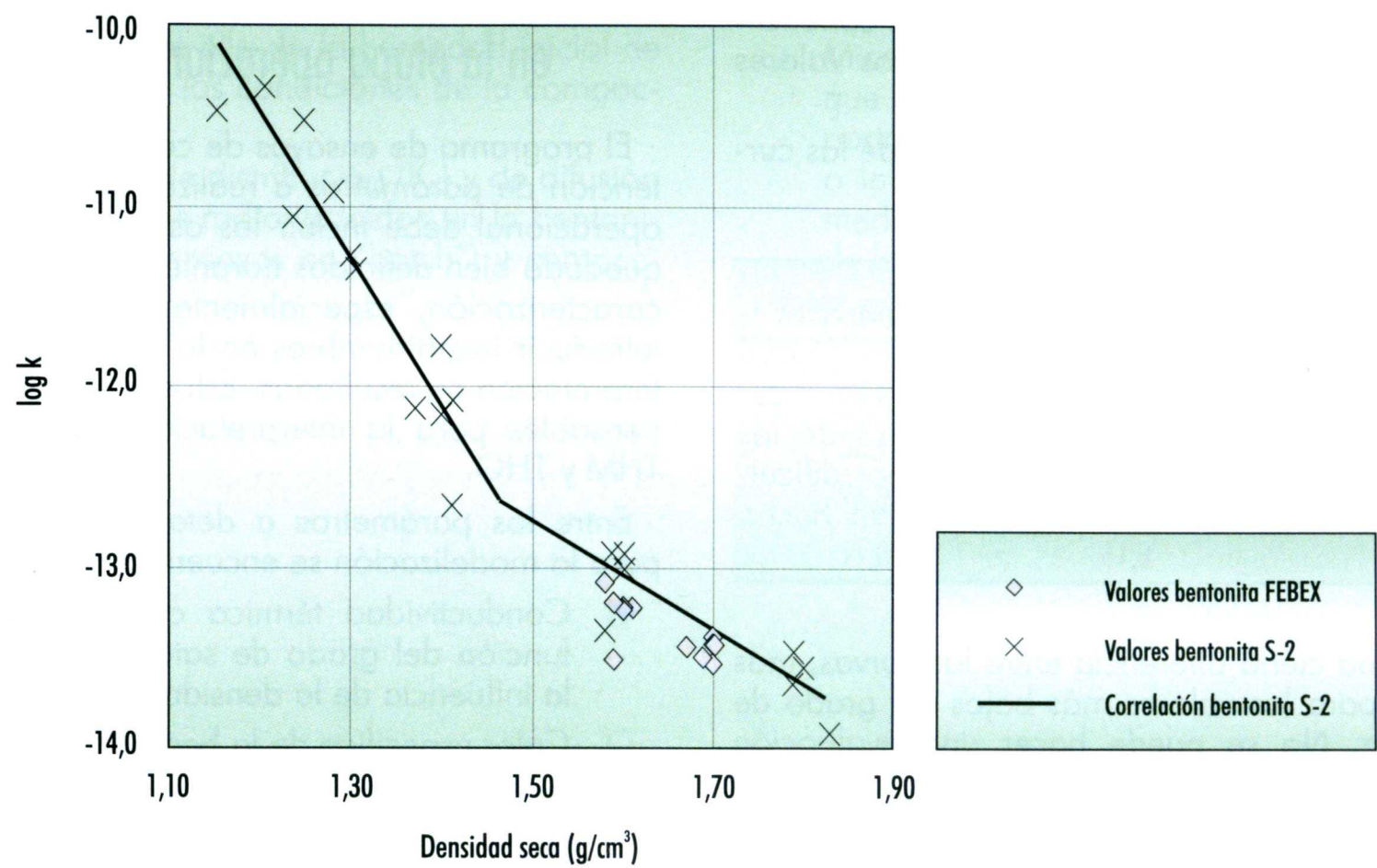


Figura 6.3: Conductividad hidráulica saturada en función de la densidad seca.

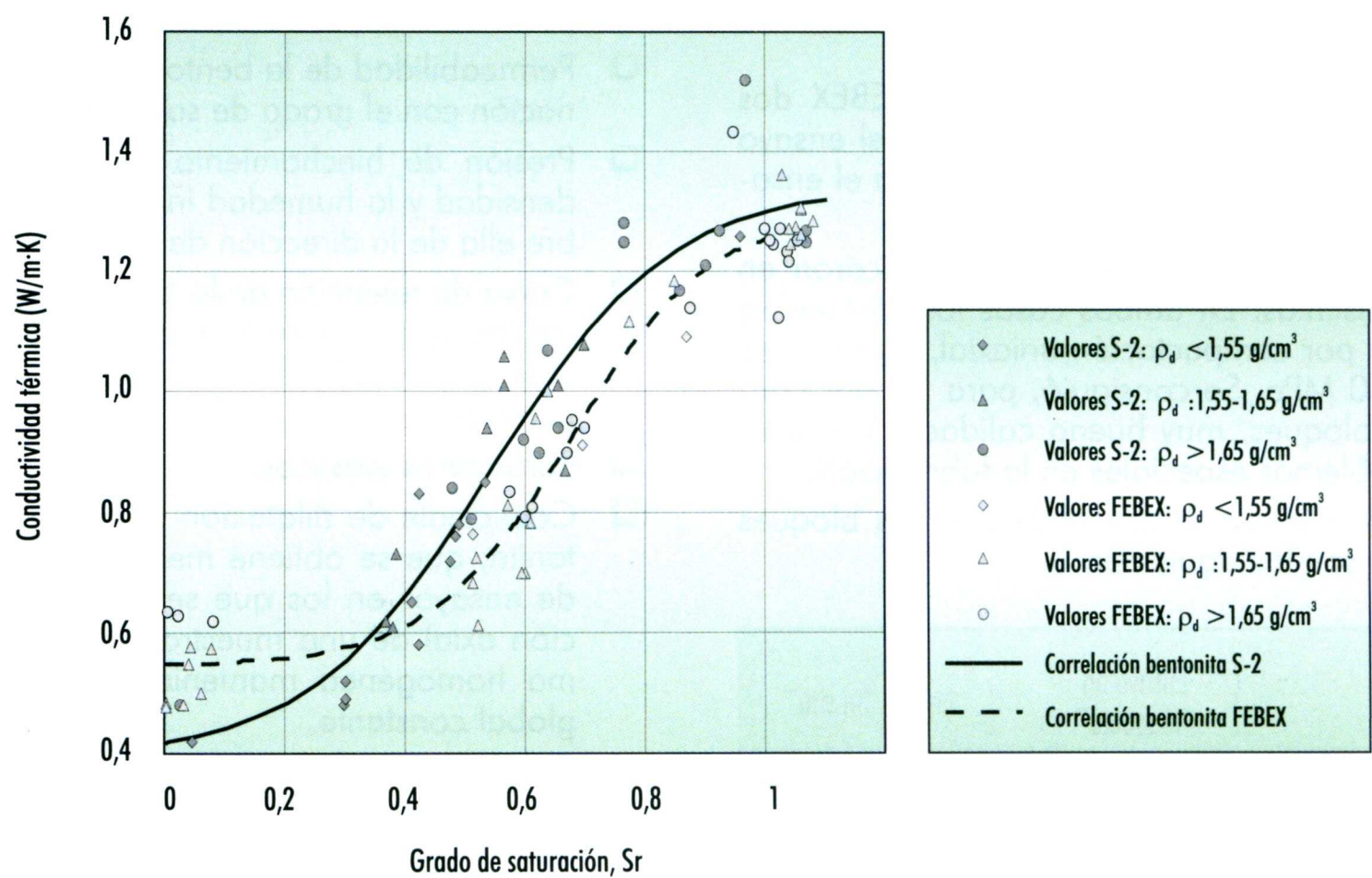


Figura 6.4: Conductividad térmica en función del grado de saturación.

para $S_r = 0$, A_2 es el valor de λ para $S_r = 1,0$, x_0 es el grado de saturación para el cual la conductividad térmica es el valor medio entre los valores extremos, y d_x es un parámetro.

Los parámetros obtenidos en el ajuste de las curvas son los siguientes:

	Bentonita S-2	Bentonita FEBEX
A_1	0,39	0,55
A_2	1,34	1,30
x_0	0,54	0,67
d_x	0,15	0,11

Existe una cierta diferencia entre las curvas, más acusada para los valores más bajos del grado de saturación. No se puede hacer una evaluación clara de las diferencias: por una parte, porque la conductividad térmica aumenta no solo con la humedad sino con la densidad seca; y, por otra, porque para la bentonita S-2 hay solo dos puntos para el extremo inferior del grado de saturación. Pero teniendo en cuenta todos los puntos, parece que este parámetro difiere muy poco entre ambas bentonitas.

6.9 Bloques de bentonita

Se han fabricado con la bentonita FEBEX dos conjuntos de bloques: un conjunto para el ensayo en “maqueta” (Apartado 5.2.) y otro para el ensayo “in situ” (Apartado 5.3.).

Los dos conjuntos de bloques se fabricaron en factorías distintas. En ambos casos los bloques se obtuvieron por compactación uniaxial, a presiones de 40 a 50 MPa. Se consiguió, para los dos conjuntos de bloques, muy buena calidad y no sucedieron problemas especiales en la fabricación.

Las características físicas medias de los bloques fabricados son las siguientes:

	Ensayo en “maqueta”	Ensayo “in situ”
Peso (kg)	25,3 a 25,8	21,3 a 23,1
Densidad seca (g/cm³)	1,76 a 1,82	1,69 a 1,70
Humedad (%)	13,1 a 14,2	13,1 a 14,9

6.10 Líneas generales de la caracterización en la etapa operacional

El programa de ensayos de caracterización y obtención de parámetros a realizar durante la etapa operacional debe incluir los aspectos que no han quedado bien definidos durante la primera fase de caracterización, especialmente los que pudieran introducir incertidumbres en la modelización e interpretación de resultados. Estos ensayos son indispensables para la interpretación de los ensayos THM y THG.

Entre los parámetros a determinar como base para la modelización se encuentran:

- ❑ Conductividad térmica de la bentonita en función del grado de saturación, evaluando la influencia de la densidad seca.
- ❑ Calor específico de la bentonita.
- ❑ Permeabilidad de la bentonita en función del índice de poros en un rango amplio de densidades, y el efecto de la temperatura y la anisotropía.
- ❑ Variación de la permeabilidad en función del grado de saturación, que se determinará mediante retroanálisis en ensayos específicos.
- ❑ Difusividad del vapor de agua en la bentonita, que se determinará de forma indirecta a partir de ensayos de infiltración.
- ❑ Permeabilidad de la bentonita al gas y su variación con el grado de saturación.
- ❑ Presión de hinchamiento en función de la densidad y la humedad inicial y el efecto sobre ella de la dirección de compactación.
- ❑ Curva de retención de la bentonita, incluyendo los valores extremos de saturación, y el efecto sobre ella de la histéresis y de la temperatura.
- ❑ Parámetros elásticos.
- ❑ Coeficiente de dilatación térmica de la bentonita, que se obtiene mediante retroanálisis de ensayos en los que se mide la deformación axial de una muestra calentada de forma homogénea manteniendo su humedad global constante.
- ❑ Otras características básicas de la bentonita que quedaron pendientes de determinar durante la etapa preoperacional y que es necesario conocer tanto para la comprensión de su comportamiento como para la modelización THG son:

- Composición química del agua intersticial extraída por compactación a alta presión, y el efecto sobre ella de la humedad inicial de la arcilla y de las condiciones de la compactación.
- Coeficientes de distribución (K_d) y de difusión (D) de algunos radionucleidos en la bentonita en polvo (ensayos en "batch") y compactada (ensayos en celdas), para evaluar su capacidad de adsorción.
- Microestructura y textura de la bentonita, que pueden determinar aspectos de su comportamiento como la dificultad de dispersión o la relativa baja plasticidad, se estudiarán mediante porosimetría y microscopía óptica de barrido y transmisión.

7

REFERENCIAS

- [1] ENRESA: FEBEX. Full-Scale Engineered Barriers Experiment in Crystalline Host Rock. Test Plan, "In Situ" test. Version 1. Madrid 1995/July/25.
- [2] ENRESA: FEBEX. Full-Scale Engineered Barriers Experiment in Crystalline Host Rock. Test Plan, "Mock-up" test. Version 1. Madrid 1996/January.
- [3] Especificación 70-UPC-H-5-2 revisión 0: Plan de Trabajo de la Experimentación Termo-Hidro-Mecánica durante la Etapa Operacional del Proyecto FEBEX. UPC-DIT. Barcelona, septiembre, 1997.
- [4] Especificación 70-ULC-H-5-1 revisión 0: Plan de Trabajo Integrado de la Modelización y Experimentación Termo-Hidro-Geoquímica. ULC. La Coruña, septiembre, 1997.
- [5] ENRESA (1995): Almacenamiento Geológico Profundo de Residuos Radiactivos de Alta Actividad (AGP). Diseños Conceptuales de Referencia. *Publicación Técnica* N° 11/95. Madrid. 105 pp.
- [6] MINGARRO, E.; RIVAS, P.; VILLAR, L.P. del; CRUZ, B. de la; GOMEZ, P.; HERNANDEZ, A.; TURRERO, M.J.; VILLAR, M.V.; CAMPOS, R.; COZAR, gentlemen. (1991): Characterization of clay (bentonite)/crushed granite mixtures to build barriers against the migration of radionuclides: diffusion studies and physical properties. Task 3-Characterization of radioactive waste forms. A series of final reports(1985-1989)-No.35. *Nuclear science and technology series*. Commission of the European Communities. Luxembourg. 136 pp.
- [7] RIVAS, P.; VILLAR, M.V.; CAMPOS, R.; PELAYO, M.; MARTIN, P.L.; GOMEZ, P.; TURRERO, M.J.; HERNANDEZ, A.I.; COZAR, J.S. & MINGARRO, E. (1991): Caracterización de materiales de relleno y sellado para almacenamiento de residuos radioactivos: bentonitas españolas. CIEMAT-DT-TG *Informe Interno*. Madrid. 196 pp.
- [8] PEREZ DEL VILLAR, L. (1989): Caracterización mineralógica y geoquímica de algunas muestras de bentonita procedentes de la Cuenca terciaria de Madrid (Yuncos, Toledo). CIEMAT *Informe interno*. Madrid. 29 pp.
- [9] PEREZ DEL VILLAR, L. (1989): Caracterización mineralógica y geoquímica de algunas muestras de bentonita procedentes de la provincia de Almería. CIEMAT *Informe interno*. Madrid. 29 pp.
- [10] LINARES, J. et al. (1993): Investigación de bentonitas como materiales de sellado para almacenamiento de residuos radioactivos de alta actividad. ENRESA. *Publicación Técnica* N° 01/93. Madrid. 324 pp.
- [11] CUEVAS, gentlemen. (1992): Caracterización de esmectitas magnéticas de la Cuenca de Madrid como materiales de sellado. Ensayos de alteración hidrotermal. ENRESA. *Publicación Técnica* N° 04/92. Madrid. 183 pp.
- [12] ASTUDILLO, J.; OLMO, C. del; RIVAS, P.; MARTÍN, P.L.; VILLAR, M.V.; PÉREZ DEL VILLAR, L.; PARDILLO, J.; DARDAINE, M. & LAJUDIE, A. (1995): Field test for the demonstration of the emplacement feasibility of clay buffer material as engineered barrier, in crystalline formation. Volume 3. *Nuclear Science and Technology*. EUR 15692/3. Luxembourg. 225 pp.
- [13] PEREZ DEL VILLAR, L.; CRUZ, B. de la & COZAR, J.S. (1991): Estudio mineralógico, geoquímico y de alterabilidad de las arcillas de Serrata de Níjar (Almería) y del Cerro del Monte (Toledo). CIEMAT-DT-TG. *Informe interno*. Madrid. 51 pp.
- [14] VILLAR, M.V. & DARDAINE, M. (1990): Contribución a la selección de una arcilla española como material de relleno de un almacenamiento de combustible irradiado en roca dura. Resultados de la Fase I. Contrato CEA/ENRESA A2845. *Rapport Technique DRDD* n° 244 marzo 1990. 51 pp.
- [15] MARTÍN, P.L. & DARDAINE, M. (1990): Resultados preliminares de compactación uniaxial industrial sobre dos bentonitas españolas seleccionadas: MAC-C de la Cuenca de Madrid y S-2 de la zona de Almería. Resultados de la Fase I. Contrato CEA/ENRESA A2845. *Rapport Technique DSD* 98/17. 57 pp.
- [16] MARTÍN, P.L.; DARDAINE, M. & LAJUDIE, A. (1990): Resultados de compactación uniaxial industrial sobre una bentonita española seleccionada: S-2 de la zona de Almería. Resultados de la Fase I. Contrato CEA/ENRESA A2845. *Rapport Technique DSD* 90/18. 53 pp.
- [17] LINARES, J. et al. (1996): Alteración hidrotermal de las bentonitas de Almería. ENRESA. *Publicación Técnica* N° 06/96. Madrid. 151 pp.
- [18] DELGADO, A. (1993): Estudio isotrópico de los procesos diagenéticos e hidrotermales relacionados con la génesis de bentonitas (Cabo de Gata, Almería). *Tesis doctoral, Universidad de Granada*, 410 pp.
- [19] VILLAR, M.V. & MARTÍN, P.L. (1996): Bentonite buffer: summary of properties, performed and ongoing studies, selection and processing of the material and block manufacturing. Second FEBEX Workshop. Toledo. CIEMAT. *Informe Interno* 70-IMA-L-0-7. 23 pp.
- [20] VILLAR, M.V. (1995): Thermo-Hydro-Mechanical characterization of the Spanish reference clay material for engineered barrier for granite and clay HLW repository: Laboratory and small mock-up testing. ENRESA. *Publicación Técnica* N° 03/95. Madrid. 251 pp.
- [21] VILLAR, M.V. & MARTIN, P.L. (1996): Suction controlled oedometer tests in montmorillonite clay. Preliminary results. In: S.P. Bentley(ed): *Engineering geology of waste disposal*. Geological

Society Engineering Geology Special Publication No. 11. The Geological Society. London. pp. 309-311.

- [22] VILLAR, M.V. (1995): First results of suction controlled oedometer tests in highly expansive montmorillonite. In: E.E. ALONSO & P. DELAGE(eds): *Unsaturated soils. Proceedings of the first international conference on unsaturated soils* (Paris). Balkema. Rotterdam. pp. 207-213.
- [23] THOMAS, H.R.; HE, Y.; RAMESH, A.; ZHOU, Z.; VILLAR, M.V. & CUEVAS, gentlemen. (1994): Heating unsaturated clay - An experimental and numerical investigation. In: I.M. Smith(ed): *Numerical methods in geotechnical engineering. Proceedings of the third european conference on numerical methods in geotechnical engineering* (Manchester). Balkema. Rotterdam. pp. 181-186.
- [24] VILLAR, M.V. & RIVAS, P. (1994): Hydraulic properties of montmorillonite-quartz and saponite-quartz clay mixtures. *Applied Clay Science* 9: 1-9.
- [25] VILLAR, M.V.; FERNÁNDEZ, A.M. & CUEVAS, J. (1997): Caracterización geoquímica de bentonita compactada. Efectos producidos por flujo termohidráulico. *Informe interno CIEMAT/IMA/54A15/6/97 v.1*. FEBEX 70-IMA-M-0-2 revisión 1. Madrid. 51 pp.
- [26] LUIS Y LUIS, P. (1990): Determinación de propiedades físico-químicas de materiales cerámicos. UCM. *Informe Final. Dpto. de Ingeniería Química*. Madrid. 208 pp.
- [27] VILLAR, M.V.; CUEVAS, J.; MARTÍN, P.L.; MARTÍNEZ, B.; MELÓN, A.M. & VALLADARES, J. (1995): Caracterización preliminar del agua intersticial de la barrera de arcilla: preparación de un agua sintética. *Informe interno. CIEMAT/IMA/51C65/1/95*. Madrid. 12 pp.
- [28] MARTÍNEZ, B.; MELÓN, A.M. & VALLADARES, gentlemen. (1996): Preparación de un agua sintética bentonítica-granítica. *Procedimiento CIEMAT/IMA n° PR-X8-01*. Madrid. 12 pp.
- [29] GARCÍA, M.; YLLERA, A. & HERNÁNDEZ, A.I. (1997): Ensayos preliminares de sorción y difusión de radionucleidos en materiales arcillosos. *Informe Técnico CIEMAT/IMA/54A15/2/97*. Madrid.
- [30] RODRÍGUEZ, V.; MINGARRO, M. & GARCÍA BACHILLER, gentlemen. (1997): Estudios microbiológicos de la arcilla de Serrata de Níjar. *Informe Técnico CIEMAT/IMA/57A15/1/97*. Madrid.
- [31] RUIZ, B. & VILLAR, M.V. (1996): Selección, homogeneización y análisis de una partida de bentonita procedente de la cantera "La Serrata" (Almería), para el Proyecto FEBEX. *Informe interno CIEMAT/IMA54A12/6/96*. 70-IMA-L-3-1. Madrid. 27 pp.
- [32] *Procedimiento 70-IMA-G-3-70: Muestreo en cantera. Procedimiento CIEMAT/IMA/X8/BI-B0*.
- [33] *Procedimiento 70-IMA-G-3-71: Procesado de la masa de arcilla. Procedimiento CIEMAT/IMA/X8/BI-B1*.
- [34] Norma UNE 103-300-93: Determinación de la humedad de un suelo mediante secado en estufa.
- [35] *Procedimiento 70-IMA-G-0-05: Granulometría de suelos por tamizado. Procedimiento CIEMAT/IMA/X8/BI-F5*.
- [36] *Procedimiento 70-IMA-G-0-12: Límites de Atterberg: límite líquido y plástico e índice de plasticidad. Procedimiento CIEMAT/IMA/X8/BI-F12*.
- [37] *Procedimiento 70-IMA-G-0-21: Presión de hinchamiento en edómetro. Procedimiento CIEMAT/IMA/X8/BI-F21*.
- [38] *Procedimiento 70-IMA-G-0-11: Determinación de la superficie específica BET. Procedimiento CIEMAT/IMA/X8/BI-F11*.
- [39] AITEMIN (1996): Proceso de homogeneización, secado y muestra de una pila de bentonita en la mina "La Serrata" (Almería). *Informe interno 70-AIT-L-3-01*. Madrid. 30 pp.
- [40] RUIZ, B. (1996): Proceso de una partida de bentonita en Fábrica de Minas de Gádor (Almería) para el Proyecto FEBEX. *Informe interno. CIEMAT/IMA. 70-IMA-L-3-10*.
- [41] AITEMIN (1996): Procesado de bentonita en la planta de Minas de Gádor. *Informe interno 70-AIT-L-3-02*. Madrid. 28 pp.
- [42] VILLAR, M.V. & PELAYO, M. (1996): Characterisation of "La Serrata" clay used in the FEBEX Project. *Informe interno. CIEMAT/IMA/54A14/1/96*. 70-IMA-L-3-15. Madrid. 40 pp.
- [43] PINTADO, X & LLORET, A. (1996): THM laboratory tests in FEBEX Phase 3. UPC-DIT. *Informe interno 70-UPC-L-3-01*. Barcelona. 37 pp.
- [44] JIMENEZ DE CISNEROS, C. (1996): Caracterización mineralógica y geoquímica de la bentonita inicial. Proyecto FEBEX. CSIC-Zaidín. *Informe interno 70-ZAI-L-3-02*. Granada. 23 pp.
- [45] NLT 105/72: Límite líquido por el método de la cuchara. Normas de ensayo del laboratorio de transporte y mecánica del suelo. CEDEX.
- [46] NLT 106/72: Límite plástico. Normas de ensayo del laboratorio de transporte y mecánica del suelo. CEDEX.
- [47] *Procedimiento 70-IMA-G-0-06: Granulometría por sedimentación mediante el método del densímetro. Procedimiento CIEMAT/IMA/X8/BI-F6*.
- [48] NLT 104/72: Granulometría de suelos por tamizado. Normas de ensayo del laboratorio de transporte y mecánica del suelo. CEDEX.
- [49] BS 1377 (1975): Pipette analysis. Methods of test for soils for civil engineering purposes. Test 7. C.

- [50] *Procedimiento 70-IMA-G-0-09*. Peso específico mediante el método del picnómetro. *Procedimiento CIEMAT/IMA/X8/BI-F9*.
- [51] SCHULTZ, L.G. (1964): Quantitative interpretation of mineralogical composition from X-ray and chemical data for the Pierre Shale. *Geological Survey of U.S.A. Professional Paper 591-C*. C1-C31.
- [52] BARAHONA, E. (1974): Arcillas de ladrillería de la provincia de Granada. Evolución de algunos ensayos de materias primas. *Tesis Doctoral*. Universidad de Granada.
- [53] MOORE, D.M. and REYNOLDS, R.C. (1989): Identification of mixed-layered clay minerals. *X-Ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals*. Oxford University Press. 202-240.
- [54] MACKENZIE, R.C. (1970): Differential thermal analysis. Vol. I. Fundamental aspects. Acad. Press. London. 775 pp.
- [55] SÁNCHEZ-LEDESMA, M.D.; MARÍN, J.; SEVILLANO, M.L. & MUNUERA, M.L. (1990): La aplicación de 1-10-Fenantrolina como reactivo cromogénico y solubilizante a la determinación espectrofotométrica de Fe (II) en granitos. *XXII Reunión Biental de la RSEQ*, Salamanca 15-0-19, 239 (resumen).
- [56] SHAPIRO, L. (1975): Rapid analysis of silicate, carbonate and phosphate rocks. *U.S. Geological Survey Bulletin*, Washington, 1401.
- [57] HUERTAS, F. and LINARES, J. (1975): Métodos de análisis de rocas y minerales. Informe interno. *Estación Experimental del Zaidín*. Granada.
- [58] CUADROS, J.; HUERTAS, J.; DELGADO, A. and LINARES, J. (1994): Determination of hydration (H_2O) and structural (H_2O) water for chemical analysis of smectites. Application to Los Trancos smectites, Spain. *Clay Minerals*. 297-300.
- [59] WILSON, M.J. (1987): A handbook of determinative methods in clay mineralogy. Blackie. Glasgow. 308 pp.
- [60] SCHULTZ, L.G. en NEWMAN, A.C.D. (Ed) (1987): Chemistry of clays and clay minerals. *Mineralogical Society. Monograph n° 6*.
- [61] *Procedimiento 70-IMA-G-0-29*: Extracción de sales solubles de una arcilla. *Procedimiento CIEMAT/IMA/X8/BI-Q2*.
- [62] *Procedimiento 70-IMA-G-0-33*: Extracción de sílice libre de una arcilla. *Procedimiento CIEMAT/IMA/X8/BI-Q5*.
- [63] HOLGREM, G.G.S. (1967): A rapid citrate dithionite extractable iron procedure. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 31, 210-211.
- [64] *Procedimiento 70-IMA-G-0-34*: Extracción de cationes intercambiables. *Procedimiento CIEMAT/IMA/X8/BI-Q6*.
- [65] KEELING, P.S. (1961): The examination of clays by IL/MA. *Transactions of The British Ceramic Society*, 60, 217-244.
- [66] *Procedimiento 70-UPC-G-0-02*: Ensayo de hinchamiento bajo carga en edómetro convencional. UPC-DIT.
- [67] *Procedimiento 70-UPC-G-0-04*: Ensayo edométrico con imposición de succión mediante control de la humedad relativa del aire. UPC-DIT.
- [68] *Procedimiento 70-UPC-G-0-06*: Obtención del módulo elástico de corte en ensayo de columna resonante. UPC-DIT.
- [69] *Procedimiento 70-UPC-G-0-07*: Ensayo para caracterizar la rigidez de una junta frente a cargas normales a su plano. UPC-DIT.
- [70] *Procedimiento 70-IMA-G-0-14*: Conductividad hidráulica de materiales arcillosos. *Procedimiento CIEMAT/IMA/X8/BI-F14*.
- [71] *Procedimiento 70-UPC-G-0-05*: Medida directa de la permeabilidad de agua en arcilla. UPC-DIT.
- [72] *Procedimiento 70-IMA-G-0-19*: Relación succión-humedad a 20 °C en desecadores. *Procedimiento CIEMAT/IMA/X8/BI-F19*.
- [73] *Procedimiento 70-UPC-G-0-03*: Obtención de la curva de retención de una arcilla a diferentes temperaturas, mediante imposición de la humedad relativa del aire. UPC-DIT.
- [74] *Procedimiento 70-IMA-G-0-13*: Conductividad térmica. *Procedimiento CIEMAT/IMA/X8/BI-F13*.
- [75] *Procedimiento 70-UPC-G-0-11-ASTM D 4535-85*: Métodos para medición de la dilatación térmica de rocas usando un dilatómetro. UPC-DIT.
- [76] YLLERA, A.; HERNÁNDEZ, A.; GARCÍA, M.; FERNÁNDEZ, A.M.; MARTÍN, P.L.; QUEJIDO, A. & FERNÁNDEZ-DÍAZ, M. (1997): Tracer Selection for the FEBEX Tests. *CIEMAT-IMA. Informe interno 70-IMA-L-3-03*. Madrid.
- [77] MARTÍN P.L.; VILLAR, M.V. & FERNÁNDEZ, F. (1996): Fabricación de bloques para el ensayo en maqueta del Proyecto FEBEX. *Informe interno CIEMAT-IMA54A12/13/96*. 70-IMA-L-3-29. Madrid. 41 pp.
- [78] *Procedimiento 70-IMA-G-0-75*: Inspección del aspecto externo, dimensiones y formas de los bloques de bentonita. *Procedimiento CIEMAT-IMA/X8/BI-B5*.
- [79] *Procedimiento 70-IMA-G-0-77*: Inspección durante la manipulación, embalaje, almacenamiento y transporte de los bloques de bentonita. *Procedimiento CIEMAT-IMA/X8/BI-B7*.

- [80] *Procedimiento 70-IMA-G-0-76: Caracterización de los bloques de bentonita. Procedimiento CIEMAT-IMA/X8/BI-B6.*
- [81] *Procedimiento 70-IMA-G-0-10: Determinación de la densidad aparente y seca mediante el método del desplazamiento por mercurio. Procedimiento CIEMAT-IMA/X8/BI-F10.*
- [82] *Procedimiento 70-IMA-G-0-07: Porosimetría. Procedimiento CIEMAT-IMA/X8/BI-F7.*
- [83] VILLAR, M.V. (1997): Muestreo y caracterización de bloques para el ensayo en maqueta del Proyecto FEBEX. *Informe interno CIEMAT/IMA/54A15/7/97, 70-IMA-L-3-30.* Madrid. 7 pp.
- [84] AITEMIN (1996): Informe final sobre las actividades realizadas por AITEMIN para la construcción de una barrera de bentonita. *Informe interno 70-AIT-L-3-10.* Madrid. 25 pp.
- [85] *Specification 70-AIT-H-3-01: Specification for Bentonite Blocks. AITEMIN.*
- [86] *Specification 70-AIT-H-3-02: Specification of Moulds. AITEMIN.*
- [87] *Plano 70-AIT-K-3-01: Plano de los moldes. AITEMIN.*
- [88] *Procedure 70-AIT-G-3-04: Procedure for Manufacturing and Inspection of Moulds. AITEMIN.*
- [89] AITEMIN (1996): Dossier de calidad sobre la fabricación de los bloques de bentonita.
- [90] *Procedure 70-AIT-G-3-01: Procedure for Manufacturing of Bentonite Blocks. AITEMIN.*
- [91] *Procedure 70-AIT-G-3-02: Procedure for Inspection of Bentonite Blocks. AITEMIN.*
- [92] *Procedure 70-AIT-G-3-05: Procedure for Check External Aspect of Bentonite Blocks. AITEMIN.*
- [93] *Procedure 70-AIT-G-3-06: Procedure for Check Dimensions and/or Form of Bentonite Blocks. AITEMIN.*
- [94] *Procedure 70-AIT-G-3-07: Procedure for Determination of the Humidity in Bentonite Blocks. AITEMIN.*
- [95] *Procedure 70-AIT-G-3-08: Procedure for Determination of the Dry Density of Bentonite Blocks. AITEMIN.*
- [96] Norma ISO 5022/79: Productos refractarios moldeados. Desmuestre y control de recepción.
- [97] *Procedure 70-AIT-G-0-03: Procedure for Handling, Packing and Storage of Bentonite Blocks. AITEMIN.*
- [98] WHITE G.N. & DIXON I.B. (1997): Mineralogical, Physical and Chemical Properties of a Bentonite from Minas de Gador, Spain. *Informe no publicado.* Texas A & M University. 18 pp.

PUBLICACIONES TECNICAS

1991

- 01 REVISION SOBRE LOS MODELOS NUMERICOS RELACIONADOS CON EL ALMACENAMIENTO DE RESIDUOS RADIATIVOS.
- 02 REVISION SOBRE LOS MODELOS NUMERICOS RELACIONADO CON EL ALMACENAMIENTO DE RESIDUOS RADIATIVOS. ANEXO 1. Guía de códigos aplicables.
- 03 PRELIMINARY SOLUBILITY STUDIES OF URANIUM DIOXIDE UNDER THE CONDITIONS EXPECTED IN A SALINE REPOSITORY.
- 04 GEOESTADISTICA PARA EL ANALISIS DE RIESGOS. Una introducción a la Geoestadística no paramétrica.
- 05 SITUACIONES SINOPTICAS Y CAMPOS DE VIENTOS ASOCIADOS EN "EL CABRIL".
- 06 PARAMETERS, METHODOLOGIES AND PRIORITIES OF SITE SELECTION FOR RADIOACTIVE WASTE DISPOSAL IN ROCK SALT FORMATIONS.

1992

- 01 STATE OF THE ART REPORT: DISPOSAL OF RADIOACTIVE WASTE IN DEEP ARGILLACEOUS FORMATIONS.
- 02 ESTUDIO DE LA INFILTRACION A TRAVES DE LA COBERTERA DE LA FUA.
- 03 SPANISH PARTICIPATION IN THE INTERNATIONAL INTRAVAL PROJECT.
- 04 CARACTERIZACION DE ESMECTITAS MAGNESICAS DE LA CUENCA DE MADRID COMO MATERIALES DE SELLADO. Ensayos de alteración hidrotermal.
- 05 SOLUBILITY STUDIES OF URANIUM DIOXIDE UNDER THE CONDITIONS EXPECTED IN A SALINE REPOSITORY. Phase II
- 06 REVISION DE METODOS GEOFISICOS APPLICABLES AL ESTUDIO Y CARACTERIZACION DE EMPLAZAMIENTOS PARA ALMACENAMIENTO DE RESIDUOS RADIATIVOS DE ALTA ACTIVIDAD EN GRANITOS, SALES Y ARCILLAS.
- 07 COEFICIENTES DE DISTRIBUCION ENTRE RADIONUCLEIDOS.
- 08 CONTRIBUTION BY CTN-UPM TO THE PSACON LEVEL-S EXERCISE.
- 09 DESARROLLO DE UN MODELO DE RESUSPENSION DE SUELOS CONTAMINADOS. APLICACION AL AREA DE PALOMARES.
- 10 ESTUDIO DEL CODIGO FFSM PARA CAMPO LEJANO. IMPLANTACION EN VAX.
- 11 LA EVALUACION DE LA SEGURIDAD DE LOS SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE RESIDUOS RADIATIVOS. UTILIZACION DE METODOS PROBABILISTAS.
- 12 METODOLOGIA CANADIENSE DE EVALUACION DE LA SEGURIDAD DE LOS ALMACENAMIENTOS DE RESIDUOS RADIATIVOS.
- 13 DESCRIPCION DE LA BASE DE DATOS WALKER.

1993

- 01 INVESTIGACION DE BENTONITAS COMO MATERIALES DE SELLADO PARA ALMACENAMIENTO DE RESIDUOS RADIATIVOS DE ALTA ACTIVIDAD. ZONA DE CABO DE GATA, ALMERIA.
- 02 TEMPERATURA DISTRIBUTION IN A HYPOTHETICAL SPENT NUCLEAR FUEL REPOSITORY IN A SALT DOME.
- 03 ANALISIS DEL CONTENIDO EN AGUA EN FORMACIONES SALINAS. Su aplicación al almacenamiento de residuos radiactivos
- 04 SPANISH PARTICIPATION IN THE HAW PROJECT. Laboratory Investigations on Gamma Irradiation Effects in Rock Salt.
- 05 CARACTERIZACION Y VALIDACION INDUSTRIAL DE MATERIALES ARCILLOSOS COMO BARRERA DE INGENIERIA.
- 06 CHEMISTRY OF URANIUM IN BRINES RELATED TO THE SPENT FUEL DISPOSAL IN A SALT REPOSITORY (I).

- 07 SIMULACION TERMICA DEL ALMACENAMIENTO EN GALERIA-TSS.
- 08 PROGRAMAS COMPLEMENTARIOS PARA EL ANALISIS ESTOCASTICO DEL TRANSPORTE DE RADIONUCLEIDOS.
- 09 PROGRAMAS PARA EL CALCULO DE PERMEABILIDADES DE BLOQUE.
- 10 METHODS AND RESULTS OF THE INVESTIGATION OF THE THERMOMECHANICAL BEAVIOUR OF ROCK SALT WITH REGARD TO THE FINAL DISPOSAL OF HIGH-LEVEL RADIOACTIVE WASTES.

1994

- 01 MODELO CONCEPTUAL DE FUNCIONAMIENTO DE LOS ECOSISTEMAS EN EL ENTORNO DE LA FABRICA DE URANIO DE ANDUJAR.
- 02 CORROSION OF CANDIDATE MATERIALS FOR CANISTER APPLICATIONS IN ROCK SALT FORMATIONS.
- 03 STOCHASTIC MODELING OF GROUNDWATER TRAVEL TIMES
- 04 THE DISPOSAL OF HIGH LEVEL RADIOACTIVE WASTE IN ARGILLACEOUS HOST ROCKS. Identification of parameters, constraints and geological assessment priorities.
- 05 EL OESTE DE EUROPA Y LA PENINSULA IBERICA DESDE HACE -120.000 AÑOS HASTA EL PRESENTE. Isostasia glacial, paleogeografías y paleotemperaturas.
- 06 ECOLOGIA EN LOS SISTEMAS ACUATICOS EN EL ENTORNO DE EL CABRIL.
- 07 ALMACENAMIENTO GEOLOGICO PROFUNDO DE RESIDUOS RADIATIVOS DE ALTA ACTIVIDAD (AGP). Conceptos preliminares de referencia.
- 08 UNIDADES MOVILES PARA CARACTERIZACION HIDROGEOQUIMICA
- 09 EXPERIENCIAS PRELIMINARES DE MIGRACION DE RADIONUCLEIDOS CON MATERIALES GRANITICOS. EL BERROCAL, ESPAÑA.
- 10 ESTUDIOS DE DESEQUILIBRIOS ISOTOPICOS DE SERIES RADIATIVAS NATURALES EN UN AMBIENTE GRANITICO: PLUTON DE EL BERROCAL (TOLEDO).
- 11 RELACION ENTRE PARAMETROS GEOFISICOS E HIDROGEOLOGICOS. Una revisión de literatura.
- 12 DISEÑO Y CONSTRUCCION DE LA COBERTURA MULTICAPA DEL DIQUE DE ESTERILES DE LA FABRICA DE URANIO DE ANDUJAR.

1995

- 01 DETERMINACION DEL MODULO DE ELASTICIDAD DE FORMACIONES ARCILLOSAS PROFUNDAS.
- 02 UO₂ LEACHING AND RADIONUCLIDE RELEASE MODELLING UNDER HIGH AND LOW IONIC STRENGTH SOLUTION AND OXIDATION CONDITIONS.
- 03 THERMO-HYDRO-MECHANICAL CHARACTERIZATION OF THE SPANISH REFERENCE CLAY MATERIAL FOR ENGINEERED BARRIER FOR GRANITE AND CLAY HLW REPOSITORY: LABORATORY AND SMALL MOCK UP TESTING.
- 04 DOCUMENTO DE SINTESIS DE LA ASISTENCIA GEOTECNICA AL DISEÑO AGP-ARCILLA. Concepto de referencia.
- 05 DETERMINACION DE LA ENERGIA ACUMULADA EN LAS ROCAS SALINAS FUERTEMENTE IRRADIADAS MEDIANTE TECNICAS DE TERMOLUMINISCENCIA. Aplicación al análisis de repositorios de residuos radiactivos de alta actividad.
- 06 PREDICCION DE FENOMENOS DE TRANSPORTE EN CAMPO PRÓXIMO Y LEJANO. Interacción en fases sólidas.
- 07 ASPECTOS RELACIONADOS CON LA PROTECCION RADIOLOGICA DURANTE EL DESMANTELAMIENTO Y CLAUSURA DE LA FABRICA DE ANDUJAR.
- 08 ANALYSIS OF GAS GENERATION MECHANISMS IN UNDERGROUND RADIOACTIVE WASTE REPOSITORIES. (Pegase Project).
- 09 ENSAYOS DE LIXIVIACION DE EMISORES BETA PUROS DE LARGA VIDA.

Títulos publicados

- 10 2º PLAN DE I+D. DESARROLLOS METODOLOGICOS, TECNOLOGICOS, INSTRUMENTALES Y NUMERICOS EN LA GESTION DE RESIDUOS RADIATIVOS.
- 11 PROYECTO AGP- ALMACENAMIENTO GEOLOGICO PROFUNDO. FASE 2.
- 12 IN SITU INVESTIGATION OF THE LONG-TERM SEALING SYSTEM AS COMPONENT OF DAM CONSTRUCTION (DAM PROJECT). Numerical simulator: Code-Bright.

1996

- 01 DESARROLLO DE UN PROGRAMA INFORMATICO PARA EL ASESORAMIENTO DE LA OPERACION DE FOCOS EMISORES DE CONTAMINANTES GASEOSOS.
- 02 FINAL REPORT OF PHYSICAL TEST PROGRAM CONCERNING SPANISH CLAYS (SAPONITES AND BENTONITES).
- 03 APORTACIONES AL CONOCIMIENTO DE LA EVOLUCION PALEOCLIMATICA Y PALEOAMBIENTAL EN LA PENINSULA IBERICA DURANTE LOS DOS ULTIMOS MILLONES DE AÑOS A PARTIR DEL ESTUDIO DE TRAVERTINOS Y ESPELEOTEMAS.
- 04 METODOS GEOESTADISTICOS PARA LA INTEGRACION DE INFORMACION.
- 05 ESTUDIO DE LONGEVIDAD EN BENTONITAS: ESTABILIDAD HIDROTERMAL DE SAPONITAS.
- 06 ALTERACION HIDROTERMAL DE LAS BENTONITAS DE ALMERIA
- 07 MAYDAY. UN CODIGO PARA REALIZAR ANALISIS DE INCERTIDUMBRE Y SENSIBILIDAD. *Manuales.*

1997

- 01 CONSIDERACION DEL CAMBIO MEDIOAMBIENTAL EN LA EVALUACION DE LA SEGURIDAD. ESCENARIOS CLIMATICOS A LARGO PLAZO EN LA PENINSULA IBERICA.

- 02 METODOLOGIA DE EVALUACION DE RIESGO SISMICO EN SEGMENTOS DE FALLA.
- 03 DETERMINACION DE RADIONUCLEIDOS PRESENTES EN EL INVENTARIO DE REFERENCIA DEL CENTRO DE ALMACENAMIENTO DE EL CABRIL.
- 04 ALMACENAMIENTO DEFINITIVO DE RESIDUOS DE RADIATIVIDAD ALTA. Caracterización y comportamiento a largo plazo de los combustibles nucleares irradiados (I).
- 05 METODOLOGIA DE ANALISIS DE LA BIOSFERA EN LA EVALUACION DE ALMACENAMIENTOS GEOLOGICOS PROFUNDOS DE RESIDUOS RADIATIVOS DE ALTA ACTIVIDAD ESPECIFICA.
- 06 EVALUACION DEL COMPORTAMIENTO Y DE LA SEGURIDAD DE UN ALMACENAMIENTO GEOLOGICO PROFUNDO EN GRANITO. Marzo 1997
- 07 SINTESIS TECTOESTRATIGRAFICA DEL MACIZO HESPERICO. VOLUME I.
- 08 3ª JORNADAS DE I+D Y TECNOLOGIAS DE GESTION DE RESIDUOS RADIATIVOS. Pósters descriptivos de los proyectos de I+D y evaluación de la seguridad a largo plazo.
- 09 FEBEX. ETAPA PREOPERACIONAL. INFORME DE SINTESIS.
- 10 METODOLOGIA DE GENERACION DE ESCENARIOS PARA LA EVALUACION DEL COMPORTAMIENTO DE LOS ALMACENAMIENTOS DE RESIDUOS RADIATIVOS.
- 11 MANUAL DE CESARR V.2. Código para la evaluación de seguridad de un almacenamiento superficial de residuos radiactivos de baja y media actividad.

1998

- 01 FEBEX. PRE-OPERATIONAL STAGE. SUMMARY REPORT.
- 02 PERFORMANCE ASSESSMENT OF A DEEP GEOLOGICAL REPOSITORY IN GRANITE. March 1997.
- 03 FEBEX. DISEÑO FINAL Y MONTAJE DEL ENSAYO "IN SITU" EN GRIMSEL.

PUBLICACIONES NO PERIODICAS

1992

PONENCIAS E INFORMES, 1988-1991.
SEGUNDO PLAN DE I+D, 1991-1995. TOMOS I, II Y III.
SECOND RESEARCH AND DEVELOPMENT PLAN, 1991-1995, VOLUME I.

1993

SEGUNDO PLAN DE I+D. INFORME ANUAL 1992.
PRIMERAS JORNADAS DE I+D EN LA GESTION DE RESIDUOS RADIATIVOS. TOMOS I Y II.

1994

SEGUNDO PLAN I+D 1991-1995. INFORME ANUAL 1993.

1995

TERCER PLAN DE I+D 1995-1999.
SEGUNDAS JORNADAS DE I+D. EN LA GESTION DE RESIDUOS RADIATIVOS. TOMOS I Y II.

1996

EL BERROCAL PROJECT. VOLUME I. GEOLOGICAL STUDIES.
EL BERROCAL PROJECT. VOLUME II. HYDROGEOCHEMISTRY.
EL BERROCAL PROJECT. VOLUME III. LABORATORY MIGRATION TESTS AND IN SITU TRACER TEST.
EL BERROCAL PROJECT. VOLUME IV. HYDROGEOLOGICAL MODELLING AND CODE DEVELOPMENT.

Edita:
enresa
empresa nacional de residuos radiactivos, s.a.

Diseño y coordinación editorial: **TransEdit**
Imprime: GRAFISTAFF, S.L.
ISSN: 1134-380X
D.L.: M-27235-1998
Julio de 1998

Existen disponibles ejemplares de diversos números de las Publicaciones Técnicas de ENRESA relacionadas en este apartado. Quienes estén interesados en completar su colección o en disponer de algún título concreto pueden dirigir su solicitud a través del número de fax o dirección de correo electrónico que se detallan a continuación:

Fax: 566 81 65
Correo electrónico: aoll@enresa.es

enresa
empresa nacional de residuos radiactivos, s.a.

Emilio Vargas, 7 - 28043 Madrid
Tfno.: 566 81 00 - Fax: 566 81 69

ABRIL, 1998