

Estudio Experimental de la  
Deformabilidad de un Material  
Geológico:  
Caracterización Inicial e  
Identificación de  
Parámetros

M.V. Villar  
A. Udías  
I. Cañamón  
J. Robles



## **Estudio Experimental de la Deformabilidad de un Material Geológico: Caracterización Inicial e Identificación de Parámetros**

Villar, M.V.; Udías, A.; Cañamón, I.; Robles, J.

52 pp. 33 figs. 25 refs.

### **Resumen:**

Este documento recoge el trabajo realizado por CIEMAT (Unidad de Barreras de Ingeniería y Geológica) en el marco del proyecto de Investigación y Desarrollo Tecnológico BTE2002-04244-C02-02 (DEF-NOSAT). La primera fase de este proyecto consistió en la selección y caracterización de un material geológico apropiado para la experimentación triaxial en estado no saturado. Los resultados obtenidos durante esta fase llevaron a la selección de un suelo arcillo-limoso de Alcalá de Henares (Madrid). Se realizaron ensayos de compactación y permeabilidad y se estudió la posibilidad de mezclarlo con arena en diferentes proporciones. Con las mezclas seleccionadas (porcentajes 70/30 y 50/50 arena/suelo) se han realizado ensayos de compresión isotropa de la muestra saturada que han permitido la determinación de algunos de los parámetros necesarios para la modelización del comportamiento mecánico del suelo. Este informe incluye también una breve descripción de la metodología desarrollada en el Departamento de Matemática Aplicada y Métodos Informáticos de la Universidad Politécnica de Madrid para la obtención de dichos parámetros mediante optimización de los resultados experimentales, así como los resultados obtenidos.

## **Experimental Research on The Deformability of a Geological Material: Initial Characterisation and Identification of Parameters**

Villar, M.V.; Udías, A.; Cañamón, I.; Robles, J.

52 pp. 33 figs. 25 refs.

### **Abstract:**

This document reflects the work performed at CIEMAT (Engineered and Geological Barriers Group) in the framework of the RTD Project BTE2002-04244-C02-02 (DEF-NOSAT). The first phase of the project consisted on the selection and characterisation of a geological material fitted for unsaturated triaxial testing. The result obtained during this phase gave place to the selection of a silty clay from Alcalá de Henares (Madrid, Spain). Compaction and permeability tests were performed as well as studies on mixtures of this soil with sand. With the selected mixtures (70/30 and 50/50 percent sand/soil) isotropic compression tests were carried out in the saturated sample. The results of these tests have allowed the determination of some of the parameters needed to model the mechanical behaviour of the soil. The report includes also a brief description of a methodology developed in the Department of Applied Mathematics and Computer Methods of the Universidad Politécnica de Madrid for getting these parameters by optimisation of the experimental results, as well as the results obtained.



Toda correspondencia en relación con este trabajo debe dirigirse al Servicio de Información y Documentación, Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, Ciudad Universitaria, 28040-MADRID, ESPAÑA.

Las solicitudes de ejemplares deben dirigirse a este mismo Servicio.

Los descriptores se han seleccionado del Thesaurus del DOE para describir las materias que contiene este informe con vistas a su recuperación. La catalogación se ha hecho utilizando el documento DOE/TIC-4602 (Rev. 1) Descriptive Cataloguing On-Line, y la clasificación de acuerdo con el documento DOE/TIC.4584-R7 Subject Categories and Scope publicados por el Office of Scientific and Technical Information del Departamento de Energía de los Estados Unidos.

Se autoriza la reproducción de los resúmenes analíticos que aparecen en esta publicación.

**Depósito Legal:** M -14226-1995

**ISSN:** 1135 - 9420

**NIPO:** 654-06-003-1

## CLASIFICACIÓN DOE Y DESCRIPTORES

S58

DEFORMATION; GEOLOGIC STRUCTURES; SPAIN; CLAYS; MATERIALS TESTING;  
PERMEABILITY; SOILS SAND; PERFORMANCE; COMPRESSION; MECHANICAL  
PROPERTIES

# ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA DEFORMABILIDAD DE UN MATERIAL GEOLÓGICO: CARACTERIZACIÓN INICIAL E IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS

## Indice

1	INTRODUCCIÓN .....	1
2	SELECCIÓN Y PREPARACIÓN DEL MATERIAL.....	1
2.1	Caracterización inicial.....	2
2.1.1	Caracterización básica.....	2
2.1.2	Mineralogía .....	4
2.1.3	Compactabilidad.....	4
2.1.4	Permeabilidad.....	6
2.2	Caracterización de mezclas con arena de cuarzo .....	6
2.2.1	Compactabilidad.....	7
2.2.2	Permeabilidad.....	8
2.3	Curvas de retención.....	8
2.3.1	Mezcla 70 % de arena y 30 % de la muestra AH.....	9
2.3.2	Mezcla 50 % de arena y 50 % de la muestra AH.....	10
3	ENSAYOS DE COMPRESIÓN ISÓTropa.....	11
3.1	Descripción del equipo .....	12
3.2	Metodología .....	14
3.2.1	Montaje.....	14
3.2.2	Saturación.....	15
3.2.3	Compresión y descarga .....	17
3.2.4	Desmontaje .....	17
3.3	Tratamiento de datos .....	18
3.3.1	Saturación.....	18
3.3.2	Compresión.....	19
3.4	Resultados .....	19

3.4.1	Ensayo TSVC1 .....	19
3.4.2	Ensayos en mezclas 70 % de arena y 30 % de la muestra AH.....	20
3.4.3	Ensayos en mezclas 50 % de arena y 50 % de la muestra AH.....	24
3.5	Cálculo de parámetros .....	26
3.5.1	Procedimiento.....	26
3.5.2	Valores obtenidos .....	28
3.6	Análisis de resultados .....	31
4	IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS MEDIANTE OPTIMIZACIÓN.....	33
4.1	Resolución de problemas inversos: generalidades.....	34
4.2	Definición de la función objetivo .....	35
4.3	Técnica de optimización: algoritmos genéticos.....	36
4.4	Resultados de la identificación de parámetros .....	38
4.4.1	Ensayos en mezclas 70 % de arena y 30 % de la muestra AH.....	38
4.4.2	Ensayos en mezclas 50 % de arena y 50 % de la muestra AH.....	40
4.5	Análisis de resultados .....	42
5	RESUMEN Y CONCLUSIONES .....	43
6	AGRADECIMIENTOS .....	44
7	BIBLIOGRAFÍA.....	44

# ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA DEFORMABILIDAD DE UN MATERIAL GEOLÓGICO: CARACTERIZACIÓN INICIAL E IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS

–Proyecto DEFNOSAT–

## 1 INTRODUCCIÓN

El proyecto coordinado “Verificación de una nueva ley de comportamiento para suelos no saturados” financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia se ha llevado a cabo entre CIEMAT y la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), con un objetivo doble:

1. Validar experimentalmente un modelo constitutivo elastoplástico sobre el comportamiento deformacional de suelos no saturados (Robles 2001),
2. Desarrollar una herramienta para la calibración automática y estimación de la incertidumbre de los parámetros del modelo de comportamiento citado que permita definir parámetros de aplicación directa en geotecnia (Rodríguez 1998).

Para la consecución del primer objetivo se abordó la puesta a punto de un equipo triaxial para la realización de ensayos específicamente diseñados en los que se controlen tanto las tres direcciones de tensiones como la succión, sobre un suelo de la Comunidad de Madrid. Simultáneamente se realizó la selección y caracterización del material geológico a utilizar. Todo este trabajo se encuadra dentro del proyecto de CIEMAT “DEF-NOSAT: Estudio experimental de la deformabilidad de un material geológico no saturado” (Proyecto de Investigación y Desarrollo Tecnológico BTE2002-04244-C02-02).

Este informe recoge los trabajos para la selección del suelo y los resultados de su caracterización básica, incluyendo la determinación de las curvas de retención y la realización de ensayos de compresión isótropa en estado saturado. Estos últimos han permitido precisar algunos de los parámetros del modelo de comportamiento mecánico del suelo citado en el Objetivo 1 y comprobar en ellos las técnicas de optimización desarrolladas por la UPM (citadas en el Objetivo 2).

## 2 SELECCIÓN Y PREPARACIÓN DEL MATERIAL

Se eligieron inicialmente dos materiales de la Comunidad de Madrid, con la idea de realizar una primera caracterización previa de ambos a partir de la cual seleccionar uno de ellos para centrar en él el estudio en estado no saturado o hacer comparaciones en un futuro. El material apropiado para este tipo de estudio no debe ser demasiado rígido y debe tener una succión baja, lo que simplifica el equipo experimental y reduce los tiempos de ensayo. Tampoco debe tener una permeabilidad demasiado baja, para no alargar excesivamente los tiempos de ensayo. La comparación con materiales utilizados por otros autores para trabajos semejantes sirvió de orientación. Por ejemplo, el suelo utilizado por Josa (1988) se clasificaría según el

Sistema Unificado de Clasificación de Suelos de la ASTM (USCS) como una arena limosa (SM), y es un suelo granulométricamente muy uniforme en el que prácticamente el total de las partículas pertenecen a la fracción limo. El suelo utilizado por Hoyos (1998) es también una arena limosa (SM) aunque con un porcentaje de fracción arena mucho mayor que el de Josa, ya que por tratarse de un suelo residual la fracción fina está más gradada. El suelo utilizado por Barrera (2002) es una arena arcillosa (SC) bastante bien gradada ( $C_u = 4$ ).

### **Muestra de Villanueva de la Cañada (VC)**

Unos 24 kg de muestra tomada en las proximidades de la Universidad Alfonso X el Sabio (N40°27'12,06'', W3°59'08,23'') se secaron en estufa a 60°C y se disgregaron hasta pasar por el tamiz de apertura 5 mm. Se cuartearon para su almacenamiento.

### **Muestra de Alcalá de Henares (AH)**

Se tomaron unos 60 kg de esta muestra en las proximidades del cementerio de Alcalá de Henares (N40°27'43,27'', W3°21'40,86''), en una formación perteneciente al Terciario de la Cuenca de Madrid (Arcillas marrones y arenas micáceas gris verdosas). Este material se secó al aire, se disgregó hasta pasar por el tamiz de 5 mm y se almacenó en bolsas, con una humedad entre 11 y 13 %.

## **2.1 Caracterización inicial**

Se ha determinado la humedad, límite líquido, límite plástico, granulometría y compactabilidad mediante el ensayo Proctor Normal de las dos muestras seleccionadas. Además se ha realizado su caracterización mineralógica y se ha determinado su permeabilidad. Al resultar ésta excesivamente baja, se ha optado por mezclar las muestras con arena de cuarzo, caracterizándose diversas proporciones.

### **2.1.1 Caracterización básica**

En primer lugar se determinó la humedad ( $w$ ) que tenía la muestra recibida. Se ha determinado por calentamiento en estufa a 110°C durante 24 horas, según el procedimiento establecido en la Norma UNE 103-300, y se expresa como la relación entre el peso de agua perdido y el peso de suelo seco en porcentaje.

El peso específico relativo de las partículas sólidas ( $G_s$ ) se ha determinado en picnómetros utilizando agua destilada como medio de suspensión y siguiendo la Norma UNE 103-302.

Los análisis granulométricos se han realizado sobre la muestra con su humedad higroscópica, siguiendo las Normas UNE 103-102 y 103-101. El primer paso para la realización de las granulometrías es la dispersión de la muestra, que permite que todos los tamaños de partícula queden representados en el análisis. Ésta se ha realizado mezclando 50 g de muestra con su humedad higroscópica con 0,5 L de agua destilada y 5 g de hexametáfosfato sódico y agitando periódicamente durante 18 horas. El análisis granulométrico de las partículas finas se realiza en suspensión mediante densímetro y aplicando la ley de Stokes. Posteriormente, se lava la muestra sobre el tamiz de 74  $\mu\text{m}$  y con la parte retenida, una vez seca en estufa a 110°C durante 24 horas, se realiza el tamizado por una batería de tamices, para obtener la distribución granulométrica de las partículas más gruesas. Se considera tamaño arcilla el inferior a 2  $\mu\text{m}$ , por debajo del cual no se han discriminado tamaños. El tamaño limo está representado por las partículas comprendidas entre 74 y 2  $\mu\text{m}$ , y su clasificación se realiza

mediante sedimentación (Norma UNE 103-102). Las partículas de tamaño comprendido entre 2 mm y 74  $\mu\text{m}$  se consideran de tamaño arena y se han clasificado por tamizado (Norma UNE 103-101).

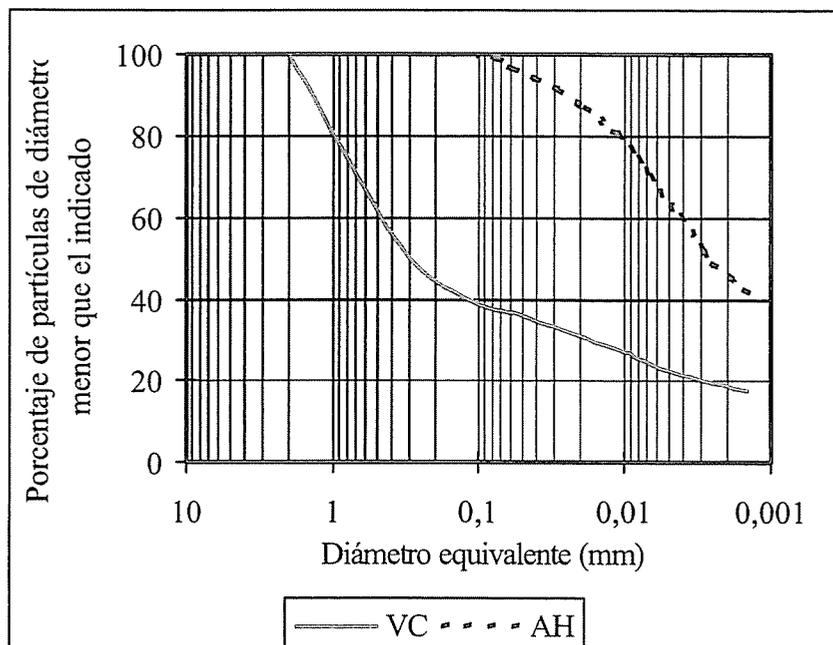
Los límites líquido ( $w_L$ ) y plástico ( $w_P$ ) definen y cuantifican la transición entre el estado líquido, plástico y frágil del comportamiento de un suelo. Concretamente se definen como la humedad gravimétrica a la que un suelo pasa del estado plástico al líquido ( $w_L$ ), y la humedad a la que el suelo pasa del estado plástico al frágil ( $w_P$ ), ambas expresadas en porcentaje. La diferencia numérica entre los límites líquido y plástico se define como índice de plasticidad ( $I_P$ ). El límite líquido se ha determinado según la Norma UNE 103-103 (1994) y el límite plástico según el método descrito en la Norma UNE 103-104 (1993).

Los resultados de la caracterización básica se resumen en la Tabla I.

**Tabla I: Características de las muestras**

	$w$ (%)	$G_s$	$w_L$ (%)	$w_P$ (%)	$I_P$	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)
VC	2	2,66	38	20	18	62	20	17
AH	10-13	2,81	51	27	24	1	58	41

La curva granulométrica de ambas arcillas se muestra en la Figura 1. La curva granulométrica del suelo VC muestra una fracción gruesa uniforme y una fracción fina bien gradada, propia de un suelo residual de una formación geológica reciente (Jiménez & Justo 1971), que en este caso es el granito de Guadarrama.



**Figura 1: Curva granulométrica de las muestras**

Según la clasificación del USDA la muestra VC es un suelo franco arenoso, aunque la plasticidad de su fracción menor de 0,42 mm, según el gráfico de Casagrande, corresponde a la de una arcilla inorgánica de baja plasticidad. La muestra AH es un suelo arcillo-limoso según la clasificación del USDA, y dentro del gráfico de Casagrande quedaría clasificada

como arcilla inorgánica de elevada plasticidad. Según el sistema unificado de clasificación de suelos de la ASTM, que considera conjuntamente los datos de la curva granulométrica y de los ensayos de plasticidad de la fracción fina, la muestra VC es una arena arcillosa SC-SM, y la muestra AH es una “fat clay” CH.

### 2.1.2 Mineralogía

Se han realizado análisis por difracción de rayos X de la muestra total (método del polvo) y de la fracción menor de 2  $\mu\text{m}$  (método de los agregados orientados) de ambas muestras. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla II. Llama la atención el elevado contenido en esmectita de la muestra VC que, como veremos más adelante, se traduce en una permeabilidad muy baja que nos llevó a descartar esta muestra.

**Tabla II: Composición mineralógica semicuantitativa obtenida por difracción de rayos X de las dos muestras (valores en porcentaje en peso)**

Muestra	Cuarzo	Esmectita	Moscovita	Caolinita	Feldespato K	Plagioclasa	Hematíes
VC	40	18	9	2	22	8	-
AH	30	9	39	12	5	5	1

### 2.1.3 Compactabilidad

La compactabilidad de las muestras se ha evaluado mediante la realización de ensayos de compactación tipo Proctor Normal según se describe en la Norma UNE 103-500. En éstos, la muestra mezclada con diferentes cantidades de agua se compacta en capas mediante golpeo con una maza en un molde especial. El ensayo establece la relación entre la humedad del material y la densidad alcanzada para una energía de compactación determinada, que es precisamente la del Proctor Normal (compactación en 5 capas con 12 golpes cada una aplicados con una maza Army de 1,5” cayendo desde 20 cm). La humedad ( $w$ ) y densidad seca ( $\rho_d$ ) se comprueban al final del ensayo mediante pesado de la muestra antes y después de secarla en estufa (Norma UNE 103-300). En el molde utilizado las muestras obtenidas tienen un volumen fijo de 87  $\text{cm}^3$ . La humedad con la que se consigue la máxima densidad se denomina humedad óptima. Los resultados del ensayo se resumen en la Tabla III y se muestran en la Figura 2 para la muestra VC y en la Figura 3 para la muestra AH.

**Tabla III: Resultados de los ensayos de compactación con energía Proctor Normal**

Referencia	$w$ óptima P.N. (%)	$\rho_d$ P.N. ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
VC	14,0	1,80
AH	25,5	1,54

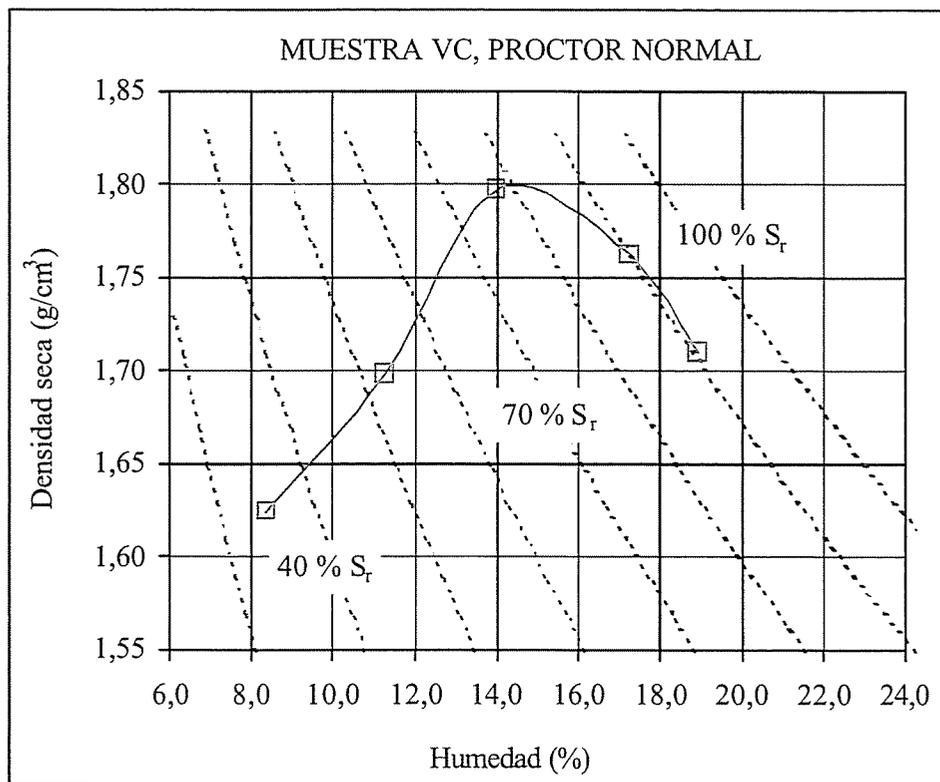


Figura 2: Resultados del ensayo Proctor Normal con la muestra de Villanueva de la Cañada ( $S_r$ : grado de saturación)

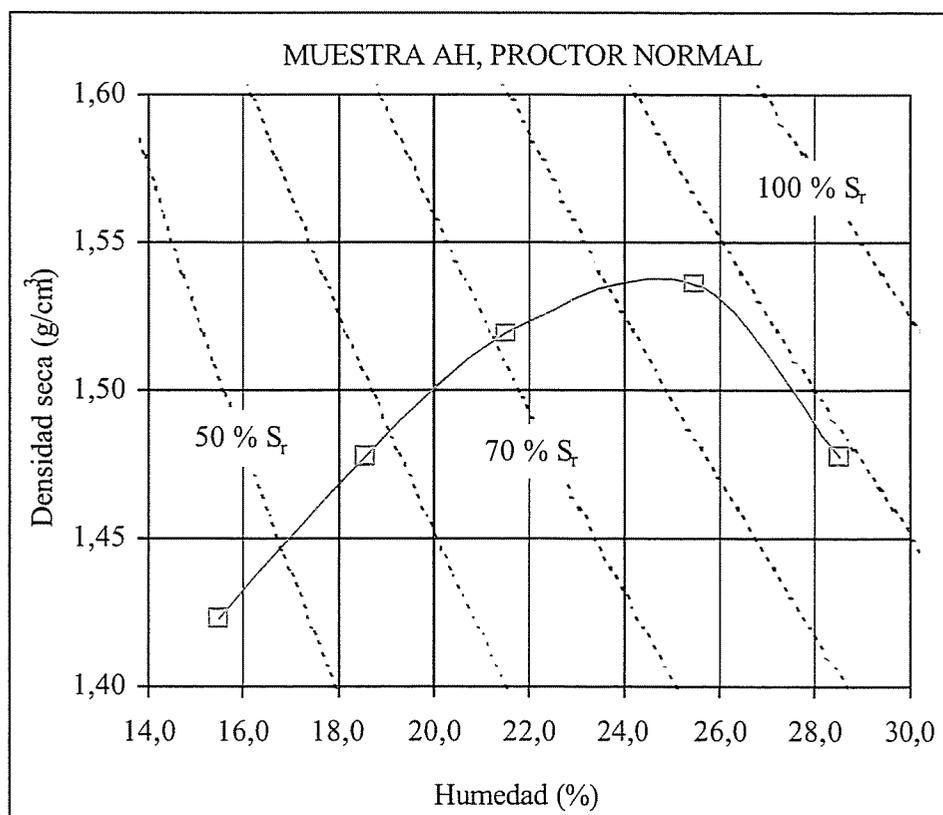


Figura 3: Resultados del ensayo Proctor Normal con la muestra de Alcalá de Henares ( $S_r$ : grado de saturación)

#### 2.1.4 Permeabilidad

Se han compactado probetas en el lado seco de la curva de Proctor Normal y se ha determinado en ellas la permeabilidad después de saturarlas con agua destilada. Para ello se ha medido, en función del tiempo, el volumen de agua que atraviesa la probeta de material confinada lateralmente en una celda triaxial y a la que se impone un gradiente hidráulico entre la parte superior y la inferior. La permeabilidad ( $k_w$ ) se calcula aplicando la ley de Darcy sobre flujo en medios porosos. Para la saturación inicial de la muestra se ha aplicado una presión de inyección de agua de 0,60 MPa en la parte superior e inferior de la probeta, con una presión de confinamiento de 0,65 MPa. La carga hidráulica aplicada una vez saturada la muestra para determinar la permeabilidad ha sido de 0,1 MPa, tras haber incrementado la presión confinante a 0,75 MPa. Al final del ensayo se desmonta la probeta y se pesa y mide antes de determinar la humedad final ( $w$ ) por secado en estufa (Norma UNE 103-300), lo que nos permite comprobar la densidad seca ( $\rho_d$ ) y los grados de saturación ( $S_r$ ) iniciales y finales.

Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla. El método de medida consolida bastante las muestras, por lo que su densidad final ha aumentado. En cualquier caso, los valores obtenidos son muy bajos, por lo que se ha decidido mezclar estas muestras con arena en un porcentaje que aumente la permeabilidad sin aumentar excesivamente la rigidez de las probetas.

**Tabla IV: Resultados de los ensayos de permeabilidad**

Referencia	$\rho_d$ inicial (g/cm <sup>3</sup> )	$w$ inicial (%)	$S_r$ inicial (%)	$k_w$ (m/s)	$\rho_d$ final (g/cm <sup>3</sup> )	$w$ final (%)	$S_r$ final (%)
VC	1,68	10,8	50	$1,4 \cdot 10^{-10}$	1,89	15,0	98
AH	1,49	19,4	66	$5,6 \cdot 10^{-10}$	1,62	23,9	99

## 2.2 Caracterización de mezclas con arena de cuarzo

Se ha utilizado una arena, suministrada por el Instituto Eduardo Torroja, que proviene de Segovia y tiene un contenido de cuarzo superior al 98 %. La arena se suministra en varios tamaños y se han mezclado dos de las fracciones más finas, obteniéndose un material que tiene la curva granulométrica que se muestra en la Figura 4, en la que se observa que el tamaño de la mayor parte de las partículas está comprendido entre 1 y 0,1 mm. Se ha tomado un valor de 2,65 g/cm<sup>3</sup> para su densidad de grano.

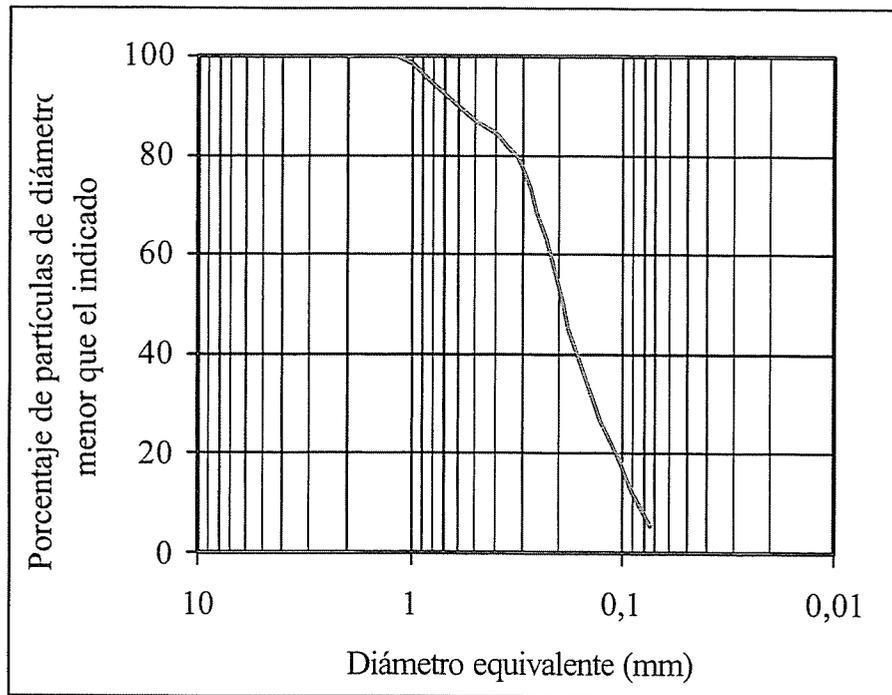


Figura 4: Curva granulométrica de la arena de cuarzo utilizada en las mezclas

### 2.2.1 Compactabilidad

Se comenzó por ensayar mezclas formadas por un 70 % de arena y un 30 % de los materiales seleccionados, con las que se fabricaron probetas con energía de Proctor Normal. La mezcla realizada con la muestra de Villanueva de la Cañada no permitió obtener probetas consistentes, lo que unido a su menor permeabilidad, elevado contenido de esmectita y al hecho de que se dispone de menor cantidad de muestra, llevó a desecharla. Posteriormente se ensayó también una mezcla al 50 % con la arcilla de Alcalá de Henares. Los resultados de los ensayos de Proctor Normal se resumen en la Tabla V, y las curvas se muestran en la Figura 5.

Tabla V: Resultados de los ensayos de compactación con energía Proctor Normal en mezclas de arena y muestra AH

Porcentaje arena	$w$ óptima P.N. (%)	$\rho_d$ P.N. ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
70	12,3	1,96
50	15,4	1,81

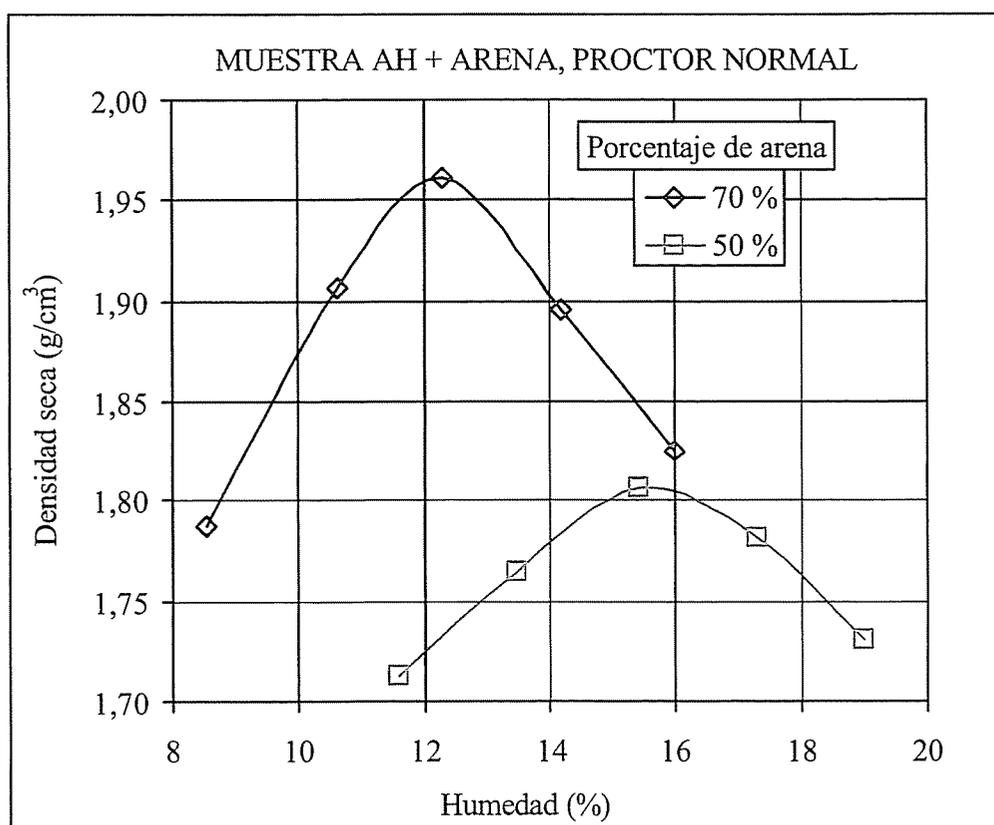


Figura 5: Resultados del ensayo Proctor Normal con la muestra de Alcalá de Henares mezclada con diferentes proporciones de arena

### 2.2.2 Permeabilidad

Se ha determinado también la permeabilidad de cada mezcla en una probeta obtenida por compactación en el lado seco del óptimo, siguiendo la metodología descrita en la sección 2.1.4. Los resultados se muestran en la Tabla VI.

Tabla VI: Resultados de los ensayos de permeabilidad de la muestra AH mezclada con arena

Arena (%)	$\rho_d$ inicial (g/cm <sup>3</sup> )	w inicial (%)	$S_r$ inicial (%)	$k_w$ (m/s)	$\rho_d$ final (g/cm <sup>3</sup> )	w final (%)	$S_r$ final (%)
70	1,90	10,8	69	$6,1 \cdot 10^{-7}$	1,94	14,5	100
50	1,70	11,3	51	$3,3 \cdot 10^{-7}$	1,76	20,6	101

### 2.3 Curvas de retención

La determinación de la curva de retención, es decir, de la relación entre succión y humedad del suelo, es un paso previo a la definición de las trayectorias de ensayo triaxial no saturado, puesto que nos permite conocer el rango de succiones en que el suelo cambia de humedad y

por tanto, en el que es conveniente realizar las trayectorias. Su conocimiento es también necesario para la modelización del comportamiento del suelo.

Las curvas de retención se han determinado en el marco de un proyecto de fin de carrera (Lambert 2004), y en esta sección se resumen los resultados obtenidos. Se han utilizado diferentes métodos, por una parte métodos convencionales, como son las celdas de membrana y los desecadores con soluciones salinas, y por otra, el equipo triaxial con succión controlada GDS. Los ensayos en celdas de membrana y en desecadores se han realizado a 20°C siguiendo el procedimiento descrito en Villar (2000), y el ensayo en el equipo GDS se desarrolló siguiendo el protocolo descrito en Lambert (2004). Tanto las celdas de membrana como el equipo GDS aplican succión matricial mediante la técnica de translación de ejes. Sin embargo, en los desecadores con disoluciones, se aplica succión total. La mayor parte de los ensayos se realizaron con la mezcla 70/30 con el material AH, excepto dos curvas determinadas con la mezcla 50/50 en los desecadores.

### 2.3.1 Mezcla 70 % de arena y 30 % de la muestra AH

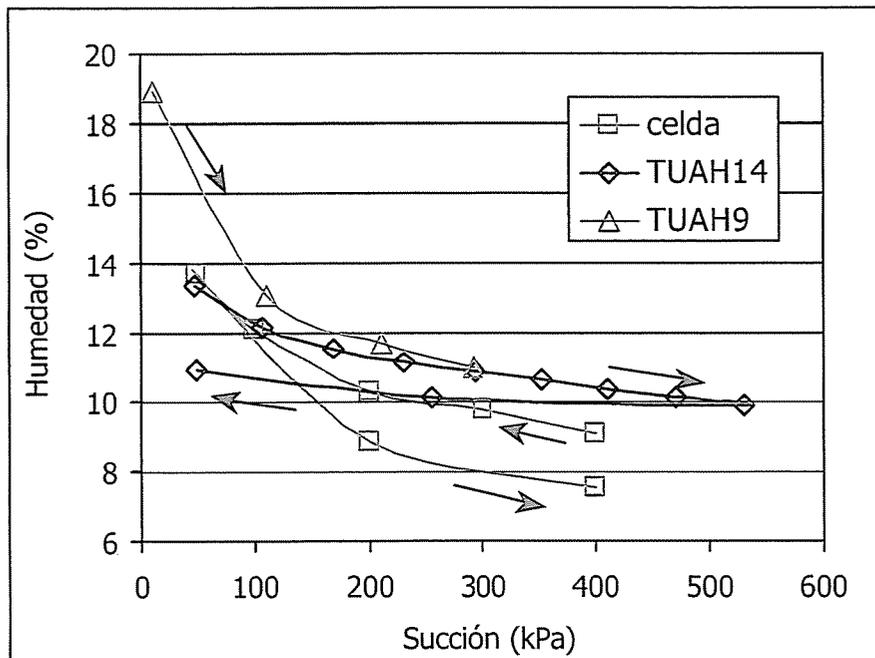
No fue posible obtener curvas coherentes en los desecadores con esta mezcla, probablemente porque el rango de succión que puede ser bien controlado con esta técnica es demasiado alto para este material. Se utilizaron disoluciones de NaCl que generan actividades de agua correspondientes a succiones de entre 457 y 118 kPa.

Sin embargo, las curvas obtenidas con el procedimiento de las celdas de membrana y con el GDS son coherentes, a pesar de los problemas que la utilización del equipo triaxial presentó y de las diferencias en las trayectorias seguidas. Los resultados se muestran en la Figura 6.

Los puntos de la curva obtenida en celdas de membrana corresponden a la media de los valores medidos en cuatro muestras compactadas uniaxialmente a densidad seca de 1,76 g/cm<sup>3</sup> y humedad de 9,3%. Inicialmente se estabilizaron a una succión de 400 kPa, lo que apenas produjo modificación de su humedad inicial. A continuación se sometieron a una humectación hasta 50 kPa para después volver al valor de succión del inicio del ensayo.

Las dos curvas determinadas en el equipo GDS se obtuvieron sobre muestras compactadas por el procedimiento Proctor Normal. Estas muestras se saturaron en un equipo triaxial convencional según se describe en el apartado 3.2.2, y a continuación se montaron en el equipo triaxial de GDS. La probeta correspondiente al ensayo TUAH14 tenía tras compactación una densidad seca de 1,80 g/cm<sup>3</sup> y una humedad de 11,1%. En el momento de montaje en el equipo GDS la humedad de la probeta había aumentado tras la saturación hasta 18,2% y su densidad seca era 1,76 g/cm<sup>3</sup>. Una vez en el equipo, la muestra se sometió a una presión confinante de 1200 kPa bajo la que se realizó una trayectoria de secado desde 47 hasta 529 kPa, seguida de hidratación hasta succión de 49 kPa. El ensayo TUAH9 se realizó sobre una probeta compactada y saturada siguiendo las mismas pautas, pero la trayectoria seguida en el equipo GDS fue exclusivamente de secado desde 10 hasta 290 kPa.

La comparación de las curvas muestra que el rango de succión en que el material presenta variaciones significativas de humedad está por debajo de los 500 kPa, y que la saturación más intensa se produce para succiones por debajo de 50 kPa.



**Figura 6: Curvas de retención para la mezcla 70/30 AH obtenidas con dos métodos siguiendo diferentes trayectorias ( $\rho_a$  inicial 1,76 g/cm<sup>3</sup>)**

### 2.3.2 Mezcla 50 % de arena y 50 % de la muestra AH

Con el objeto de encontrar una explicación a los malos resultados obtenidos en los desecadores, se decidió determinar en ellos la curva de retención de la mezcla 50/50, ya que en principio, su succión debería ser más baja y la técnica más apropiada. Se realizaron dos series de cuatro pastillas cada una, fabricadas por compactación uniaxial de la mezcla con humedad 11,3 % hasta densidad seca de 1,50 g/cm<sup>3</sup>. Se comenzó por la saturación de las muestras a succión nula (utilizando agua desionizada en los desecadores) y su desecación posterior hasta 457 kPa, volviendo a humectarlas después. Los resultados se muestran en la Figura 7. Se concluye que esta técnica es poco apropiada para materiales de succiones bajas, por los errores que se cometen en la preparación de disoluciones salinas de muy baja concentración, necesarias para generar actividades de agua elevadas (es decir, succiones bajas).

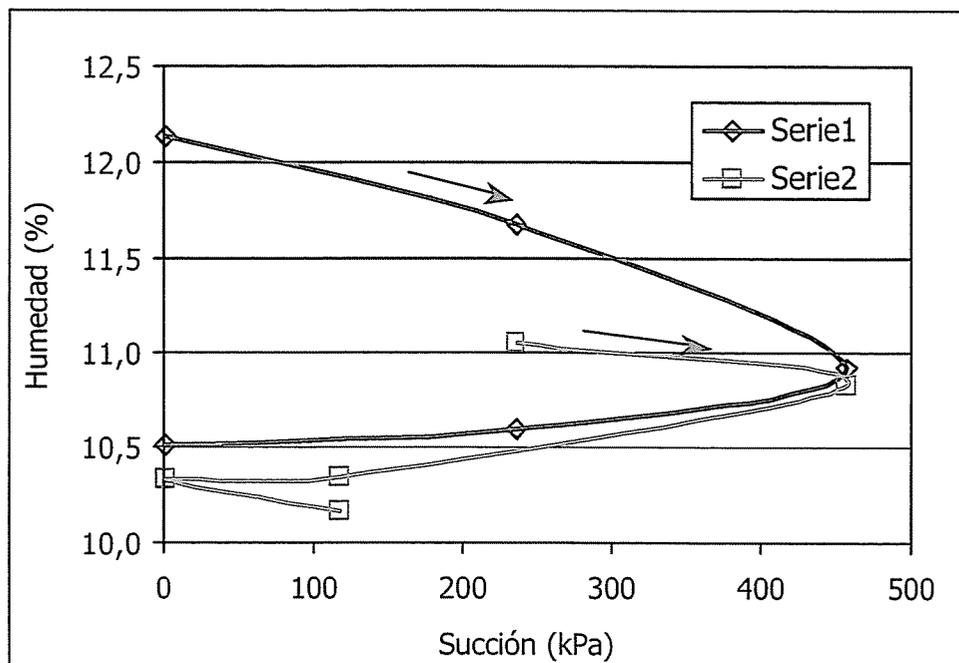


Figura 7: Curvas de retención para la mezcla 50/50 AH obtenidas en desecadores ( $\rho_d$  inicial 1,50  $\text{g}/\text{cm}^3$ )

### 3 ENSAYOS DE COMPRESIÓN ISÓTROPICA

Simultáneamente a la caracterización que se acaba de describir, se iniciaron ensayos de compresión isotrópica en equipo triaxial con el fin de probar el equipo y la metodología así como de aportar otro criterio de selección definitiva del material. Los ensayos han consistido en la saturación de la probeta confinada y posteriormente en el aumento gradual de la tensión efectiva en condiciones drenadas con medida simultánea del volumen de agua expulsado. La serie de ensayos realizada sobre el material seleccionado ha permitido la determinación de los valores de los parámetros saturados del modelo. Los resultados de los ensayos de compresión pueden representarse como volumen específico del suelo ( $v = 1+e$ , donde  $e$  es el índice de poros) en función del logaritmo neperiano de la presión efectiva ( $p'$ ), según se esquematiza en la Figura 8. Los parámetros  $\lambda$  y  $\kappa$  son las pendientes, cambiadas de signo, de la línea de compresión noval y de la de hinchamiento, respectivamente.  $N$  es el volumen específico del suelo normalmente consolidado para una presión efectiva de 1 kPa. La tensión de preconsolidación en estado saturado ( $p_0^*$ ), o máxima tensión previa, marca la transición de la curva de hinchamiento a la virgen.

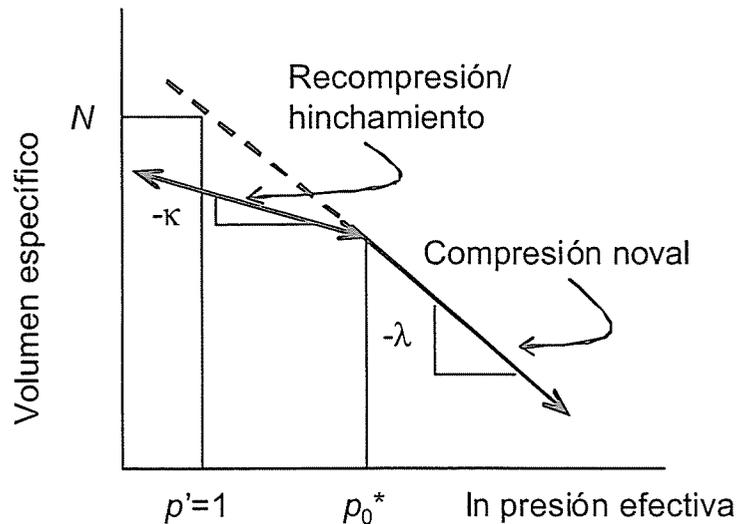


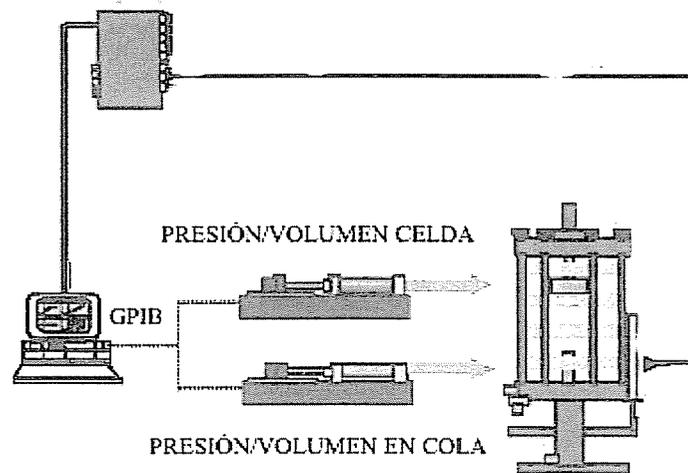
Figura 8: Diagrama de la compresión isotrópica y parámetros definidos

### 3.1 Descripción del equipo

El equipo consta de una célula triaxial, dos controladores de presión/volumen de la marca GDS y un captador de presión intersticial (Figura 9). El transductor y los controladores están conectados a un PC, estos últimos a través de interfaces IEEE. Un programa de adquisición de datos y control específicamente desarrollado en el CIEMAT permite controlar el funcionamiento de los GDS.

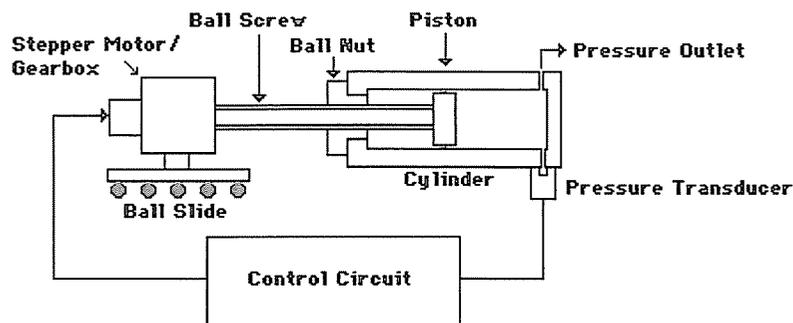
- ✓ Celda triaxial: está constituida por una base y una tapa fabricados en acero y un cuerpo cilíndrico de Perspex reforzado con abrazaderas metálicas. La muestra se coloca entre dos piezas cilíndricas fabricadas en acero endurecido. La pieza inferior (pedestal) está unida a la base de la célula. La base tiene las válvulas apropiadas para permitir el llenado de la celda con el fluido presurizante (agua desionizada y desaireada) y para conectar la parte superior e inferior de la muestra al exterior, permitiéndose su saturación o la medida de presión de poro. La parte superior de la célula está equipada con un pistón móvil que permite la transmisión de cargas axiales a la muestra, aunque durante estos ensayos su posición ha quedado fija.
- ✓ Controlador 1: controlador de presión/volumen estándar de 200 cm<sup>3</sup> de capacidad, que puede aplicar presiones de hasta 2 MPa, con una precisión en la medida del cambio de volumen de 1 mm<sup>3</sup>. Se utiliza para aplicar la presión en cola y saturar la muestra.
- ✓ Controlador 2: controlador de presión/volumen avanzado de 1000 cm<sup>3</sup> de capacidad, que puede aplicar presiones de hasta 2 MPa, con una precisión en la medida del cambio de volumen de 1 mm<sup>3</sup>. Se utiliza para aplicar la presión a la celda, permitiendo la variación de las presiones efectivas.
- ✓ Captador de presión intersticial: conectado a la toma superior de la muestra para medir la presión de poro.
- ✓ Sistema de adquisición de datos en PC, que permite además modificar la presión en el controlador de presión confinante (Controlador 2), pudiendo establecerse rampas de subida o bajada de presión a la velocidad deseada, con el parámetro de control

adicional de que el captador de presión intersticial no supere un valor previamente fijado, lo que haría interrumpir la subida de presión del controlador. La información suministrada por los dos controladores y el captador de presión intersticial es almacenada en un fichero ASCII con la cadencia previamente establecida.



**Figura 9: Esquema del equipo para realización de ensayos triaxiales saturados (modificado de GDS: <http://www.gdsinstruments.com/>)**

Los controladores GDS (Figura 10) utilizan como fluido agua desaireada, que se encuentra dentro del cilindro del controlador y es presurizada y desplazada por un pistón interior. La presión se mide mediante un transductor integrado de estado sólido. El cambio de volumen se mide contando los grados de incremento del motor. La salida del cilindro del controlador está cerrada por una llave de doble vía, conectada a un tubo de llenado/vaciado y otro hacia la celda. Los controladores disponen de una pantalla y un teclado que permiten el establecimiento de presiones o volúmenes objetivo, la programación de rampas y las diferentes operaciones de mantenimiento y funcionamiento.



**Figura 10: Principio operacional de los controladores**

Antes de la realización de los ensayos se ha procedido al tarado de la célula triaxial para conocer su deformación por efecto del aumento y disminución de la presión del fluido. Esto es indispensable para evaluar los cambios de volumen de la probeta durante su saturación, ya que éstos se estiman a partir de los cambios de volumen de fluido en la cámara triaxial. El tarado se ha realizado introduciendo en lugar de la muestra una probeta de PVC de las mismas dimensiones y aumentando gradualmente la presión de la cámara, observando las variaciones de volumen producidas. Se ha realizado también el tarado durante la descarga. Los resultados

obtenidos se muestran en la Figura 11. Con los ajustes obtenidos entre presión y cambio de volumen se calcula la deformación de la celda para cada presión, expresada en  $\text{cm}^3$ . El valor obtenido ( $T$ ) ha de descontarse de los cambios de volumen de la muestra estimados a partir de las variaciones en el Controlador 2.

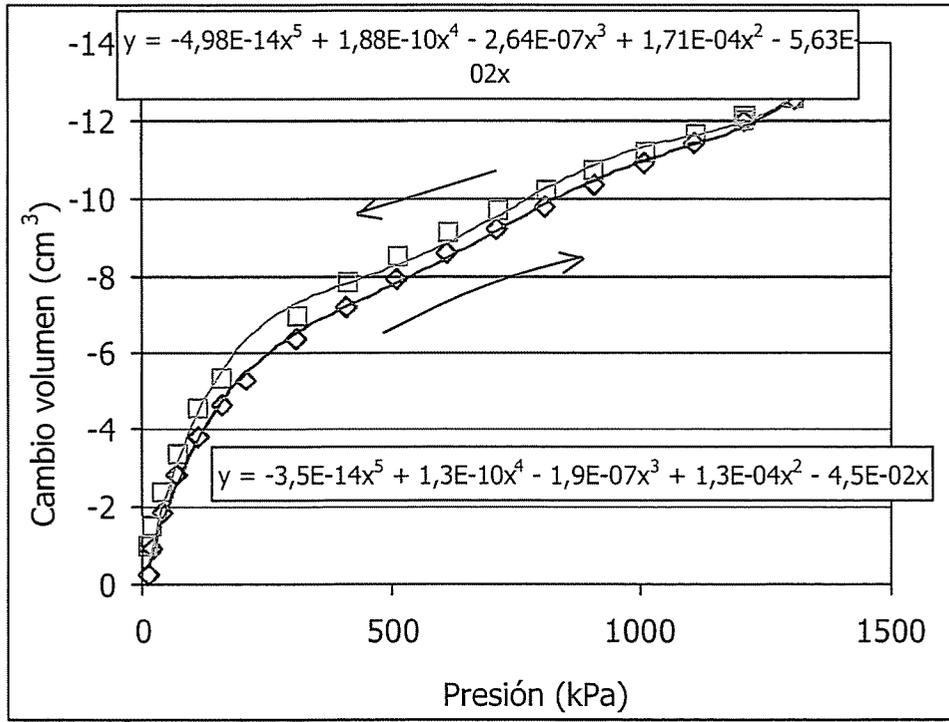


Figura 11: Tarado de la celda triaxial en subida y bajada de presión y relaciones obtenidas entre presión del controlador y cambio de volumen de la celda

## 3.2 Metodología

Los ensayos se han realizado en probetas obtenidas por compactación Proctor Normal en el lado seco del óptimo previamente determinado (sección 2.2.1).

### 3.2.1 Montaje

La probeta –de 3,8 cm de diámetro y 7,6 cm de altura nominales– se enfunda en dos membranas de látex y se coloca sobre el pedestal de la celda, interponiendo un papel de filtro y una piedra porosa. Los mismos elementos se colocan entre la parte superior de la probeta y el cabezal de la celda. Las membranas de látex se sujetan al pedestal y al cabezal mediante anillos elásticos que garanticen la estanqueidad. Se coloca la tapa de la celda, se cierra, y se llena a través de la toma correspondiente con agua desionizada y desaireada utilizando una bomba.

Para el comienzo de los ensayos es necesario poner a punto los controladores GDS. Lo primero que hay que hacer es vaciarlos completamente para asegurarnos de que no existe aire en su interior. Para ello apretamos EMPTY en el teclado del controlador con la llave abierta hacia el tubo de llenado/vaciado. A continuación, para llenarlos con agua desaireada y desionizada se sigue el siguiente procedimiento:

1. Llenamos un poco el controlador por medio del tubo de llenado, apretando FILL, y paramos (STOP) cuando consideremos que el agua ha recorrido todo el tubo y ha entrado en el controlador. De este modo, el aire que pudiese contener el tubo entrará en el controlador junto con el agua.
2. Vaciamos el controlador por medio del tubo de salida hacia la celda, abriendo la llave hacia este tubo, y apretando EMPTY, de manera que salga todo el agua y el aire que hemos introducido anteriormente.
3. Ahora ya estamos seguros de que en el tubo de llenado no existe aire, y dentro del controlador tampoco, por lo que podemos llenar el controlador, abriendo la llave de nuevo hacia el tubo de llenado y haciendo FILL.
4. Una vez lleno, abrimos la llave hacia el tubo de la celda (con éste desconectado de la celda y con el racor abierto) y apretamos EMPTY hasta que salga agua por él, de manera que garanticemos que no ha quedado aire entre el controlador y el final del tubo.
5. Conectamos los tubos de los controladores a la celda dejando las llaves de entrada a la celda cerradas.

Además, se coloca el captador de presión intersticial a la toma conectada a la parte superior de la probeta, cuidando de que esté perfectamente saturado.

### 3.2.2 Saturación

En primer lugar se configura el programa de adquisición de datos, puesto que es importante registrar la fase de saturación de la probeta para conocer su estado al inicio del ensayo de compresión. Para ello es necesario seleccionar los datos que se van a almacenar (que serán los provenientes de los dos controladores y del captador de presión intersticial), el tiempo de toma de datos (que se da en segundos y será de 10 s inicialmente) y el nombre del fichero (que será *TS<sub>xx</sub>\_<sub>#</sub>.dat*, donde *TS* significa Triaxial Saturado, *xx* son las iniciales de la muestra (AH o VC), y es el número de ensayo realizado, y *#* es un número correlativo, comenzando por 1, que se va cambiando con las diferentes etapas del ensayo).

Se preparan los controladores, ajustando en ellos una presión inicial objetivo. Las presiones iniciales serán 0 kPa para el controlador de presión en cola, y 5 kPa para el controlador de presión de celda. Una vez ajustadas estas dos presiones en los controladores mediante la opción TARGET PRESSURE y estabilizados los volúmenes, se abren las llaves a celda, primero la de presión confinante y después la de presión en cola. Se anotan en el impreso de ensayo los volúmenes registrados por los controladores antes y después de la apertura de las llaves a celda.

A continuación se configura una rampa de subida de presión para el controlador de presión en cola mediante la opción RAMP, siguiendo las instrucciones del manual. Para configurar la rampa han de introducirse los siguientes parámetros en el teclado del controlador:

**Tabla VII: Configuración de rampa de subida de presión en controlador de presión en cola**

Mensaje en el display	Entrada manual	Significado
Slope CMD	9	Intervalo de toma de medida en segundos
Slope	1	Intervalo de tiempo (en s) para un cambio de 1 kPa
Lower val.	0	Valor mínimo de la rampa de P
Upper val.	100	Valor máximo de la rampa de P
Execute CMD	23 / 55	Tipo de rampa: subida de P / bajada de P
OK to continue?	No	Nos permite revisar todos los parámetros introducidos, hasta llegar de nuevo a este punto

La rampa de subida de la presión confinante se configura en el sistema de control del PC. Ha de darse también un valor mínimo y máximo de presión, que serán respectivamente 5 y 110 kPa. Para evitar que la subida de presión se interrumpa, es necesario fijar un valor alto para el límite de presión intersticial. Para ello, un valor de 1 kg/cm<sup>2</sup> será suficiente. Para ajustar la velocidad de subida de presión en el programa de control ha de darse un valor de subida de presión unitario (en kPa) y un tiempo para alcanzarlo (en segundos). La velocidad de subida ha de ajustarse a la que se ha fijado para la subida de presión en cola, por tanto, ha de fijarse un valor de 1 kPa por 1 s.

Tras realizar todas las operaciones mencionadas se inicia la saturación siguiendo los siguientes pasos:

- 1) Se pone en marcha el programa de control del PC, con lo que se inicia la subida de presión confinante.
- 2) Se contesta "Yes" al mensaje del display de controlador de presión en cola "OK to continue?"; con lo que se inicia la subida de presión en cola.

Las dos presiones deben subir simultáneamente, manteniéndose siempre por encima la presión confinante, pero no excesivamente, para no producir consolidación de la muestra. Una vez estabilizadas las presiones y cuando los cambios de volumen son menores, conviene configurar un nuevo ensayo (*TS<sub>xy</sub>\_2.dat*) con un intervalo de toma de datos mayor (por ejemplo 5 minutos). Para ello se detiene el ensayo en marcha en el PC, se cambian las presiones de consigna en el PC (la inferior y la superior) a 110 kPa, para que ya no se modifiquen, se configura el nuevo ensayo y se pone en marcha. Transcurrida una hora, el intervalo de toma de datos puede fijarse en 1 hora, configurando un nuevo ensayo.

Transcurridos unos días, cuando se observa que ya no hay entrada de agua, conviene hacer salir el aire que haya podido quedar ocluido en la muestra. Para ello se cierra la toma superior de la muestra y se conecta a una bureta graduada en la que se fija la lectura al valor que quede a nivel con la parte superior de la probeta. Se detiene el ensayo en marcha y se configura uno nuevo con un intervalo de medida de 10 segundos. Se pone en marcha el ensayo y simultáneamente se abre la toma superior. Esto provoca inicialmente la salida de aire, y a continuación la salida de agua por la parte superior de la probeta. La lectura de la bureta se inicia al abrir la toma superior y se realiza cada 10 segundos. Cuando se ha completado el recorrido de la bureta se cierra la toma superior y transcurridos unos minutos

para estabilización se vuelve a configurar un ensayo con un intervalo de toma de datos de una hora.

Este proceso puede repetirse dos o tres veces en días sucesivos, hasta asegurarnos de que no queda aire en la probeta y conductos. Como se produce un gasto importante de agua en el controlador de presión en cola, es necesario comprobar que no se agota, y cuando esté próximo a agotarse, se cerrarán las llaves a celda y se recargará el controlador según se explica en la sección 3.2.1. Se vuelve a fijar la presión objetivo en 100 kPa mediante la opción TARGET PRESSURE y se abren las llaves a celda. Esto produce un cambio en la lectura de volumen que ha de tenerse en cuenta en el tratamiento de los datos.

### 3.2.3 Compresión y descarga

Una vez saturada la probeta se procede a su compresión por aumento de la presión confinante, manteniendo la presión en cola en un valor constante de 100 kPa, lo que permite el drenaje de la probeta por la toma inferior. La subida de presión debe ser lo suficientemente rápida como para que no se llegue a producir consolidación secundaria en la muestra y lo suficientemente lenta como para garantizar que la compresión se produce en condiciones drenadas. La compresión debe realizarse a una velocidad que permita la disipación de presiones intersticiales y por tanto, el captador de presión intersticial conectado a la toma superior de la probeta saturada no debe registrar presiones muy superiores a la presión fijada por el controlador de presión en cola. Durante todo el proceso la toma superior de la probeta permanece abierta y conectada al captador de presión intersticial.

La compresión se ha realizado en dos etapas separadas por un episodio de descarga. En la primera etapa se incrementa la presión confinante de 110 a 700 kPa. Este incremento se configura en el programa de control del PC, fijando las presiones iniciales y finales y un ritmo de incremento de entre 120 y 400 s/kPa. El límite de incremento de la presión intersticial (que estará en valores próximos a 1 kg/cm<sup>2</sup> tras la saturación) será de 0,05 kg/cm<sup>2</sup>. Este valor es el que realmente determina la velocidad del ensayo, ya que no se producirán incrementos de presión confinante que lleven a incrementos de la presión intersticial superiores al establecido. Es conveniente iniciar un nuevo ensayo con un intervalo de toma de datos de 3600 s.

Una vez alcanzado el valor de 700 kPa de presión confinante, se procede a la descarga, configurando un nuevo ensayo en el PC en el que el valor de la presión inicial del Controlador 2 sea 700 kPa y el final 110 kPa. Alcanzado este valor se procede a la recarga hasta 1300 kPa siguiendo las pautas ya indicadas.

### 3.2.4 Desmontaje

Finalizada la compresión se reduce la presión en cola a 0, fijando este valor en el controlador con la opción TARGET PRESSURE. Inmediatamente se reduce de la misma manera la presión en el Controlador 2. Para liberar este controlador del control del PC es necesario apretar las teclas RESET y ENTER simultáneamente. Se desconectan los controladores y el captador de presión de la celda, se vacía la celda, y se desmonta la probeta, quitando las membranas de látex con cuidado de no desmoronarla. Se pesa y se mide y se introduce en estufa a 110°C para determinar su peso seco y su humedad según lo establecido en la Norma UNE 103-300.

### 3.3 Tratamiento de datos

El sistema de adquisición de datos genera ficheros ASCII que pueden ser directamente importados en una hoja de cálculo Excel. Con los datos iniciales de la probeta (dimensiones, humedad, peso) y las lecturas de los controladores (presiones y volúmenes) se calcula la evolución de diversos parámetros durante el ensayo. Los datos de partida y obtenidos a lo largo del ensayo son:

Peso inicial (g),  $P_i$

Peso seco (g),  $P_s$

Volumen inicial ( $\text{cm}^3$ ),  $V_i$

Humedad inicial (%),  $w_i$

Peso específico de partículas sólidas,  $G_s$

Volumen inicial Controlador 1 (en cola) ( $\text{mm}^3$ ),  $V_{1i}$

Volumen Controlador 1 ( $\text{mm}^3$ ),  $V_1$

Presión Controlador 1 (kPa),  $P_1$

Volumen inicial Controlador 2 (confinante) ( $\text{mm}^3$ ),  $V_{2i}$

Volumen Controlador 2 ( $\text{mm}^3$ ),  $V_2$

Presión Controlador 2 (kPa),  $P_2$

Deformación de la celda en función de la presión del Controlador 2 ( $\text{cm}^3$ ),  $T$  (sección 3.1)

#### 3.3.1 Saturación

La entrada de agua a la probeta durante la saturación viene dada por el cambio de volumen del Controlador 1 ( $V_{1i}-V_1$ ). Este incremento de volumen permite calcular la evolución de humedad de la muestra (Ec. 1). Durante los episodios de conexión de la toma superior a bureta, ha de descontarse del cambio de volumen del Controlador 1 el volumen de salida de agua medido en la bureta.

$$w = \left( \frac{P_i + \left( \frac{V_{1i} - V_1}{1000} \right) - P_s}{P_s} \right) \times 100 \quad \text{Ec. 1}$$

Por otra parte, el cambio de volumen de la probeta durante la saturación ( $\Delta V$ ) se calcula a partir del cambio de volumen registrado por el Controlador 2, restando el valor correspondiente al tarado ( $T$ ), que en este caso es constante, puesto que la presión confinante se mantiene fija durante la saturación. El conocimiento del cambio de volumen de la muestra, aunque aproximado, nos permite recalculer su densidad seca ( $\rho_d$ ) durante el proceso de saturación (Ec. 2).

$$\rho_d = \frac{P_s}{V_i + \left( \frac{V_2 - V_{2i}}{1000} \right) - T} \quad \text{Ec. 2}$$

Normalmente, el cambio registrado por los controladores al principio del ensayo corresponde al llenado de los conductos de saturación y a la saturación de la piedra porosa, por lo que no ha de tenerse en cuenta al calcular la humedad o la deformación de la probeta.

Con los nuevos valores de humedad y densidad se calcula la evolución del grado de saturación.

### 3.3.2 Compresión

Durante la compresión se calcula la evolución de la humedad como se explicó en la sección anterior (Ec. 1), pero considerando como volumen inicial del Controlador 1 el medido al principio de la compresión, y como peso inicial de la probeta, el del final de la saturación.

El volumen de la muestra necesario para calcular la densidad seca se calcula a partir del volumen alcanzado al final de la saturación más los incrementos registrados por el Controlador 1 durante la compresión. Es decir, se considera que el volumen de agua expulsada por la probeta se corresponde exactamente con el cambio de volumen experimentado por ésta. Como comprobación adicional puede calcularse también el cambio de volumen de la muestra a partir de los cambios medidos por el Controlador 2, restándole los cambios debidos a la deformación de la celda, es decir, el tarado, que en este caso varía durante todo el proceso y es diferente para las trayectorias de aumento de presión y de disminución (Figura 11).

La presión efectiva en la parte inferior de la probeta se calcula como diferencia entre la presión registrada por el Controlador 2 y la registrada por el Controlador 1. En la parte superior de la probeta viene dada por la diferencia entre la presión registrada por el Controlador 2 y el captador de presión intersticial. Si el ensayo se realiza a la velocidad adecuada no debe haber gran diferencia entre la presión efectiva en la parte superior y la inferior de la probeta. A la hora de representar los resultados, se toma el valor medio de ambas.

## 3.4 Resultados

### 3.4.1 Ensayo TSVC1

Se realizó un primer ensayo de prueba con una probeta de muestra VC obtenida por compactación PN en el lado seco del óptimo. Al ser un ensayo preliminar no se siguieron exactamente las pautas que se han descrito en la sección 3.2. Inicialmente se saturó la probeta con agua desionizada y desaireada inyectada a una presión de 10 kPa mientras la presión de cámara se mantenía en 20 kPa. Durante la saturación la toma superior permaneció abierta a la atmósfera y conectada a una bureta graduada en la que se midió la salida de agua. Mantener la toma superior abierta a la atmósfera favorece la evacuación del aire atrapado en los poros de la muestra y hace más efectiva la saturación.

Tras saturar la probeta se procedió a su compresión, para lo que se fue aumentando la presión de celda (Controlador 2) mientras la presión en cola permanecía constante (10 kPa). Durante

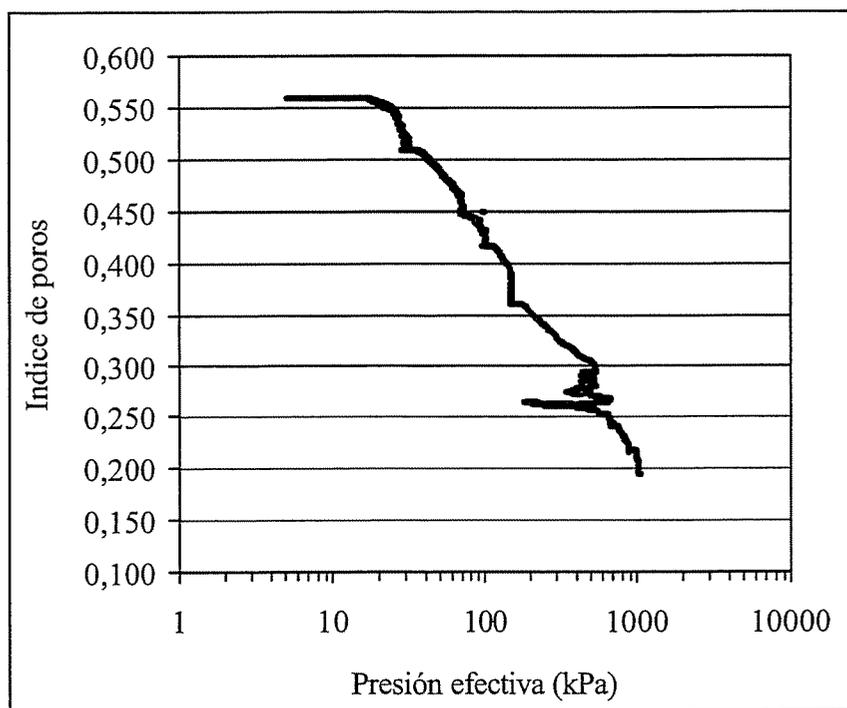
la realización de este primer ensayo no se disponía de un software que permitiese controlar la velocidad de incremento de presión de los GDS, por lo que ésta no fue constante, y además en algunas ocasiones se registraron aumentos excesivos de la presión intersticial. Al llegar a la presión confinante de 710 kPa se realizó una descarga, reduciendo la presión hasta 200 kPa, para a continuación volver a incrementarla hasta 1000 kPa. La evolución del índice de poros durante este proceso se muestra en la Figura 12, y las características de la probeta iniciales, al final de la saturación y al final del ensayo se recogen en la Tabla VIII. La duración total de este ensayo fue de más de dos meses, lo que condujo a desechar la utilización de esta muestra sin mezclar.

**Tabla VIII: Características de la probeta del ensayo TSVC1**

	$w$ (%)	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	$e$	$S_r$ (%)
Inicial	11,3	1,68	0,587	51
Después saturación	21,9	1,70	0,559	104
Final compresión <sup>1</sup>	8,2	2,23	0,193	112
Final desmontaje <sup>2</sup>	13,9	1,85	0,440	84

<sup>1</sup> Según el control de volumen realizado por el Controlador 1

<sup>2</sup> Según la pesada y el control dimensional realizado con calibre al final del ensayo



**Figura 12: Evolución del índice de poros durante la compresión del ensayo TSVC1**

### 3.4.2 Ensayos en mezclas 70 % de arena y 30 % de la muestra AH

Se ha realizado una serie de ensayos con probetas compactadas en el lado seco del óptimo del PN a partir de una mezcla del 70 % de arena y 30 % de la muestra AH. Para la realización de

esta serie se puso a punto un nuevo software que permite un mejor control de la velocidad de variación de la presión confinante.

La saturación de la probeta se ha realizado por la parte inferior con agua desionizada y desaireada inyectada a una presión de 100 kPa mientras la presión en la cámara se mantenía en 110 kPa y la toma superior permanecía cerrada. Para permitir la salida del aire, la toma superior se ha abierto una o dos veces a la atmósfera, midiéndose en una bureta el volumen de agua expulsado.

Una vez saturada la muestra se procede a su compresión con drenaje por la base, manteniendo la presión en cola en 100 kPa y aumentando la presión de cámara hasta 700 kPa. A continuación se realiza una descarga hasta 110 kPa y se vuelve a aumentar la presión confinante hasta 1300 kPa. La velocidad de carga se ha ajustado de manera que la presión intersticial nunca supere el valor de 110 kPa, para garantizar que el ensayo se realiza en condiciones drenadas. En la Tabla IX se muestran las características de las probetas en las diferentes fases de ensayo.

Como se explicó en la sección 3.3.2, los cambios de humedad y volumen de la muestra durante la compresión se calculan a partir de los cambios en el controlador de presión en cola. Como comprobación adicional se ha calculado también el cambio de volumen de la muestra a partir de los cambios registrados por el controlador de presión confinante (teniendo en cuenta la deformación de la celda). Aunque el cálculo a partir de este último es menos preciso, las diferencias en los valores obtenidos con ambos controladores son en general inferiores a 1 cm<sup>3</sup>, como muestra la Figura 13. Se observa que la medida del Controlador 2 refleja las oscilaciones diurnas de temperatura, lo que es debido a su mayor capacidad (1 L).

**Tabla IX: Características de las probetas en los ensayos de compresión isótropa con mezclas 70/30 (arena/AH)**

Ensayo	Inicial			Tras saturación			Tras compresión		
	w (%)	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	S <sub>r</sub> (%)	w (%)	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	S <sub>r</sub> (%)	w (%)	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	S <sub>r</sub> (%)
TSAH4	9,0	1,75	45	20,2	1,77	103	17,1	1,87	104
TSAH5	10,0	1,75	50	19,7	1,76	100	16,3	1,87	100
TSAH7	10,0	1,75	50	21,3	1,80	115	18,4	1,90	118
TSAH10	10,0	1,76	51	20,8	1,74	102	18,8	1,80	102
TSAH12	11,1	1,78	58	18,2	1,79	97	16,4	1,85	97

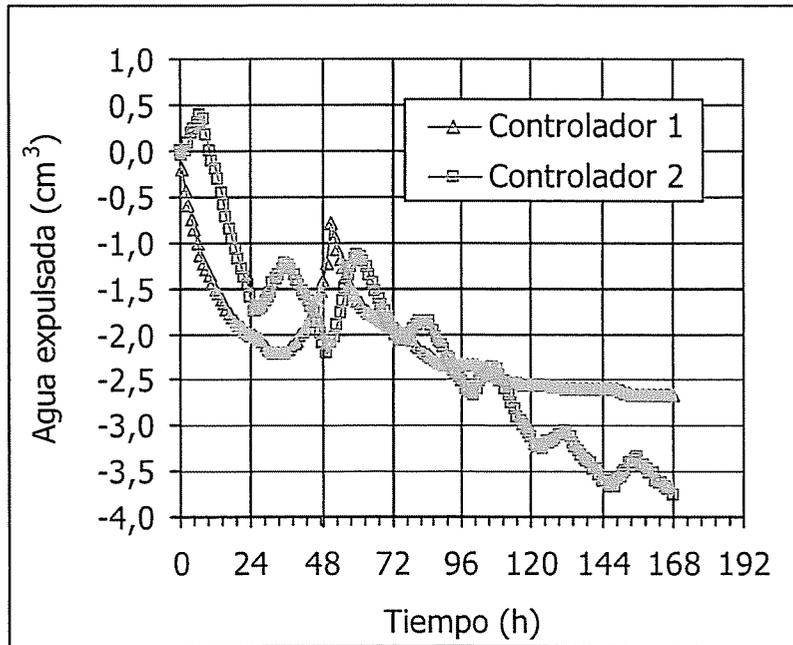


Figura 13: Agua expulsada por la probeta durante la compresión según la medida del Controlador 1 (en cola) y del Controlador 2 (confinante) (Ensayo TSAH12)

Las siguientes figuras muestran la evolución del índice de poros durante las fases de carga y descarga de los ensayos realizados con mezclas 70/30.

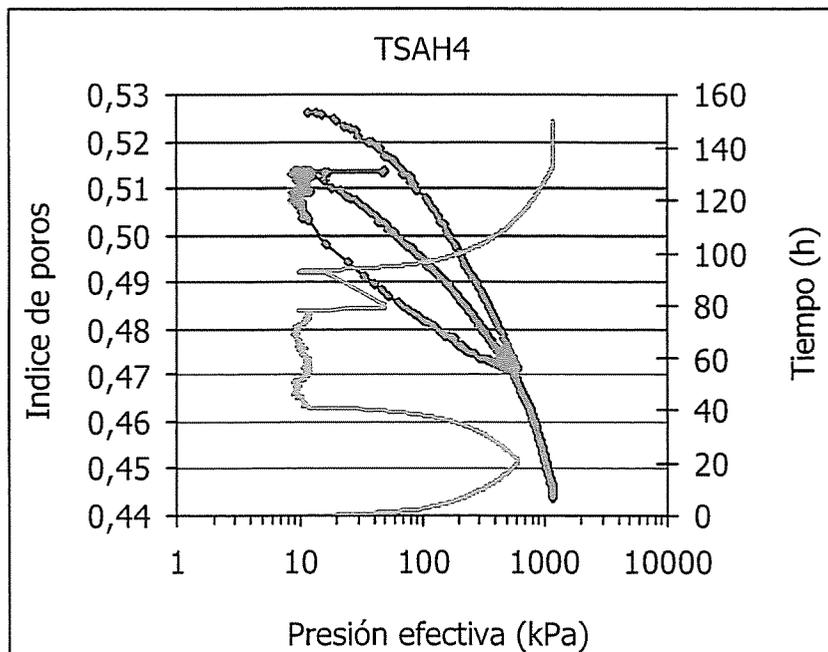


Figura 14: Evolución del índice de poros durante la compresión isotrópica drenada de la muestra saturada del ensayo TSAH4 (la línea indica la evolución temporal de presión)

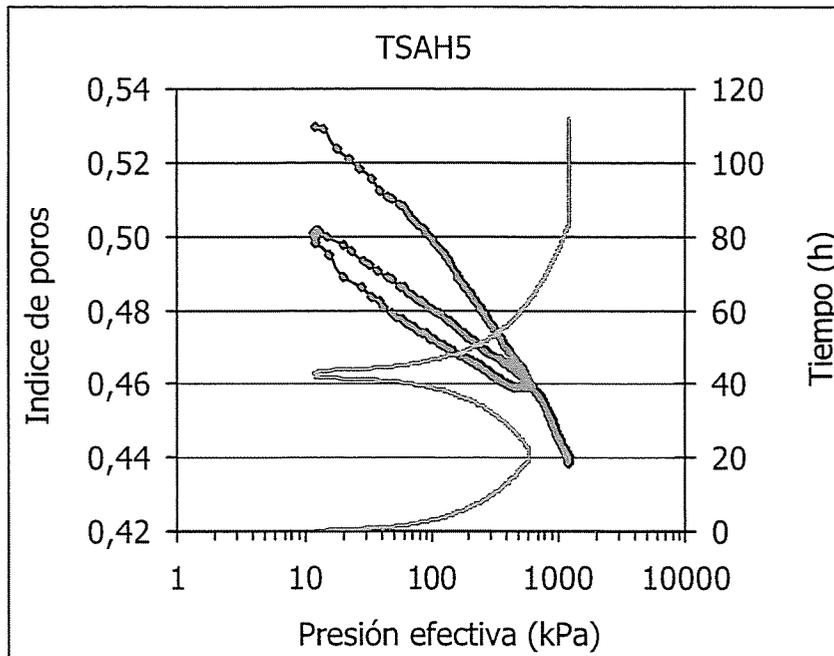


Figura 15: Evolución del índice de poros durante la compresión isotrópica drenada de la muestra saturada del ensayo TSAH5 (la línea indica la evolución temporal de presión)

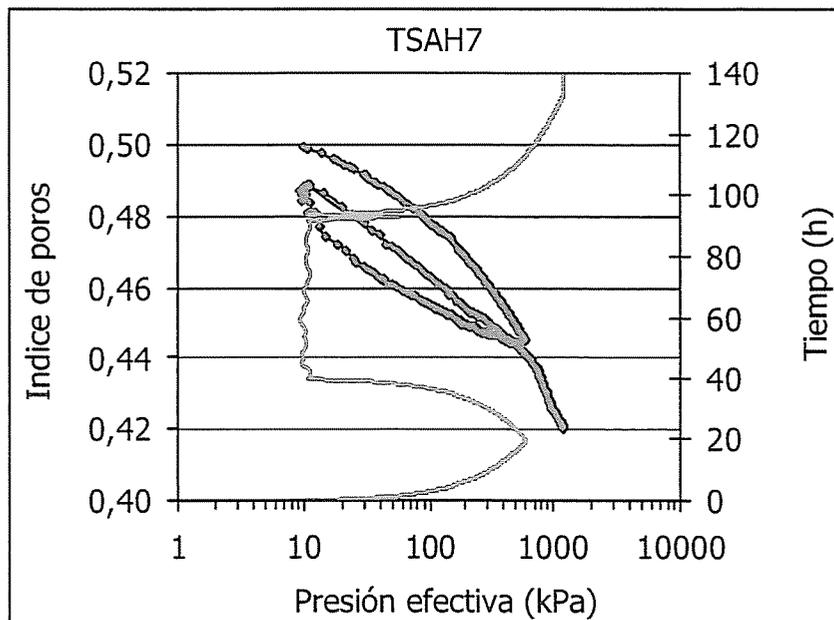


Figura 16: Evolución del índice de poros durante la compresión isotrópica drenada de la muestra saturada del ensayo TSAH7 (la línea indica la evolución temporal de presión)

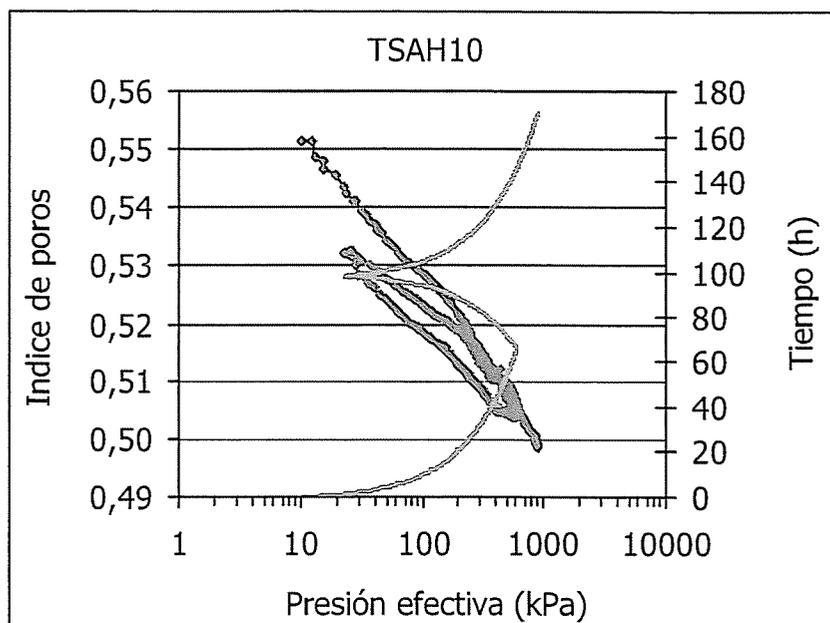


Figura 17: Evolución del índice de poros durante la compresión isotrópica drenada de la muestra saturada del ensayo TSAH10 (la línea indica la evolución temporal de presión)

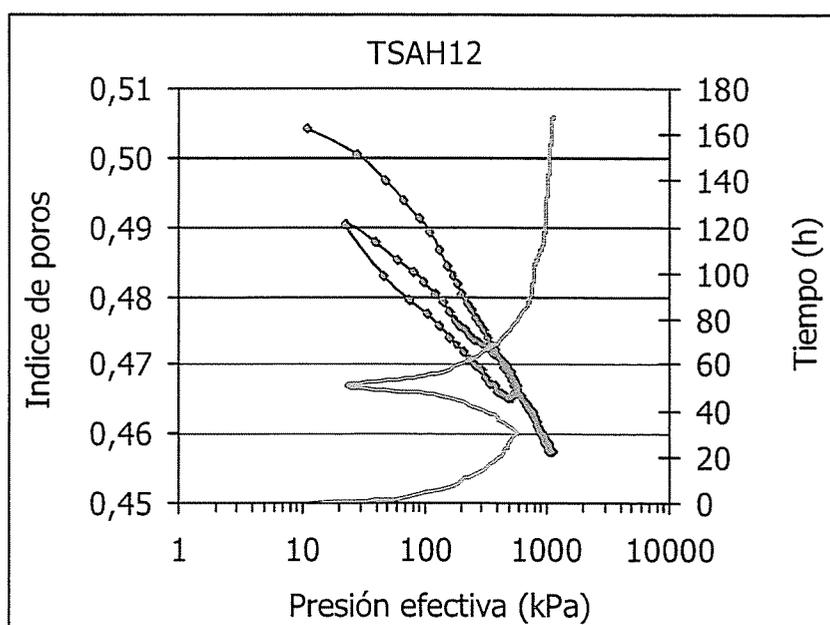


Figura 18: Evolución del índice de poros durante la compresión isotrópica drenada de la muestra saturada del ensayo TSAH12 (la línea indica la evolución temporal de presión)

### 3.4.3 Ensayos en mezclas 50 % de arena y 50 % de la muestra AH

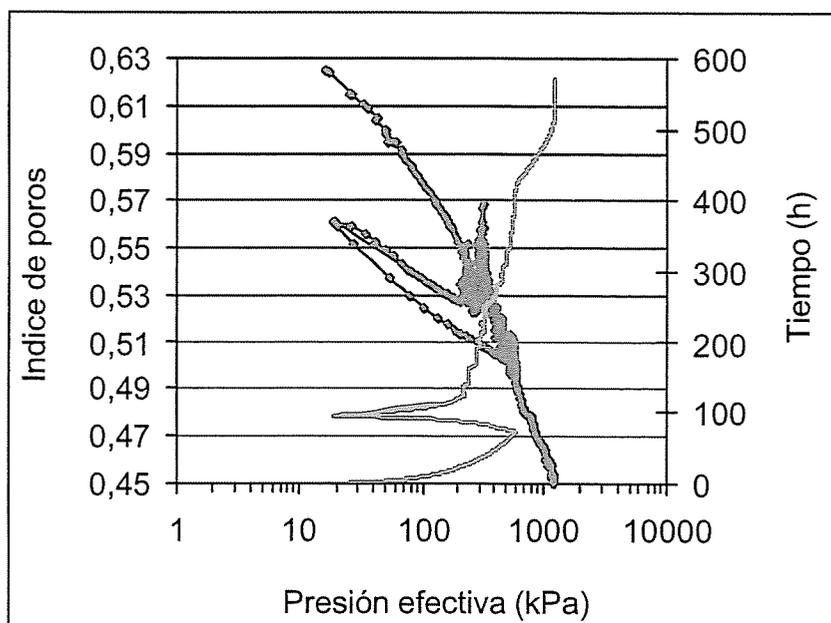
Siguiendo el mismo procedimiento descrito anteriormente, se ha realizado una serie de ensayos con probetas compactadas en el lado seco del PN a partir de una mezcla del 50 % de arena y del 50 % de la muestra de AH.

En la Tabla X se muestran las características de la probeta en las diferentes fases de cada ensayo, y las siguientes figuras muestran la evolución del índice de poros durante las fases de

carga y descarga. Durante la carga del ensayo TSAH16 se produjo la parada temporal del controlador de presión de cola, por lo que, para un tramo de la carga, los cálculos de cambios de humedad e índice de poros se han realizado a partir de las medidas del controlador de presión confinante, lo que los confiere menos precisión.

**Tabla X: Características de las probetas en los ensayos de compresión isotrópica con mezclas 50/50**

Ensayo	Inicial			Tras saturación			Tras compresión		
	w (%)	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	$S_r$ (%)	w (%)	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	$S_r$ (%)	w (%)	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	$S_r$ (%)
TSAH16	12,1	1,67	52	23,8	1,68	104	17,5	1,88	106
TSAH18	14,0	1,67	60	21,8	1,69	97	15,9	1,88	96
TSAH20	11,4	1,67	49	24,8	1,65	103	20,2	1,78	104



**Figura 19: Evolución del índice de poros durante la compresión isotrópica drenada de la muestra saturada del ensayo TSAH16 (la línea indica la evolución temporal de presión)**

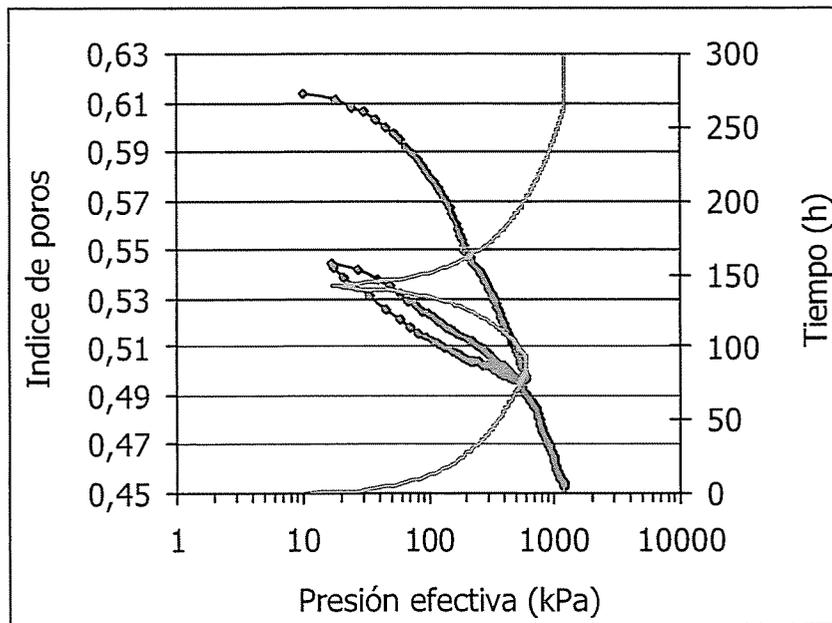


Figura 20: Evolución del índice de poros durante la compresión isotrópica drenada de la muestra saturada del ensayo TSAH18 (la línea indica la evolución temporal de presión)

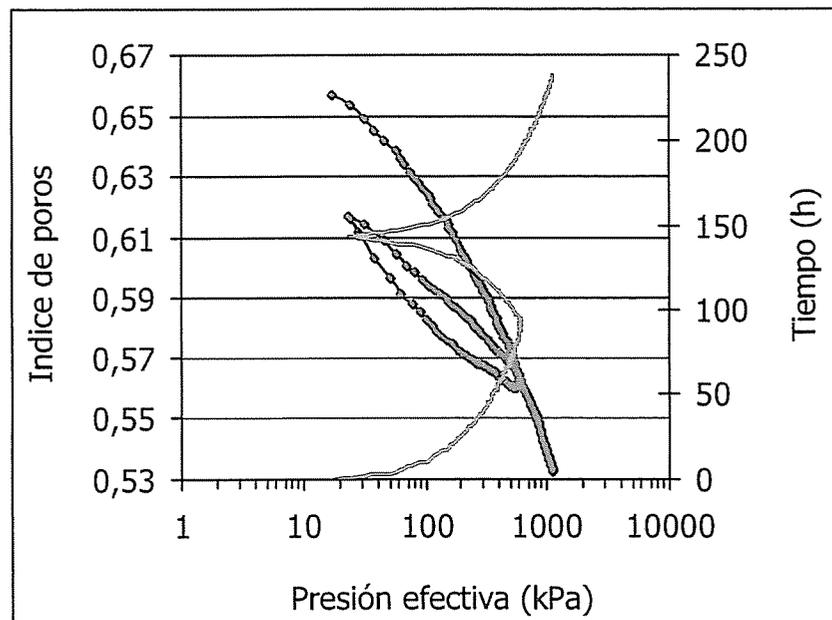


Figura 21: Evolución del índice de poros durante la compresión isotrópica drenada de la muestra saturada del ensayo TSAH20 (la línea indica la evolución temporal de presión)

### 3.5 Cálculo de parámetros

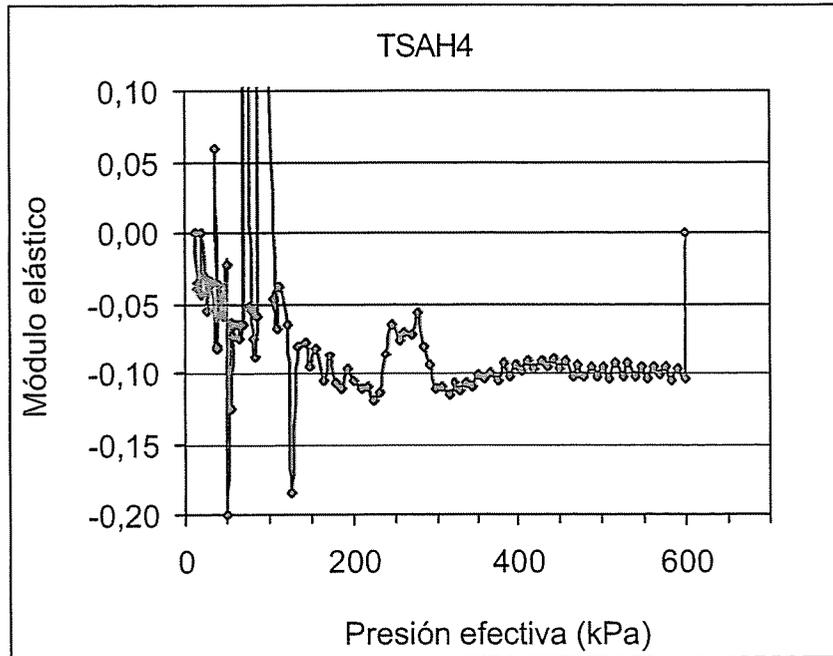
#### 3.5.1 Procedimiento

A partir de los resultados de los ensayos de compresión isotrópica que se acaban de presentar, se han determinado los parámetros mecánicos del suelo saturado  $\lambda$ ,  $\kappa$ ,  $N$  y  $p_0^*$  (Figura 8). Los

dos primeros son las pendientes, cambiadas de signo, de la línea de compresión noval y de la de hinchamiento, respectivamente, cuando se representan los índices de poros ( $e$ ) o los volúmenes específicos de la muestra ( $v$ , siendo  $v=1+e$ ) en función del logaritmo neperiano de la presión efectiva ( $p'$ ).  $N$  es el volumen específico del suelo normalmente consolidado para una presión efectiva de 1 kPa. El parámetro  $p_0^*$  es la tensión de preconsolidación en estado saturado.

El procedimiento seguido para determinar el valor de cada parámetro en cada ensayo ha sido:

- Parámetro  $\lambda$ : Para calcular este parámetro se ha utilizado el tramo tensional elastoplástico del segundo escalón de carga, esto es, desde  $p'=600$  hasta  $p'=1200$  kPa. Se dibuja la gráfica del índice de poros en función de la tensión efectiva y se calcula la expresión que mejor aproxima los resultados experimentales en el tramo tensional seleccionado. Se calcula la media aritmética de los valores obtenidos para cada ensayo. En los ensayos TSAH4 y TSAH5 el final del recorrido tiene un tramo vertical (poco apreciable en escala logarítmica pero significativo en cuanto a número de puntos) que corresponde con una etapa larga en la que se ha mantenido la presión efectiva máxima midiéndose la evolución del índice de poros. Este tramo vertical no se ha tenido en cuenta para el cálculo de  $\lambda$ .
- Parámetro  $\kappa$ : Se han calculado dos valores distintos de este parámetro para cada ensayo, correspondientes a dos tramos tensionales elásticos. El primer tramo elástico corresponde a la parte elástica del primer escalón de carga, esto es, desde  $p'=10$  hasta  $p'=100$  kPa para los ensayos de mezcla 70/30, o hasta  $p'=50$  kPa para los ensayos de mezcla 50/50. Notaremos por  $\kappa_1$  a la constante obtenida en este tramo. El segundo tramo elástico corresponde a los dos escalones de descarga y carga centrales, esto es, descarga desde  $p'=600$  hasta  $p'=10$  kPa y recarga hasta  $p'=600$  kPa. Notaremos por  $\kappa_2$  a la constante de este tramo. Se dibuja la gráfica del índice de poros en función de la tensión efectiva y se calcula la expresión que mejor aproxima los resultados experimentales en los tramos tensionales seleccionados. Si se ha elegido convenientemente el rango tensional del primer escalón de carga, los valores medios de  $\kappa_1$  y  $\kappa_2$  deben ser similares, por tanto, podemos utilizar cualquiera de ellos. Efectivamente, al calcular la media aritmética de los valores de  $\kappa_1$  y  $\kappa_2$  obtenidos para cada ensayo, se ha comprobado que ambos valores medios son similares, por lo que se han utilizado los valores del parámetro  $\kappa_1$  por simplicidad del procedimiento.
- Parámetro  $p_0^*$ : La tensión de preconsolidación en estado saturado se ha obtenido siguiendo dos metodologías:
  - o Gráfica, buscando la zona cercana al quiebro o transición de la curva de recompresión a la virgen. Para cada ensayo, tenemos las expresiones analíticas de las dos rectas obtenidas en los apartados anteriores: la recta obtenida a partir del primer tramo elástico, que nos da el parámetro  $\kappa_1$ , y la recta obtenida a partir del tramo elastoplástico, que nos da el parámetro  $\lambda$ . El nivel tensional en el que se cruzan esas dos rectas nos proporciona el valor del parámetro  $p_0^*$ .
  - o Mediante la representación del módulo elástico incremental ( $\Delta$ carga/ $\Delta$ deformación) en función de la carga y la búsqueda del punto de inflexión de esta curva. Dicha curva se muestra en la Figura 22 para el ensayo TSAH4.

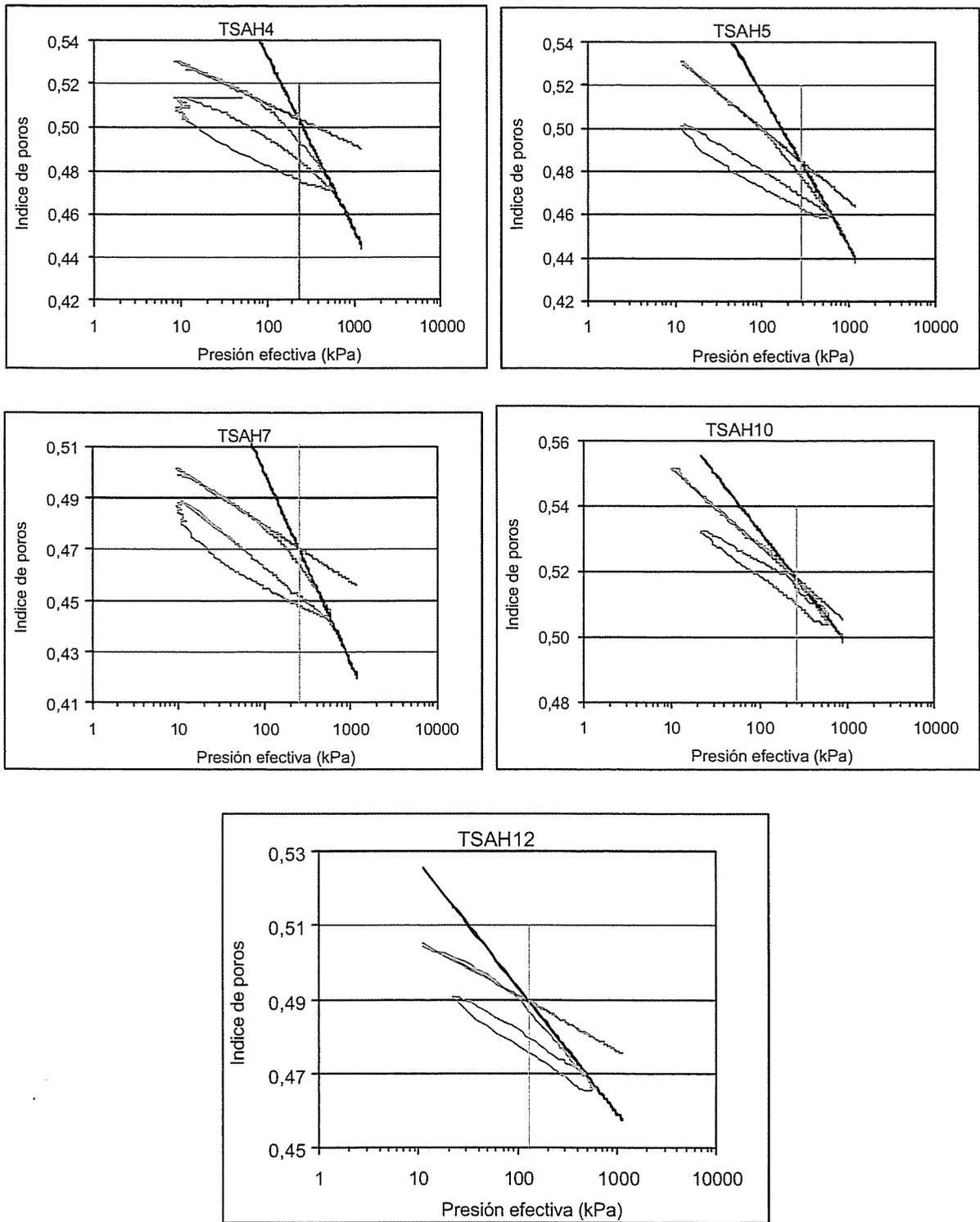


**Figura 22: Evolución del módulo elástico con la presión efectiva durante la carga inicial para el ensayo TSAH4**

Como ventaja del método de determinación de parámetros descrito, se puede observar en la sección siguiente que, para cada ensayo, el método determina con mucha precisión la constante elástica  $\kappa$  en los tramos tensionales claramente elásticos (primer y segundo tramos elásticos seleccionados) y la constante elastoplástica  $\lambda$  en el segundo escalón de carga. Sin embargo, para cada ensayo, el tramo tensional ‘de tránsito’ entre el primer tramo elástico y la rama elastoplástica es de magnitud muy grande, y no se ha tenido en cuenta en la determinación del valor de los parámetros. Además, los valores de los parámetros obtenidos tienen una fuerte dependencia de los tramos tensionales seleccionados.

### 3.5.2 Valores obtenidos

Los parámetros determinados según el método descrito para los diferentes ensayos realizados con la mezcla 70/30 se recogen en la Tabla XI y Tabla XII. Las rectas ajustadas a los diferentes tramos tensionales para obtener dichos parámetros se muestran junto con los resultados experimentales de cada ensayo en la Figura 23.



**Figura 23: Resultados experimentales obtenidos con mezclas 70/30 y rectas ajustadas para obtener los parámetros mecánicos**

**Tabla XI: Parámetros obtenidos en los ensayos de compresión isótropa con mezclas 70/30 saturadas (1)**

Ensayo	Rango tensional $\kappa_1$ (kPa)	$\kappa_1$	Rango tensional $\kappa_2$ (kPa)	$\kappa_2$	Rango tensional $\lambda$ (kPa)	$\lambda$
TSAH4	10-109	0,008	600-10-600	0,010	600-1200	0,035
TSAH5	10-104	0,014	600-10-600	0,010	600-1200	0,031
TSAH7	10-100	0,010	600-10-600	0,011	600-1200	0,032
TSAH10	10-100	0,010	600-22-600	0,009	600-890	0,015
TSAH12	10-107	0,006	600-22-600	0,007	570-1120	0,015
promedio		0,010		0,009		0,026

**Tabla XII: Parámetros obtenidos en los ensayos de compresión isótropa con mezclas 70/30 saturadas (2)**

Ensayo	$N$	$p_0^{*1}$	$p_0^{*2}$
TSAH4	1,68	231	250
TSAH5	1,62	279	150
TSAH7	1,63	248	100
TSAH10	1,59	260	250
TSAH12	1,55	128	150
promedio	1,61	229	180

<sup>1</sup> método gráfico

<sup>2</sup> método basado en el cálculo del módulo

Los parámetros determinados según se explica en la sección anterior para los ensayos realizados en mezclas 50/50 se recogen en la Tabla XIII y Tabla XIV, y las rectas ajustadas a los diferentes tramos tensionales para obtener dichos parámetros se muestran junto con los resultados experimentales de cada ensayo en la Figura 24.

**Tabla XIII: Parámetros obtenidos en los ensayos de compresión isótropa con mezclas 50/50 saturadas**

Ensayo	Rango tensional $\kappa_1$ (kPa)	$\kappa_1$	Rango tensional $\kappa_2$ (kPa)	$\kappa_2$	Rango tensional $\lambda$ (kPa)	$\lambda$
TSAH16	16-50	0,022	600-19-600	0,018	600-1200	0,056
TSAH18	10-50	0,010	600-27-600	0,014	600-1200	0,058
TSAH20	17-50	0,016	600-22-600	0,016	600-1100	0,050
promedio		0,016		0,016		0,055

Tabla XIV: Parámetros obtenidos en los ensayos de compresión isotropa con mezclas 50/50 saturadas (2)

Ensayo	$N$	$p_0^{*1}$	$p_0^{*2}$
TSAH16	1,84	122	250
TSAH18	1,87	111	160
TSAH20	1,86	200	210
promedio	1,86	144	207

<sup>1</sup> método gráfico

<sup>2</sup> método basado en el cálculo del módulo

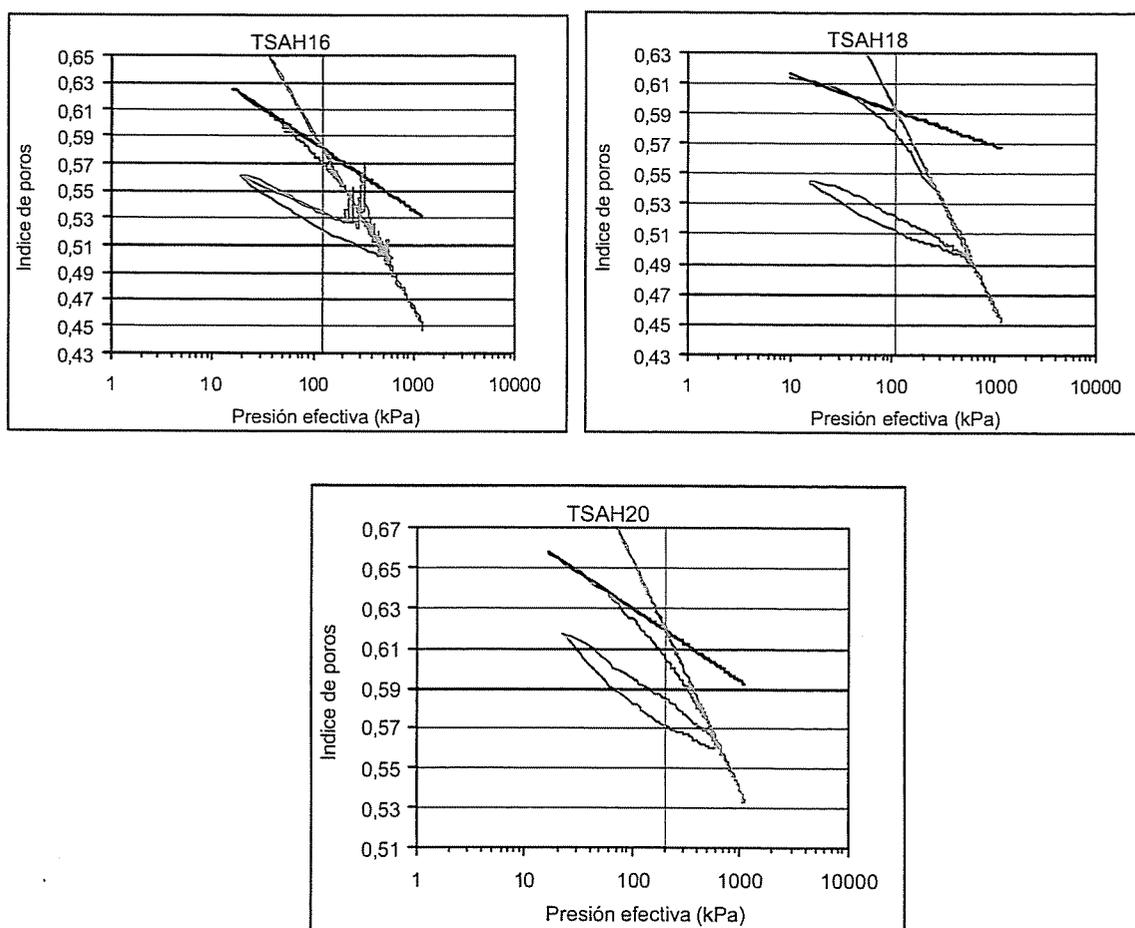


Figura 24: Resultados experimentales obtenidos con mezclas 50/50 y rectas ajustadas para obtener los parámetros mecánicos

### 3.6 Análisis de resultados

La Tabla XV muestra los parámetros medios obtenidos según se explica en la sección anterior. Como parámetro  $\kappa$  se ha tomado el obtenido en el tramo elástico del primer escalón de carga ( $\kappa_1$ ), y como  $p_0^*$  el obtenido mediante el método gráfico. Los valores de la presión de preconsolidación obtenidos con el método gráfico y con el método del módulo son en ocasiones notablemente diferentes. El método del módulo no ha sido siempre fácilmente

aplicable, ya que las curvas obtenidas son confusas. Por ello se consideran más fiables los valores obtenidos por el método gráfico.

**Tabla XV: Valores medios de los parámetros mecánicos del modelo obtenidos para los dos materiales estudiados**

Parámetro	Mezcla 70/30	Mezcla 50/50
$\kappa$	0,010±0,003	0,016±0,006
$\lambda$	0,026±0,010	0,055±0,004
$p_0^*$ (kPa)	229±59	144±49

Los valores obtenidos para los diferentes parámetros son coherentes. Como era de esperar, la muestra con mayor proporción de arena es más rígida, por lo que los parámetros  $\kappa$  y  $\lambda$  son más bajos para esta mezcla que para la mezcla 50/50, como consecuencia de la mayor compresibilidad de esta última. La presión de preconsolidación media obtenida para la mezcla 70/30 es superior a la obtenida para la mezcla 50/50, lo cual responde al hecho de que aunque ambas series de ensayos se realizaron con probetas obtenidas con energía de Proctor Normal, el material de la mezcla 50/50 es más blando y su deformación durante la compactación mayor, por lo que la tensión efectivamente aplicada durante la compactación sería menor.

La dispersión entre los ensayos es mayor en el caso de las mezclas 70/30. La Figura 25 y la Figura 26 muestran conjuntamente los resultados experimentales obtenidos para cada una de las mezclas. Se puede observar que hay una dispersión en el índice de poros inicial de los ensayos realizados con la mezcla 70/30, entre 0,50 y 0,55, que puede ser debida a diferencias iniciales de las probetas o haberse originado durante el proceso de saturación (ver Tabla IX y Tabla X). En cualquier caso, el valor inicial del índice de poros no afecta a los valores de los parámetros del modelo, aunque sí podría esperarse que las muestras con mayor índice de poros inicial presentasen una compresibilidad mayor y por tanto valores mayores para los parámetros  $\kappa$  y  $\lambda$ . Esto no es así, como puede comprobarse en el ensayo TSAH10, que a pesar de tener el índice de poros mayor al inicio de la compresión, presenta una rigidez mayor que otros ensayos.

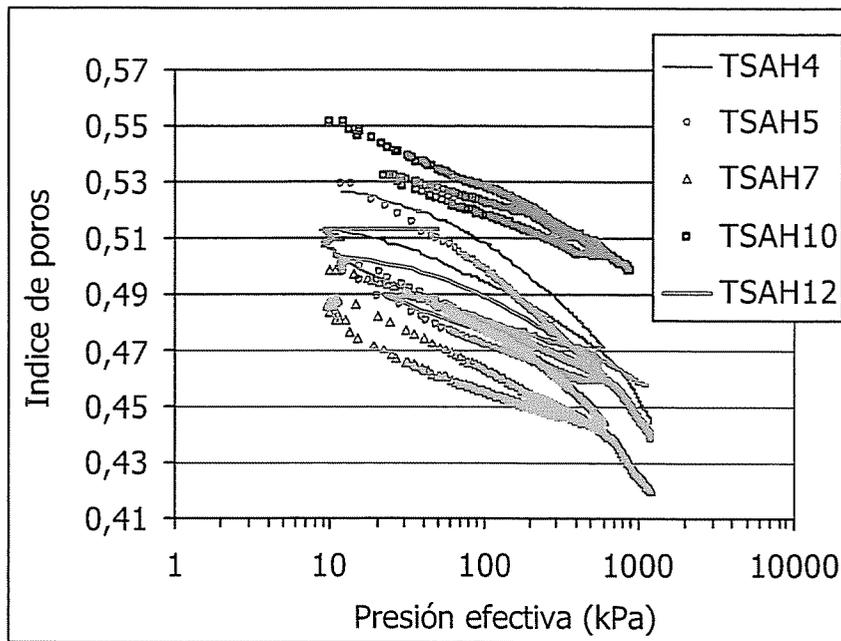


Figura 25: Curvas edométricas de los ensayos realizados con mezclas 70/30

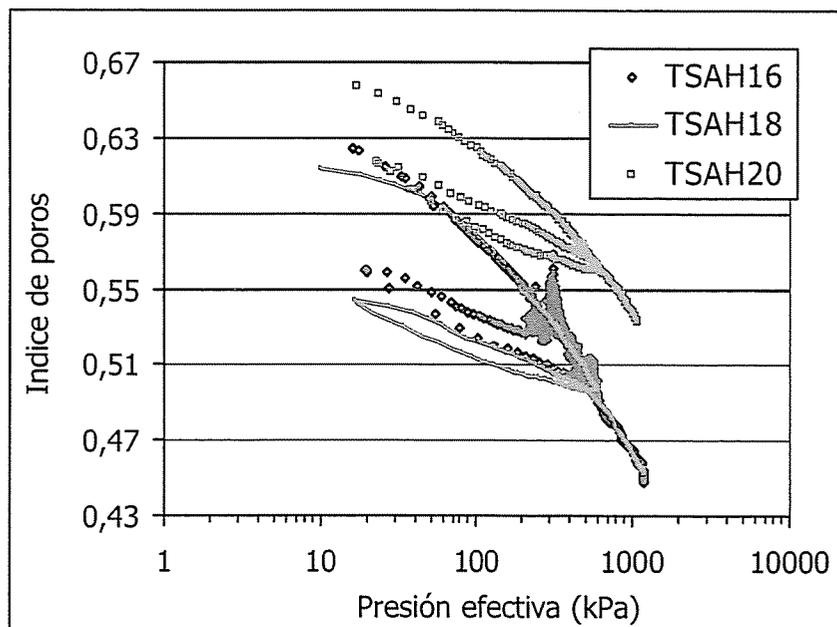


Figura 26: Curvas edométricas de los ensayos realizados con mezclas 50/50

#### 4 IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS MEDIANTE OPTIMIZACIÓN

En el marco del proyecto coordinado “Verificación de una nueva ley de comportamiento de suelos no saturados”, el equipo de investigación de la UPM ha desarrollado una herramienta de estimación automática de parámetros, basada en métodos directos de optimización, que permite encontrar los valores adecuados de los parámetros que rigen el modelo geotécnico de

comportamiento para suelos arcillosos saturados y no saturados a partir de los resultados de ensayos de compresión.

#### 4.1 Resolución de problemas inversos: generalidades

A menudo es preciso relacionar los valores de los parámetros físicos que caracterizan a un modelo,  $x$ , con los datos,  $y$ , recopilados a partir de un conjunto de medidas *in situ* o ensayos experimentales en laboratorio. Dados los fundamentos físico-químicos de los procesos modelados, habitualmente puede especificarse una función,  $G$ , que relaciona  $x$  e  $y$ :

$$G(x) = y \quad \text{Ec. 3}$$

En la práctica,  $y$  puede ser función del tiempo o del espacio. Normalmente las observaciones reales siempre tendrán algo de ruido. Las dos formas en las que este ruido aparece habitualmente son los errores numéricos de medida y los de lectura (redondeo) de los instrumentos, por lo que podemos decir que los datos experimentales  $y$  están constituidos por observaciones sin ruido de un experimento “perfecto”,  $y_{\text{verdadero}}$ , y una componente de error  $\eta$ :

$$y = G(x_{\text{verdadero}}) + \eta = y_{\text{verdadero}} + \eta \quad \text{Ec. 4}$$

Donde  $y_{\text{verdadero}}$  satisface de forma exacta la Ecuación 3 para  $x$  igual al modelo verdadero,  $x_{\text{verdadero}}$ . Hay que reseñar que a menudo una solución para  $x$  que esté sometida a un pequeño error  $\eta$  puede no tener apenas correspondencia con  $x_{\text{verdadero}}$ . Además, en muchos casos existe un número infinito de modelos  $x$  que se ajustan a los datos sin errores,  $y_{\text{verdadero}}$ .

Básicamente puede decirse que, en geotecnia, la denominación de problema inverso o de calibración paramétrica se refiere a un proceso iterativo de comparación (Figura 27) entre datos experimentales (variables medidas) y datos numéricos (variables calculadas) generados mediante el modelo matemático, al final del cual se obtiene el valor de los parámetros del modelo con los que se minimiza la diferencia entre ambos tipos de datos.

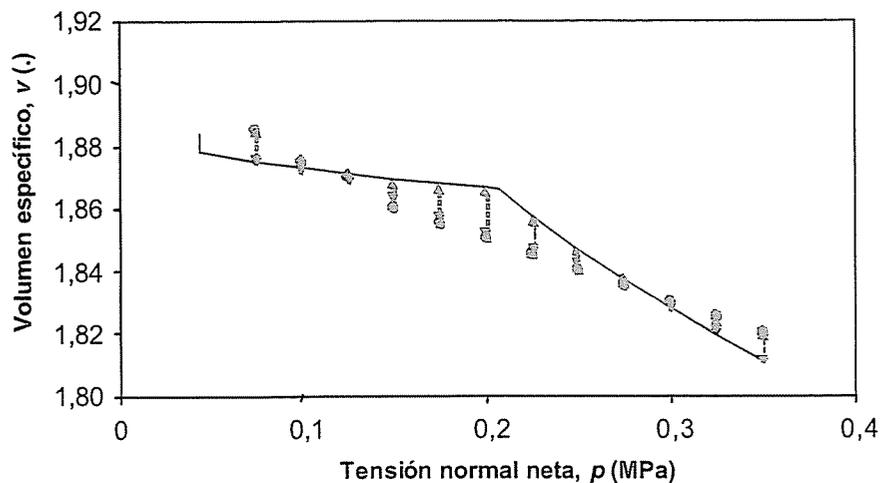


Figura 27: Ejemplo de diferencia entre los datos experimentales (⊙) y los datos teóricos (curva continua) para un recorrido tensional dado

La resolución de problemas inversos (o identificación de los parámetros del modelo) suele ser tarea muy compleja a causa de los problemas anteriormente comentados, debido a los errores asociados a las medidas experimentales y a la existencia de muchos modelos que se ajustan de forma adecuada a los datos (Aster *et al.* 2005). Por ello es fundamental ser capaz de caracterizar la bondad de la solución obtenida en términos de su plausibilidad física y grado de ajuste de los datos medidos, además de su consistencia con otro tipo de restricciones o información a priori disponible.

## 4.2 Definición de la función objetivo

A la hora de resolver cualquier problema de optimización es preciso definir la función objetivo de dicho problema. En caso particular, como función objetivo se emplea la función de verosimilitud. El método de máxima verosimilitud considera los parámetros del modelo ( $x$ ) como variables deterministas, es decir, trata los parámetros como valores fijos pero desconocidos (Beck & Arnold 1977). Pero sin embargo, este método emplea técnicas probabilistas para determinarlos. Por tanto, el tratamiento estocástico resulta de la incertidumbre de los valores de los parámetros y no de su aleatoriedad intrínseca.

La verosimilitud de una hipótesis (de unos particulares valores para los parámetros) se define como una magnitud proporcional a la probabilidad de observar las medidas obtenidas en el ensayo, dados dichos valores de los parámetros (Edwards 1972). El método de la máxima verosimilitud consiste, por tanto, en maximizar la verosimilitud ( $L$ ) de una cierta hipótesis – conjunto de parámetros ( $x$ )– a la vista de las observaciones medidas ( $y$ ):

$$L(x) = kf(y/x) = kP(y) \quad \text{Ec. 5}$$

donde  $k$  es una constante de proporcionalidad arbitraria,  $f(y/x)$  es la función de densidad de probabilidad de los datos medidos ( $y$ ) dado unos valores de los parámetros ( $x$ ), y  $P(y)$  es la distribución de probabilidad de las medidas.

Esta formulación de la función objetivo tiene las siguientes ventajas (Carrera 1987):

- Elimina la necesidad de definir la probabilidad de una cierta hipótesis.
- No requiere que el modelo sea capaz de reproducir el sistema real exactamente (Baran & Sandell 1978).
- Permite el uso de información previa sobre los parámetros, lo que supondrá un mejor condicionamiento del problema inverso.

Además, el estimador de máxima verosimilitud presenta propiedades importantes, tales como: es invariante frente a parametrizaciones, es consistente, tiene asintóticamente –para muestras grandes– una distribución normal, es insesgado y es estadísticamente eficiente.

El método generalizado de mínimos cuadrados se obtiene como un caso particular del método de máxima verosimilitud, cuando se suponen distribuciones normales para los errores de las medidas. El estimador de mínimos cuadrados es muy robusto, y en muchos casos puede utilizarse con éxito sin poseer información previa de los parámetros a estimar o de las varianzas de los errores de medida. Viene definido por la expresión:

$$S = \sum_{i=1}^N [f_i(p_1, p_2, \dots, p_j, \dots, p_n; u_i) - F_i]^2 \quad \text{Ec. 6}$$

Usando la estimación de mínimos cuadrados, la función objetivo ( $S$ ) se obtiene evaluando el modelo para cada punto  $i$  en el que se dispone de una medida experimental, siendo  $f$  la relación matemática planteada por el modelo.  $F_i$  se obtendrá a partir de las medidas experimentales. El ajuste de los parámetros  $p_j$  del modelo constitutivo minimizará dicha función  $S$ . En la Ecuación 6,  $N$  representa el número de puntos en los que se realizan las medidas, mientras que  $n$  denota el número de parámetros del modelo desconocidos.

En el presente trabajo se ha utilizado el estimador de mínimos cuadrados como función objetivo, tomando como variable medida a comparar el volumen específico,  $v$ .

### 4.3 Técnica de optimización: algoritmos genéticos

Para encontrar los valores de los parámetros que hacen mínima la función objetivo se debe aplicar algún método de optimización. Básicamente existen dos tipos de métodos, los indirectos y los directos. En los métodos indirectos se requiere el cálculo de la matriz jacobiana o del vector gradiente para el proceso de optimización. En ocasiones, los métodos indirectos pueden resultar menos satisfactorios en situaciones reales en las que las medidas experimentales van acompañadas de cierto nivel de ruido o cuando las ecuaciones constitutivas dan lugar a funciones objetivo complejas. En los métodos directos se tienen en cuenta únicamente los valores que alcanza la función objetivo en diferentes puntos –diferentes juegos de parámetros– y no requieren calcular ni la matriz jacobiana, ni el vector gradiente. En general estos métodos convergen más lentamente que los indirectos, aunque computacionalmente resultan más económicos en cuanto a coste por iteración se refiere.

Los algoritmos evolutivos se han mostrado como una técnica de optimización robusta para encontrar soluciones muy próximas al óptimo tanto en problemas multiobjetivo complejos como en problemas no diferenciables, e incluso en problemas de optimización sujeta a grandes errores de medida. En la Figura 28 se muestra el esquema de funcionamiento del sistema de estimación de parámetros, basado en la técnica de los algoritmos genéticos, que para cada solución evalúa la diferencia entre los resultados experimentales y los que se obtienen a partir del modelo.

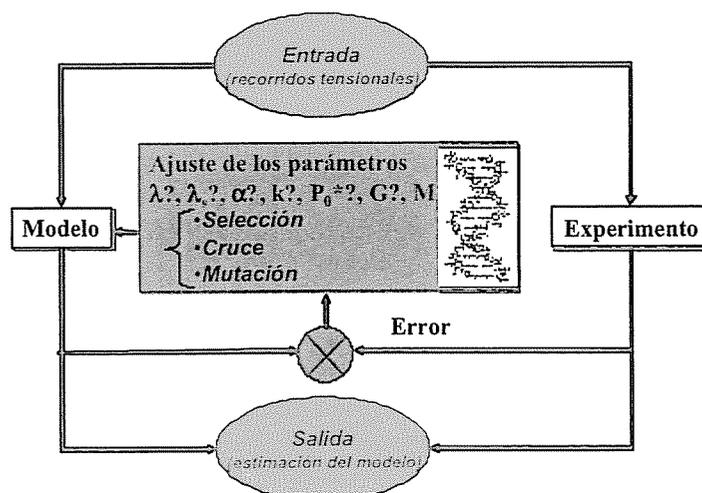


Figura 28: Esquema de funcionamiento de la herramienta de estimación automática de parámetros

Entre las principales razones para aplicar esta técnica de identificación de parámetros están su robustez; su buena convergencia; su versatilidad, ya que puede combinarse de forma sencilla

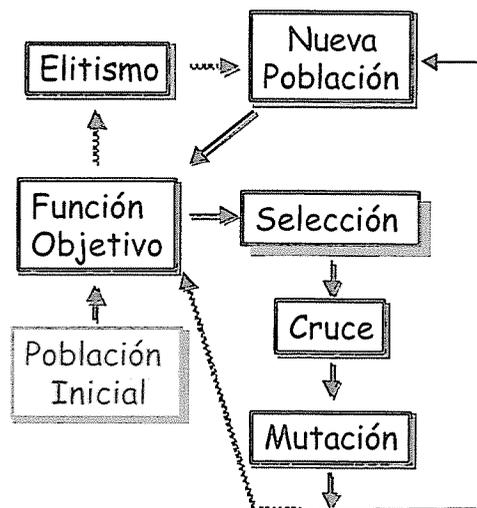
con otras técnicas si fuese necesario y permite incluir diferentes criterios de ajuste de parámetros sin modificar el programa principal; el no precisar puntos de inicio para los valores de los parámetros; o su efectividad como ayuda para la estimación de la sensibilidad, interacción y rango de cada parámetro dentro del modelo.

Los algoritmos genéticos (AG) fueron introducidos por Holland (1975) inspirándose en el proceso de la evolución de las especies, combinando la teoría de la supervivencia con cambios estocásticos estructurales de información, con el fin de incrementar la eficiencia de una búsqueda que, de otra forma, sería puramente aleatoria. El propósito genérico de los algoritmos evolutivos consiste en guiar una búsqueda estocástica haciendo evolucionar a un conjunto de estructuras y seleccionando de modo iterativo las más adecuadas.

La evolución se produce, en casi todos los organismos, como consecuencia de dos procesos primarios: la selección natural y la reproducción sexual. La primera determina qué miembros de la población sobrevivirán hasta reproducirse (es un proceso sencillo: cuando un organismo falla una prueba de idoneidad, muere). La reproducción sexual garantiza la mezcla y recombinación de genes en la descendencia de un organismo. En este sentido, los componentes fundamentales de los algoritmos genéticos clásicos son el cruce, la mutación y el elitismo (Figura 29).

A partir del modelo biológico, aparece la idea básica del algoritmo genético: generar un conjunto (población) con algunas de las posibles soluciones (individuos). Cada individuo tiene una información asociada a él. En un problema de optimización dicha información corresponde con las variables de decisión, es decir, aquéllas para las que el algoritmo tiene que asignar valores para que una función sea mínima o máxima. Esa función se denomina función de coste y determina el grado de adaptación de un individuo. A dicha información se le va a denominar código genético.

Al operar únicamente con la función objetivo para evaluar los diferentes puntos del espacio muestral, este método de búsqueda no exige continuidad, diferenciabilidad, convexidad, etc. lo que hace que los AG sean capaces de superar las limitaciones de los métodos clásicos, confiriéndole una gran robustez a la búsqueda y una mayor eficiencia sin perder generalidad.



**Figura 29: Esquema de funcionamiento de la técnica de los algoritmos genéticos**

Toda esta flexibilidad y robustez del método tiene un coste computacional importante en comparación con las técnicas indirectas de optimización. Dependiendo de la dimensión

espacial, del tamaño de la población y de otros parámetros, la diferencia en tiempo de computación puede llegar a ser de varios órdenes de magnitud. Así, el número de evaluaciones de la función objetivo necesarias puede alcanzar millones, y unas diferencias mínimas de tiempo de cálculo para cada evaluación pueden amplificar notablemente el tiempo total del proceso de optimización.

Debido a la capacidad de hibridación con otros métodos para su adaptación a problemas específicos, existen numerosas versiones del método AG. Sin embargo, no existen estudios comparativos de la efectividad de las distintas versiones de AG con relación a otros métodos, por lo que resulta siempre necesaria una cierta experimentación por parte del usuario. Los AG constituyen un método de optimización global, que encuentra el óptimo global con una probabilidad alta, aunque su solución no es casi nunca exacta. Sin embargo, la mayoría de los problemas en ingeniería no requieren una solución exacta. Para obtener una solución más cercana a la exacta se suele combinar los AG con otros métodos complementarios. En Davis (1991) se demuestra que la combinación de AG con los métodos de pendiente resulta ser más eficaz que cada método usado por separado.

Para la resolución del problema de estimación de parámetros planteado en este proyecto se ha aplicado un algoritmo genético simple elitista con codificación real (Davis 1991, Michalewicz 1996) de cada parámetro, en el que se le da una resolución determinada y unas cotas inferiores y superiores a cada uno de dichos parámetros. Se han ensayado varios mecanismos de cruce, consiguiéndose las mejores soluciones con el que genera los descendientes interpolando los valores de la codificación real de ambos individuos.

#### 4.4 Resultados de la identificación de parámetros

Se ha realizado la optimización de los parámetros del modelo de Robles & Elorza (2003) a partir de los ensayos descritos en las secciones 3.4.2 y 3.4.3, consistentes en la saturación de la probeta y posteriormente en el aumento gradual de la tensión efectiva en condiciones drenadas con medida del volumen de agua expulsado. Los parámetros que se optimizan simultáneamente son  $\kappa$  (constante de rigidez elástica para cargas de tensión efectiva en condiciones saturadas),  $\lambda$  (constante de rigidez elastoplástica para cargas de tensión efectiva en condiciones saturadas) y  $p_0^*$  (presión aparente de preconsolidación).

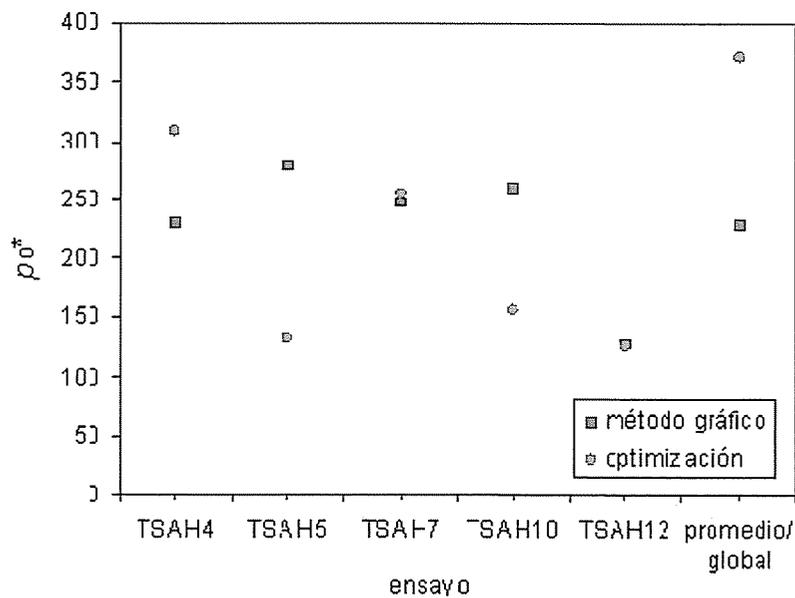
##### 4.4.1 Ensayos en mezclas 70 % de arena y 30 % de la muestra AH

La Tabla XVI recoge los parámetros obtenidos mediante el algoritmo de optimización para los ensayos realizados con mezclas 70/30 y el número de puntos experimentales utilizados para cada optimización. En la optimización conjunta usando todos los ensayos, tanto  $\lambda$  como  $p_0^*$  tienden a incrementarse con respecto a los valores encontrados para cada curva individualmente.

La comparación de los valores obtenidos para cada ensayo con los presentados en la Tabla XI y Tabla XII determinados mediante métodos gráficos permite apreciar una concordancia bastante notable para los valores de  $\kappa$  y  $\lambda$ . Sin embargo, existe una mayor variabilidad en la estimación de la tensión de preconsolidación ( $p_0^*$ ). Los valores obtenidos mediante optimización para este parámetro se comparan con los obtenidos mediante el método gráfico en la Figura 30. La discrepancia observada puede deberse a que el método gráfico no tiene en cuenta la densidad de puntos experimentales, mientras que el método de optimización sí depende del número de puntos experimentales, menor al principio del ensayo si se representa en escala logarítmica para la presión efectiva.

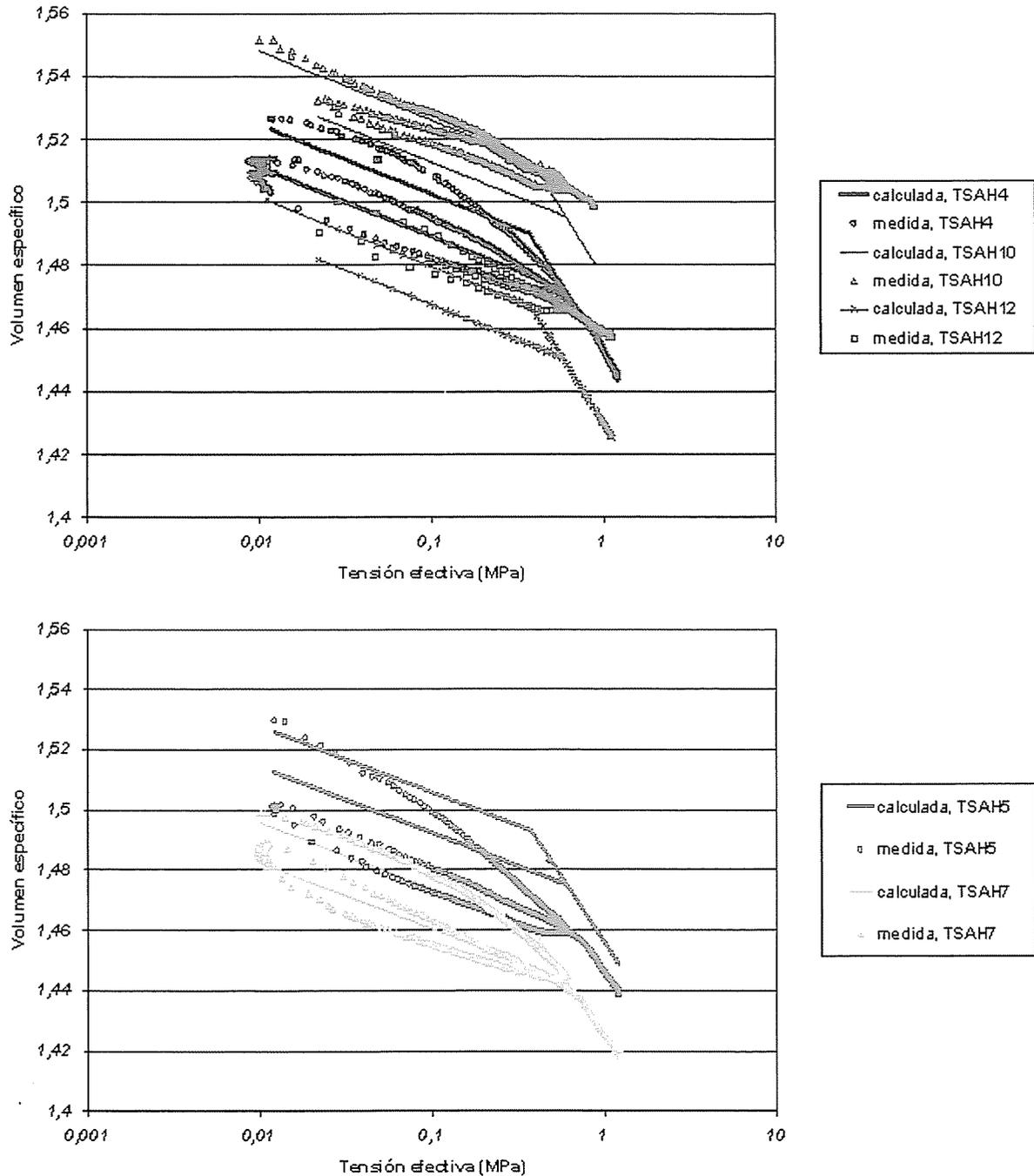
**Tabla XVI: Parámetros obtenidos por los AG en los ensayos de compresión isotrópica con mezclas 70/30 saturadas**

Ensayo	nº puntos	$\kappa$	$\lambda$	$p_0^*$	Valor func. objetivo
TSAH4	935	0,010	0,036	309	0,010
TSAH5	679	0,011	0,026	134	0,003
TSAH7	801	0,010	0,030	256	0,004
TSAH10	686	0,009	0,015	157	0,002
TSAH12	169	0,008	0,014	125	0,001
Global	3270	0,010	0,038	371	0,283



**Figura 30: Comparación de las tensiones de preconsolidación obtenidas por el método gráfico y mediante optimización para los ensayos en mezclas 70/30**

La Figura 31 muestra la evolución de los datos experimentales de cada ensayo con el resultado obtenido por el modelo para la optimización conjunta de los parámetros (valores de la última fila de la Tabla XVI). El algoritmo de optimización desarrollado incluye una fluctuación vertical en la ordenada del inicio de la recta del modelo (línea continua) con respecto al primer dato experimental. Dicha fluctuación vertical es la misma para todos los ensayos, por lo que no encaja igual de bien para cada uno de los ensayos (en concreto se puede apreciar que la mayoría de los puntos experimentales del ensayo TSAH5 están por debajo de los calculados). Su optimización añade una variable adicional al problema, es decir, se añade un nuevo cromosoma al individuo que se quiere optimizar.



**Figura 31: Evolución de los datos medidos y calculados mediante optimización conjunta en los ensayos con mezclas 70/30**

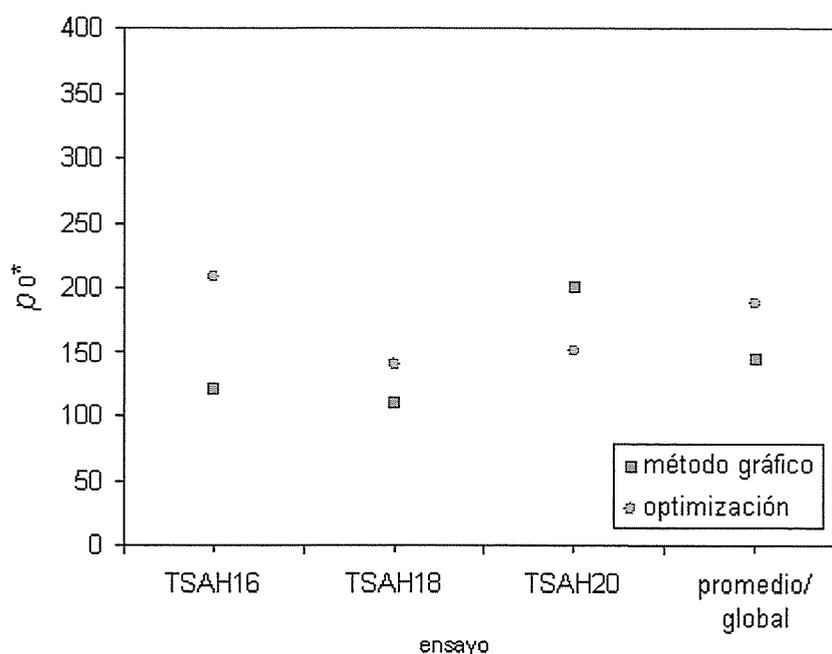
#### 4.4.2 Ensayos en mezclas 50 % de arena y 50 % de la muestra AH

La Tabla XVII recoge los parámetros obtenidos mediante el algoritmo de optimización para los ensayos realizados con mezclas 50/50 TSAH16, TSAH18 y TSAH20. La comparación de estos valores con los presentados en la Tabla XIII y Tabla XIV determinados mediante métodos gráficos permite comprobar que el resultado de la optimización es bastante satisfactorio, habiéndose obtenido valores muy similares tanto para el parámetro  $\kappa$  como para  $\lambda$ . Los valores de nivel de preconsolidación ( $p_0^*$ ) obtenidos mediante optimización

concuerdan bien con los obtenidos mediante el método gráfico, excepto para el ensayo TSAH16 (Figura 32). Cabe destacar que en el ensayo TSAH16 se ha realizado una interpolación lineal en el tramo final de recarga para eliminar anomalías en los datos, por lo que dicha interpolación podría haber influido en los valores de los parámetros hallados para este ensayo.

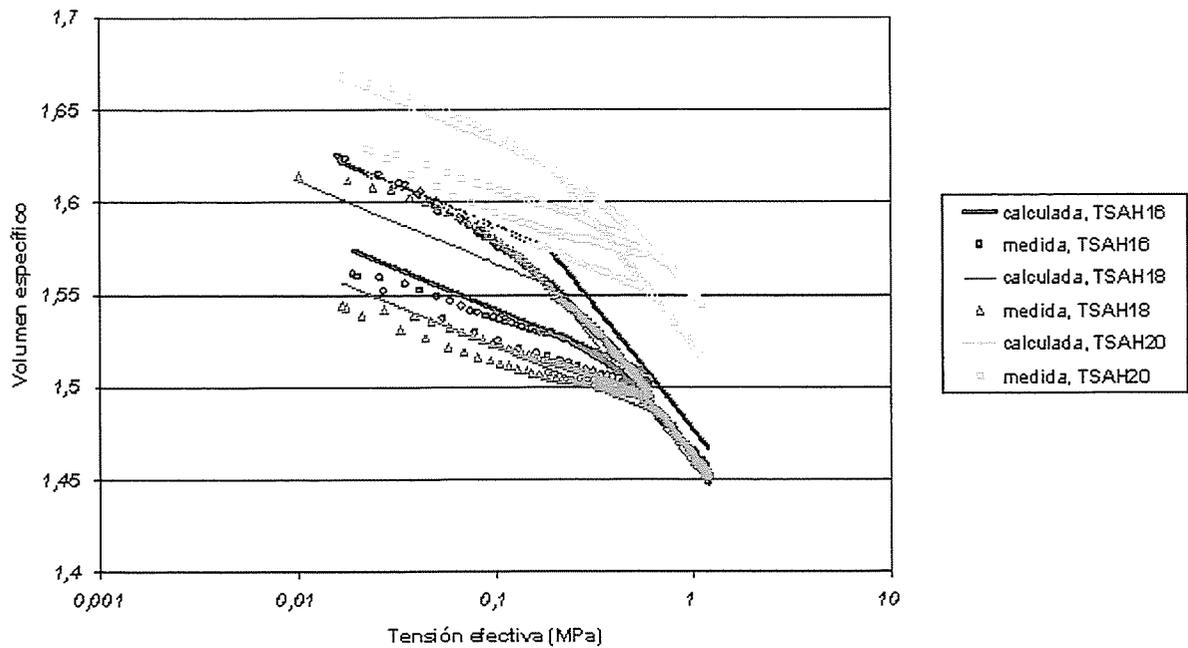
**Tabla XVII: Parámetros obtenidos por los AG en los ensayos de compresión isótropa con mezclas 50/50 saturadas**

Ensayo	nº puntos	$\kappa$	$\lambda$	$p_0^*$	Valor func. objetivo
TSAH16	645	0,026	0,059	207	0,012
TSAH18	312	0,014	0,057	140	0,003
TSAH20	240	0,017	0,043	151	0,003
todos	1197	0,019	0,058	187	0,191



**Figura 32: Comparación de las tensiones de preconsolidación obtenidas por el método gráfico y mediante optimización para los ensayos en mezclas 50/50**

La Figura 33 muestra los resultados experimentales junto con los del modelo para los valores de los parámetros obtenidos por optimización conjunta de todos los ensayos. Se puede observar cómo el algoritmo de optimización desarrollado hace coincidir la ordenada del inicio de la recta del modelo (línea continua) con la del primer punto de los datos experimentales.



**Figura 33: Evolución de los datos medidos y calculados mediante optimización conjunta en los ensayos TSAH16, TSAH18 y TSAH20 con mezclas 50/50**

#### 4.5 Análisis de resultados

Los valores obtenidos mediante la técnica de identificación automática para los parámetros del modelo son coherentes, aunque se presenta cierta dispersión entre los resultados obtenidos para los diferentes ensayos, especialmente en el caso de las mezclas 70/30, lo que probablemente es consecuencia de la dispersión de los datos experimentales.

Los parámetros  $\kappa$  y  $\lambda$  corresponden a los valores de las pendientes de las rectas elástica y elastoplástica en el plano  $p$ - $v$  en escala logarítmica para la tensión neta. Sin embargo, en el proceso de optimización existe una menor densidad de puntos al principio de los ensayos, ya que los datos experimentales se toman en escala lineal, lo que añade incertidumbre en la estimación del parámetro  $\kappa$ . Por ello sería recomendable tomar más datos experimentales en las fases iniciales de los ensayos e ir espaciando la toma de datos a medida que avanza el ensayo, con objeto de tener una distribución más regular de los datos en escala logarítmica que disminuya la incertidumbre en los resultados de la optimización. Por otro lado, se podría mejorar el ajuste del modelo a los datos experimentales si se optimizara una fluctuación vertical diferente para cada ensayo. Para ello sería necesario introducir en el algoritmo de optimización tantos cromosomas nuevos como número de ensayos haya, con lo que se complicaría la optimización del resto de parámetros del modelo. Actualmente se están desarrollando además herramientas de identificación multiobjetivo y para el análisis de la incertidumbre de los resultados de la identificación de parámetros.

## 5 RESUMEN Y CONCLUSIONES

La fase de caracterización de material descrita en este informe ha permitido seleccionar un material adecuado para su uso en ensayos triaxiales no saturados cuyos resultados permitan verificar el modelo de comportamiento del suelo no saturado. En principio el material debería tener una plasticidad suficiente para mostrar cambios de volumen apreciables como respuesta a sollicitaciones mecánicas o hidráulicas, colapsable pero sin ser expansivo; no tener una succión demasiado elevada, para que los equipos de ensayo disponibles resultaran adecuados; y no tener una permeabilidad muy baja, porque esto alarga excesivamente los tiempos de ensayo.

Tras una caracterización inicial básica de dos suelos (Alcalá de Henares, AH y Villanueva de la Cañada, VC) se seleccionó uno de ellos, el AH, y se han evaluado con más detalle las mezclas de este material con arena en proporciones 70/30 y 50/50 (relaciones arena/suelo), debido a que la permeabilidad del material por sí solo resulta demasiado baja.

Se han determinado las curvas de retención de ambas mezclas, lo que ha permitido establecer el rango de succión para el que se producen cambios notables de humedad y por tanto en el que será conveniente realizar los recorridos tensionales durante la experimentación triaxial. Según los resultados obtenidos, el valor máximo recomendable de succión a aplicar es 400 kPa.

A partir de los ensayos de compresión isótropa del suelo saturado se han determinado los parámetros mecánicos de comportamiento para ambas mezclas, obteniéndose resultados coherentes que muestran la mayor compresibilidad y plasticidad de la mezcla 50/50. En el rango de tensiones efectivas aplicadas, entre 10 y 1200 kPa, ambos materiales han mostrado cambios de volumen apreciables, por lo que este rango parece adecuado para la subsiguiente experimentación con el material no saturado. Se ha puesto de manifiesto la dificultad de determinar gráficamente con precisión el parámetro  $p_0^*$ , es decir, la presión aparente de preconsolidación, lo que en parte puede ser debido a la necesidad de intervención humana para definir los rangos tensionales correspondientes al comportamiento elástico y elastoplástico.

El equipo de la UPM ha puesto a punto un método de estimación automática de parámetros mediante optimización basado en el método de los algoritmos genéticos. Los valores obtenidos para los parámetros  $\kappa$  y  $\lambda$  con este método concuerdan bien con los obtenidos mediante el método gráfico, mientras que hay algunas diferencias en los valores obtenidos con ambos métodos para el parámetro  $p_0^*$ .

Por todo lo anterior, consideramos que la mezcla arena/AH 70/30 presenta unas características hidro-mecánicas apropiadas para completar el proyecto DEF-NOSAT. La segunda fase de dicho proyecto consistirá en caracterizar el comportamiento mecánico del suelo seleccionado en estado no saturado: sus deformaciones volumétricas y desviadoras, niveles de tensión de preconsolidación y estados de rotura. En Robles & Udías (2004) se describen los programas experimentales y los rangos tensionales que se deberán seguir: respuesta general bajo carga isótropa y descarga de succión, respuesta bajo carga isótropa y carga de succión con acoplamiento y respuesta general bajo carga de rotura.

## 6 AGRADECIMIENTOS

El proyecto “Estudio experimental de la deformabilidad de un material geológico no saturado” ha sido financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia a través del Proyecto de Investigación y Desarrollo Tecnológico BTE2002-04244-C02-02. La colaboración de la UPM en el trabajo presentado en este informe ha sido financiada a través del proyecto coordinado con el anterior BTE2002-04244-C02-01. El trabajo de laboratorio se ha realizado en el laboratorio de Mecánica de Suelos de CIEMAT por Ramón Campos y Juan Aroz. El programa de control de los ensayos de compresión isótropa ha sido realizado por J.M. Barcala de CIEMAT. A. Perlado (UPM) realizó una estancia en el CIEMAT durante la que colaboró en los ensayos de compresión isótropa realizados en la mezcla 50/50. Francisco Javier Elorza y Ramón Rodríguez de la UPM han revisado el manuscrito. Agradecemos a Antonio Lloret, de la Universidad Politécnica de Cataluña, sus sugerencias para la realización de los ensayos y las aclaraciones de problemas surgidos.

## 7 BIBLIOGRAFÍA

- Aster, R.; Borchers, B. & Thurber, C. (2005): Parameter estimation and inverse problems. *Academic Press*. 320 pp.
- Baran, Y. & Sandell, V.R. Jr. (1978): An information theoretic approach to dynamical systems modeling and identification. *IEEE Transactions on Automatic Control* 23(1): 61-66.
- Barrera, M. (2002): Estudio experimental del comportamiento hidro-mecánico de suelos colapsables. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona. 480 pp.
- Beck, J.V. & Arnold, K.J. (1977): Parameter estimation in engineering and science. *John Wiley & Sons*, New York.
- Davis, L. (1991): Handbook of Genetic Algorithms. *Van Nostrand Reinhold*, New York. 385 pp.
- Carrera, J. (1987): State of the art of the inverse problem applied to the flow and solute transport problems. In: Groundwater flow and quality modeling, NATO ASI Series 549-585.
- Edwards, A.W.F. (1972): Likelihood. *Cambridge University Press*, Cambridge. 252 pp.
- Holland, J.H. (1975): Adaptation in natural and artificial systems: An introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence. *University of Michigan Press*. 183 pp.
- Hoyos, L. (1998): Experimental and computational modeling of unsaturated soil behavior under true triaxial stress states. Ph.D. Thesis. Georgia Institute of Technology, Atlanta. 352 pp.
- Jiménez, J.A. & Justo, J.L. (1971): Geotecnia y Cimientos I. Propiedades de los suelos y de las rocas. Ed. Rueda. Madrid. 422 pp.

- Josa, A.C. (1988): Un modelo elastoplástico para suelos no saturados. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona. 541 pp.
- Lambert, F. (2004): Optimisation d'un équipement triaxial à succion contrôlée pour la détermination de courbes de rétention. Mémoire de Fin d'Etudes. INSA-Rennes, Departement de Génie Civil et Urbanisme. 90 pp.
- Michalewicz, Z. (1996): Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs. *Springer Berlin / Heidelberg*. 387 pp.
- Norma UNE 103-101 (1995): Análisis granulométrico de suelos por tamizado.
- Norma UNE 103-102 (1995): Análisis granulométrico de suelos finos por sedimentación. Método del densímetro.
- Norma UNE 103-103 (1994): Determinación del límite líquido de un suelo por el método del aparato de Casagrande.
- Norma UNE 103-104 (1993): Determinación del límite plástico de un suelo. AENOR.
- Norma UNE 103-300 (1993): Determinación de la humedad de un suelo mediante secado en estufa.
- Norma UNE 103-302 (1994): Determinación de la densidad relativa de las partículas de un suelo.
- Norma UNE 103-500 (1994): Geotecnia. Ensayo de compactación. Proctor Normal.
- Robles, J. (2001): Un modelo de deformabilidad para suelos no saturados. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid. 186 pp.
- Robles, J. & Elorza, F.J. (2003): A computational constitutive driver for an elasto-plastic model of unsaturated soil behaviour. VII Int. Conf. Computational Plasticity: COMPLAS.
- Robles, J. & Udías, A. (2004): Modelo constitutivo para suelos no saturados: formulación y calibración de parámetros. Fundación Gómez-Pardo, Madrid. 55 pp.
- Rodríguez, R. (1998): Metodología de estimación automática de parámetros de suelos arenosos en ensayos presiométricos. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.
- Villar M.V. (2000): Determinación de la relación succión/humedad en suelos. Procedimiento Específico PE-IA-CH-01. CIEMAT, Madrid. 15 pp.

