

# CAPÍTULO 5

## PROGRAMA EXPERIMENTAL Y PROCEDIMIENTOS

### 5.1 Introducción

Los programas de ensayos fueron diseñados teniendo en cuenta los objetivos perseguidos en esta de tesis y los equipos disponibles. El objetivo fundamental planteado para la realización de estos ensayos ha sido reproducir repuestas características del suelo en estado no saturado cuando es sometido a cambios de succión y trayectorias tensionales de forma que se obtenga información para modelar su comportamiento. El programa de ensayos de laboratorio previsto incluye, en consecuencia, diferentes trayectorias de tensiones a seguir para poner de manifiesto distintos aspectos (en especial los más básicos) de los modelos constitutivos. Se han realizado tres tipos de ensayos con succión controlada:

- a) Ensayos edométricos
- b) Ensayos de compresión isótropa
- c) Ensayos de compresión triaxial

Los ensayos de compresión isótropa se han realizado en una mini-célula rígida pensada sólo para ensayos con carga isótropa y en el equipo triaxial con succión controlada.

Para la realización de los ensayos se ha utilizado una arcilla de baja plasticidad (CL) de la Ciudad de Barcelona, ya empleado en otros trabajos (Gens *et al.* 1995; Suriol *et al.* 1998). En el Capítulo 4 se describe con detalle la caracterización de dicho suelo.

Las probetas fabricadas para los ensayos realizados en esta memoria de tesis, fueron preparadas de acuerdo al procedimiento de compactación estática en condiciones isótropas (tensión controlada), descrito previamente en la sección 4.3.1. La técnica de fabricación de las probetas a ensayar, en todas las series de los diferentes programas de ensayos, se ha descrito en la sección 4.3.2 (Capítulo 4), de igual manera, la descripción de los equipos utilizados para la realización experimental en esta investigación, se recoge en el Capítulo 3.

En los Anexos (A, B y C), se describe con detalle el procedimiento de montaje de la probeta, y de la puesta en marcha del ensayo, para los diferentes tipos de ensayo realizados.

## 5.2 Programa y trayectorias de los ensayos edométricos con control de succión

Esta parte de investigación fue enfocada principalmente sobre el comportamiento volumétrico de una arcilla de baja plasticidad no saturada (colapso, hinchamiento y retracción) bajo cambios de succión y tensión vertical neta. Se han considerado también de gran importancia los aspectos referentes al tiempo de equilibrio de humedad. Por lo tanto los procedimientos de ensayo también fueron concebidos para determinar las propiedades hidráulicas del suelo (relaciones succión–humedad y comportamiento histerético, los cambios de humedad con el tiempo, las características de permeabilidad, etc.).

Se realizaron una serie de ensayos edométricos sobre muestras fabricadas de acuerdo a la técnica de tensión controlada obteniendo probetas ( $r = 25$  mm,  $h = 20$  mm:  $h/r = 0.8$ ) bajo los procedimientos descritos en la sección 4.3.2. Las condiciones iniciales de las muestras ensayadas se presentan en la Fig. 5.1 y se resumen en la Tabla 5.1.

El programa consistió de cuatro ensayos edométricos con control de succión, identificados con la siguiente nomenclatura EDO–1, EDO–2, EDO–3 y EDO–4, en los que se han seguido varios tipos de trayectorias de succión y tensión:

- Ciclos de carga–descarga a succión matricial constante (Fig. 5.2 – 5.5);
- Ciclos de humedecimiento–secado a tensión vertical neta constante (Fig. 5.2 – 5.5).

La tensión máxima de preconsolidación de las muestras fabricadas fue de 0.6 MPa, salvo para el ensayo EDO-3 (0.3 MPa), tal como se indica en la Tabla 5.1 y Fig. 5.1.

Con las cuatro muestras se disponía de tres estado iniciales con la misma carga de compactación y distinta humedad y densidad, de dos muestras compactadas con la misma humedad y distinta carga de compactación y densidad seca y de dos muestras compactadas con la misma densidad seca y distinta carga de compactación y humedad. Ello permite analizar el efecto de estos factores en el comportamiento del suelo compactado.

Tabla 5.1 Condiciones iniciales de las muestras. Ensayos edométricos con succión controlada.

Ensayo	$w_0$ %	$\rho_{d0}$ g/cm <sup>3</sup>	$e_0$	$Sr_0$ (%)	$\Psi$ MPa	$\sigma_m - u_a$ MPa
EDO-1	11±0.2	1.61	0.680	43	0.8	0.6
EDO-2	8±0.2	1.54	0.749	28	2.1	0.6
EDO-3	11±0.2	1.52	0.783	39	0.9	0.3
EDO-4	12.5±0.2	1.70	0.594	55	0.5	0.6

Nota:  $\rho_{d0}$ : densidad seca inicial;  $\sigma_m - u_a$ : tensión media de compactación estática en condiciones isotropas;  $\Psi$ : succión total inicial (técnica psicrométrica).

Inicialmente, en todos los ensayos se impuso una pequeña presión vertical de 25 kPa sobre la muestra, con la finalidad de ajustar el mecanismo de transmisión de presiones, posteriormente las muestras son llevadas a unas condiciones iniciales (punto B de las Fig. 5.2 - 5.5). En esta etapa inicial, tanto la presión de aire ( $u_a$ ) como la presión vertical ( $\sigma_v$ ), son simultáneamente incrementadas manteniendo una presión vertical neta sobre la muestra ( $\sigma_v - u_a$ )  $\leq$  0.05 MPa, bajo condiciones no drenadas en la fase líquida hasta obtener la presión de aire deseada.

La presión de aire ( $u_a$ ) seleccionada de 0.9 MPa, se mantuvo constante durante el desarrollo del ensayo. Empleando la técnica de traslación de ejes, se impuso la succión matricial inicial, aplicando una de agua ( $u_w$ ) de 0.1 MPa ( $u_a - u_w = 0.8$  MPa, punto B, Fig. 5.2 - 5.5).

En los ensayos EDO-1, EDO-2 y EDO-4, una vez finalizada la etapa de la imposición de las condiciones iniciales, se prosiguió con la primera trayectoria de incremento de la carga vertical neta, que se realizó por etapas bajo un valor de la succión matricial constante ( $u_a - u_w = 0.8$  MPa) (trayectoria B→C, Fig. 5.2-5.5), utilizando los siguientes escalones de tensión vertical neta ( $\sigma_v - u_a$ ): 0.1, 0.2, 0.4, y 0.6 MPa, (siendo 0.6 MPa el valor aplicado en el proceso de compactación), por otro lado, en el ensayo EDO-3, los valores de los escalones de la tensión vertical neta fueron: 0.1, 0.2, y 0.3 MPa, (siendo 0.3 MPa el valor aplicado en el proceso de compactación). Cada una de las etapas de carga fue mantenida como mínimo durante 48 horas, controlando el desplazamiento vertical hasta su estabilización, además de mantener la condición de succión constante.

Posteriormente, se realizaron trayectorias de cambio de succión matricial bajo tensión vertical neta constante. Estas trayectorias se realizaron manteniendo una presión de aire constante de  $u_a = 0.9$  MPa a través del disco poroso superior y controlando la presión de agua que actúa sobre

el disco cerámico de alto valor de entrada de aire (AVEA) de 1.5 MPa. La presión de agua ( $u_w$ ) es aplicada instantáneamente y es mantenida durante el periodo de equilibrado durante el cual se registran los cambios de volumen de agua que entran o salen de la muestra para determinar su cambio de humedad. En la primera trayectoria de humedecimiento, la succión se disminuyó de acuerdo a los siguientes valores:  $(u_a - u_w) = 0.8, 0.6, 0.3, 0.15$  y  $0.05$  MPa (trayectoria C→D, Fig. 5.2 - 5.5). Posteriormente, se realizó una trayectoria de secado, con las siguientes etapas de cambio de succión:  $(u_a - u_w) = 0.05$  y  $0.3$  MPa, salvo en el ensayo EDO-1, donde la trayectoria de secado se realizó en tres etapas:  $(u_a - u_w) = 0.05, 0.15$  y  $0.3$  MPa (trayectoria D→E, Fig. 5.2 - 5.5).

Después de aplicar un ciclo de carga y descarga manteniendo una succión de  $0.3$  MPa, la segunda trayectoria de humedecimiento se efectuó en una sola etapa de cambio de succión partiendo de un valor de  $(u_a - u_w) = 0.3$  MPa hasta  $0.05$  MPa, salvo para el ensayo EDO-1, donde la trayectoria de humedecimiento se realizó en dos escalones comenzando con un valor de  $(u_a - u_w) = 0.3$ , se redujo a  $0.15$  MPa y  $0.05$  MPa (trayectoria G→H, Fig. 5.2 - 5.5). En cada una de las etapas, alrededor de 5 días fue un tiempo suficiente para alcanzar el estado de equilibrio en términos de deformación y drenaje.

Las trayectorias de carga–descarga de la tensión vertical neta ( $\sigma_v - u_a$ ) bajo succión matricial constante se presentan en las Fig. 5.2-5.5. En dichas trayectorias, las lecturas del desplazamiento vertical, son corregidas contra las deformaciones propias del equipo causadas por los incrementos de carga o descarga, de acuerdo a la sección 3.5.3 y la Fig. 3.11. Para evitar cambios de la succión matricial (disminución), las trayectorias de carga se realizaron con un número suficiente de escalones de incremento de carga vertical neta.

Los incrementos de la carga vertical neta, se aplicaron en escalones usualmente entre  $0.1$  y  $0.2$  MPa, en caso de la descarga, las disminuciones de la carga se realizaron en escalones entre  $0.2$  y  $0.4$  MPa. En los incrementos de la tensión vertical neta por escalones, se presenta una cierta influencia del tamaño de los escalones en los resultados de compresión, debido a la existencia de una reducción de succión que se traduce en una pequeña compresión adicional (Das, 1983b). Estas discrepancias han sido explicadas para el estado virgen por Sivakumar (1993) en términos de la superficie de fluencia LC, propuesta por Alonso *et al.* (1990). Las ventajas de un sistema de carga de forma continua sobre una técnica de carga por etapas, han sido discutidas por Sivakumar (1993) y Cui y Delage (1996). De acuerdo a estos últimos autores, la técnica de cargar por etapas, sobrestima la

compresibilidad y subestima el tamaño de la superficie de fluencia, por que el estado virgen es alcanzado a valores más bajos de succión.

La tensión vertical neta ( $\sigma_v - u_a$ ) de carga y descarga se aplicó por medio de un valor específico de presión de aire que actúa sobre el diafragma y el sistema del pistón, de acuerdo a los valores de calibración en la sección 3.5.3. Los diferentes niveles de succión matricial que fueron seleccionados para realizar los ciclos de carga–descarga en los ensayos fueron:  $(u_a - u_w) = 0.3$  y  $0.05$  MPa (trayectorias: E→F y H→I, Fig. 5.2-5.5). Las trayectorias de carga fueron suficientemente amplias con el objetivo de causar un arrastre de la superficie de fluencia, movida tras el fenómeno de colapso del suelo, y detectar cambios de rigidez que permitan obtener puntos de la superficie de fluencia. Los valores máximos de tensión vertical neta son los indicados en la Tabla 5.2. Las trayectorias de descarga fueron realizadas hasta alcanzar el mismo nivel del estado tensional inicial (F→G, Fig. 5.2-5.5), así como la descarga total sobre la muestra indicado con las letras I→J en las mismas figuras. Como ejemplo de los pasos realizados en cada uno de los ensayos efectuados, en la Tabla 5.2 se presentan las etapas seguidas en cada una de las trayectorias realizadas para los ensayos EDO-1 y EDO-3.

Tabla 5.2 Etapas en las trayectorias de los ensayos edométricos (EDO-1 y EDO-3).

Trayectoria	Succión matricial ( $u_a - u_w$ ) MPa; $u_a = 0.9$ MPa	$\sigma_v - u_a$ * MPa
Carga: B-C	0.8	0.05, 0.2, 0.4 y 0.6
mojado: C-D	0.6, 0.3, 0.15 y 0.05	0.6
secado: D-E	0.15 y 0.3	0.6
Carga: E-F	0.3	0.7, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4 y 1.6
Descarga: F-G	0.3	1.4, 1.2, 1.0, 0.8 y 0.6
mojado: G-H	0.15 y 0.05	0.6
Carga: H-I	0.05	0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0, 2.2 y 2.4
Descarga: I-J	0.05	2.2, 2.0, 1.8, 1.4, 1.2, 1.0, 0.8, 0.6, 0.4, 0.2, 0.1 y 0.05

\*  $\sigma_v - u_a$ : tensión vertical neta

Dentro del programa de ensayos se han completado catorce ensayos de humedecimiento–secado, realizados en un solo ciclo o en dos ciclos con un total de 29 etapas de equilibrio de succión, ocho ciclos de carga–descarga en 128 etapas, y cuatro trayectorias de carga en 15 etapas. Se llevaron a

cabo registros periódicos desde el inicio hasta el final del ensayo de los cambios de volumen y contenidos de agua. En la Tabla 5.3 se presenta un resumen de las principales características de los diferentes ensayos (identificación, trayectoria de tensión y el lapso de tiempo en realizar dicha trayectoria). En la realización de estos ensayos se invirtió un periodo alrededor de 340 días de trabajo en la nueva célula edométrica con control de succión.

Tabla 5.3 Serie de los ensayos edométricos bajo succión controlada.

Identificación del ensayo	Trayectoria de Tensiones	Descripción	Periodo (días)
EDO – 1	a) carga	4 etapas	7
	b) mojado-secado-mojado	8 etapas, $(\sigma_v - u_a) = 0.6$ MPa	42
	c) carga-descarga (2 ciclos)	32 etapas, $(u_a - u_w) = 0.3, 0.05$ MPa	51
EDO – 2	a) mojado	1 etapa	8
	b) carga	4 etapas	9
	c) mojado-secado-mojado	6 etapas, $(\sigma_v - u_a) = 0.6$ MPa	29
	d) carga-descarga (2 ciclos)	35 etapas, $(u_a - u_w) = 0.3, 0.05$ MPa	59
EDO – 3	a) mojado	1 etapa	3
	b) carga	3 etapas	4
	c) mojado-secado-mojado	6 etapas, $(\sigma_v - u_a) = 0.3$ MPa	31
	d) carga-descarga (2 ciclos)	32 etapas, $(u_a - u_w) = 0.3, 0.05$ MPa	38
EDO – 4	a) mojado	1 etapa	5
	b) carga	4 etapas	8
	c) mojado-secado-mojado	6 etapas, $(\sigma_v - u_a) = 0.6$ MPa	22
	d) carga-descarga (2 ciclos)	29 etapas, $(u_a - u_w) = 0.3, 0.05$ MPa	49

Finalmente hay que señalar que algunos ensayos que fueron cancelados no se incluyeron en esta memoria de tesis, sin embargo, se utilizaron para observar la reproducibilidad con otros equipos y la repetibilidad con la misma célula, presentando en general una buena repetibilidad y consistencia. Las causas de su cancelación, fueron principalmente los problemas de interrupción en el sistema de suministro eléctrico y las correspondientes repercusiones sobre el sistema neumático, cavitación del sistema de presión de agua debido al aire acumulado por difusión debajo de la piedra porosa de lato valor de entrada de aire o por el deterioro de las mismas.

### 5.3. Programa y trayectorias de los ensayos isótropos realizados en la mini-célula isótropa rígida

En este apartado se describe el método, programa y las trayectorias tensionales seguidas en la serie de ensayos isótropos realizados con la mini – célula isótropa rígida con control de succión. En la sección 3.6 y en el Anexo B, se han mencionado las características de la mini-célula isótropa rígida, que puede resumirse en la posibilidad de conocer el estado tensional aplicado al suelo y la del reducido tamaño de la muestra a ensayar.

El programa de ensayos y las trayectorias seguidas tuvieron como propósito analizar el comportamiento deformacional de un suelo no saturado asociado a los cambios de succión, así como obtener la forma y el cambio de tamaño de la superficie de fluencia (LC) (Loading-collapse), propuesta por Alonso *et al.* (1990), durante un proceso de humedecimiento o de un incremento de la carga isótropa sobre la muestra.

El programa de investigación fue realizado en muestras ( $r= 10$  mm,  $h = 20$  mm:  $h/r = 2$ ) con diferentes densidades, fabricadas de acuerdo a la técnica de tensión controlada. En la Tabla 5.4 y en la Fig. 5.7a se presentan las condiciones iniciales de las muestras fabricadas para la realización de los ensayos isótropos. Estas cuatro condiciones son análogas a las empleadas en los ensayos edométricos.

Tabal 5.4 Condiciones iniciales de las muestras. Ensayos isótropos (mini-célula isótropa rígida).

Ensayo	$w_0$ %	$\rho_{d0}$ g/cm <sup>3</sup>	$e_0$	$Sr_0$ (%)	$\Psi$ MPa	$\sigma_m - u_a$ MPa
ISO-1	11±0.2	1.67	0.620	48	0.8	0.6
ISO-2	8±0.2	1.55	0.743	29	2.1	0.6
ISOW-1	11±0.2	1.66	0.629	47	0.8	0.6
ISOW-2	8±0.2	1.52	0.777	28	2.1	0.6
ISOW-3	11±0.2	1.53	0.776	38	0.9	0.3
ISOW-4	12±0.2	1.69	0.598	54	0.6	0.6

Nota:  $\sigma_m - u_a$ : tensión media de compactación estática en condiciones isótropas;  $\Psi$ : succión total inicial (técnica psicrométrica).

En el Anexo B se describe a detalle la metodología de la realización de los ensayos isotrópicos. De igual manera que en los ensayos edométricos, inicialmente las muestras fueron isotrópicamente cargadas a contenidos de agua constante hasta una tensión media neta ( $\sigma_m - u_a$ ) deseada estableciendo así unas condiciones iniciales del ensayo, señaladas con la letra B de las Fig. 5.6 y 5.8.

En las diferentes muestras se realizaron diferentes trayectorias de tensión y succión:

- Trayectorias de humedecimiento a tensión media neta constante (Fig. 5.8).
- Ciclos de humedecimiento–secado a tensión media neta constante (Fig. 5.6).
- Ciclos de carga–descarga bajo succión matricial constante (Fig. 5.6).

El programa consistió de seis ensayos, organizados en dos grupos dependiendo de la trayectoria tensional realizada. En los ensayos ISO–1 y ISO–2, las letras ISO nos indican ensayos Isotrópicos con ciclos de humedecimiento–secado bajo tensión media neta constante y ciclos de carga–descarga a succión constante, la unidad hace referencia a la condición del punto de tensión inicial de la muestra de acuerdo a la Fig. 5.7a. En estos ensayos se han seguido trayectorias que de forma análoga a la seguida en los ensayos edométricos, tratando de obtener puntos de la superficie de fluencia. Por otro lado, en los ensayos ISOW–1, ISOW–2, ISOW–3 y ISOW–4, se tomó el siguiente criterio para identificar estos ensayos: las letras ISO, corresponden a ensayos isotrópicos y la letra W nos indica que se realizaron únicamente trayectorias de humedecimiento bajo carga constante, y la unidad corresponde a la condición del punto de tensión inicial de la muestra (Fig. 5.7a). En estos ensayos se trataba de estudiar el comportamiento del suelo en trayectorias de reducción de succión que partían de un estado tensional por debajo del aplicado durante la compactación.

Los ciclos de humedecimiento–secado bajo tensión isotrópica constante ( $\sigma_m - u_a = 0.6$  MPa) fueron aplicados variando la succión matricial ( $u_a - u_w$ ), empleando la técnica de traslación de ejes. En los ensayos ISO-1 y ISO-2, en la trayectoria de humedecimiento–secado se varió la succión matricial de forma continua manteniendo una presión de aire ( $u_a$ ) constante de 0.8 y 0.9 MPa respectivamente. La presión de agua se controló con un motor-reductor que imponía a una velocidad de variación de la succión constante igual a 0.02 MPa/día, hasta alcanzar la succión matricial mínima deseada (0.02 MPa). La trayectoria de humedecimiento se inició con un valor de la succión matricial de 0.8 MPa en el ensayo ISO-1 y de 0.7 MPa en el ensayo ISO-2 (trayectoria



C→D, Fig. 5.6). Posteriormente, la trayectoria de secado fue realizada incrementando de forma continua la succión matricial con la misma velocidad de variación (0.02 MPa/día).

En los ciclos de carga–descarga isotrópica la disminución de la presión de cámara se impuso de forma continua (0.04 MPa/día) por medio de un motor reductor a una velocidad de variación constante (Anexo B), hasta alcanzar la tensión media neta deseada, manteniendo la succión matricial a un valor constante. En los ensayos ISO-1 y ISO-2, se realizaron dos trayectorias de carga isotrópica: a) la muestra es cargada hasta el mismo valor aplicado en el proceso de compactación de 0.6 MPa, bajo succión matricial constante de 0.7 y 0.8 MPa respectivamente (Trayectoria B→C, Fig. 5.6); y b) la carga isotrópica se extendió hasta cruzar la superficie de fluencia (LC) movida por el fenómeno de colapso del suelo, en ambos ensayos la succión matricial se mantuvo constante a un valor de 0.2 MPa (E→F, Fig. 5.6). Los valores máximos de la tensión media neta son mostrados en la Tabla 5.5 y en la Fig. 5.6. La trayectoria de la descarga isotrópica, se realizó de forma continua a una velocidad de variación constante de 0.1 MPa/día (F→G, Fig. 5.6).

En los ensayos ISOW-1, ISOW-2 y ISOW-4, inicialmente la carga isotrópica fue incrementada de forma continua a una velocidad de variación de 0.04 MPa/día, bajo succión constante de 0.8, 0.8 y 0.5 MPa, respectivamente. En estos ensayos la tensión media neta ( $\sigma_m - u_a$ ) fue llevada hasta un valor de 0.3 MPa (valor menor del proceso de compactación). En el ensayo ISOW-3, la carga isotrópica alcanzada fue de 0.2 MPa, bajo succión constante de 0.8 MPa (Trayectoria B→C, Fig. 5.8). El objetivo de la trayectoria es quedar dentro de zona elástica (LC) resultante del proceso de compactación y, así tratar de obtener por medio de una reducción de la succión puntos que nos definan la forma de la superficie de fluencia. En la Tabla 5.5, se recogen los valores de la carga neta aplicada de forma continua en las trayectorias de carga y descarga isotrópica en los ensayos isotrópicos.

Por otro lado, en la trayectoria de humedecimiento en los ensayos ISOW-1, ISOW-2, ISOW-3, la presión de aire se mantuvo constante a un valor de  $u_a = 0.9$  MPa, iniciando la trayectoria con un valor de la succión matricial de 0.8 MPa y reduciendo de forma continua la succión matricial (0.02 MPa/día) hasta un valor de 0.01 MPa, bajo una tensión media neta constante de 0.3 MPa (ensayos ISOW-1 y ISOW-2) y de 0.2 MPa (ensayo ISOW-3) (C→D, Fig. 5.8). En el ensayo ISOW-4, compactando con más humedad mayor, la presión de aire fue impuesta a un valor de 0.6 MPa, y se inició la trayectoria de humedecimiento con un valor de la succión matricial de 0.5 MPa (punto de tensión C, Fig. 5.8). La presión de agua ( $u_w$ ) se incrementó de forma continua (0.02 MPa/día) hasta

un valor de 0.6 MPa, obteniéndose una succión matricial nula ( $u_a - u_w$ ) = 0.0 MPa, bajo una tensión media neta constante de 0.3 MPa (tanto la presión de agua como la presión de aire fueron suministradas con el mismo regulador de presión, para garantizar la igualdad de las presiones intersticiales) (C→D, Fig. 5.8).

Tabla 5.5 Valores de la tensión media neta alcanzados en trayectorias de carga o descarga a succión constante (mini-célula isótropa rígida).

Ensayo	Trayectoria * carga-descarga	$\sigma_m - u_a$ : inicio MPa	$\sigma_m - u_a$ : final MPa
ISO-1 y ISO-2	B→C	0.025	0.60
	E→F	0.60	1.30
	F→G	1.30	0.025
ISOW-1, ISOW-2 y ISOW-4	B→C	0.025	0.30
ISOW-3	B→C	0.025	0.20

\* Figuras 5.6 y 5.8

Dentro del programa de ensayos isótopos realizados con la mini-célula isótropa rígida, se completaron diez ensayos de humedecimiento-secado bajo tensión media neta constante, realizados en un solo sentido o en forma de ciclo, con una velocidad de variación constante de la presión de agua ( $u_w$ ) igual a 0.02 MPa/día. Por otra parte, se realizaron 2 ciclos de carga-descarga y 6 trayectorias de aumento de carga, bajo succión constante con incrementos de la tensión media neta igual a 0.04 MPa/día. Las principales características de los ensayos se resumen en la Tabla 5.6, donde se observa que el lapso de tiempo invertido es de aproximadamente 450 días de trabajo.

Como en el caso de los edómetros, algunos ensayos fueron desechados por distintos problemas (intrusión del agua de confinamiento a la muestra por rotura de la membrana y la fractura de los elementos interfase) pero fueron útiles para la puesta a punto del equipo y observar la repetibilidad de los resultados en los tramos de ensayo que fue necesario repetir.

Tabla 5.6 Serie de ensayos Isótopos (mini-célula isotrópica rígida).

Identificación Del ensayo	Trayectoria de tensiones	Descripción: $h/r=2$ $\Delta v v$ (MPa/día), $s = (u_a - u_w)$ , $p = (\sigma_m - u_a)$	Periodo (días)
ISO – 1	a) carga isotrópica	$\Delta v v = 0.04$ , $s = 0.8$ MPa ( $p_{\max}$ 0.6 MPa)	15
	b) mojado-secado	$\Delta v v = 0.02$ , $p = 0.6$ MPa ( $s_{\max}$ 0.02-0.2 MPa)	43
	c) carga-descarga	$\Delta v v = 0.04$ , 0.1, $s = 0.2$ MPa ( $p_{\max}$ 1.3 MPa)	30
ISO – 2	a) equilibrio	$s = 0.8$ MPa, $p = 0.025$ MPa	3
	b) carga isotrópica	$\Delta v v = 0.04$ , $s = 0.8$ MPa ( $p_{\max}$ 0.6 MPa)	15
	c) mojado-secado	$\Delta v v = 0.02$ , $p = 0.6$ MPa ( $s_{\max}$ 0.02-0.2 MPa)	48
	d) carga-descarga	$\Delta v v = 0.04$ , 0.1, $s = 0.2$ MPa ( $p_{\max}$ 1.3 MPa)	30
ISOW – 1	a) carga isotrópica	$\Delta v v = 0.04$ , $s = 0.8$ MPa ( $p_{\max}$ 0.3 MPa)	7.5
	b) mojado	$\Delta v v = 0.02$ , $p = 0.3$ MPa ( $s_{\max}$ 0.01 MPa)	39.5
ISOW – 2	a) equilibrio	$s = 0.8$ MPa, $p = 0.025$ MPa	3
	b) carga isotrópica	$\Delta v v = 0.04$ , $s = 0.8$ MPa ( $p_{\max}$ 0.3 MPa)	7.5
	c) mojado	$\Delta v v = 0.02$ , $p = 0.3$ MPa ( $s_{\max}$ 0.01 MPa)	39.5
ISOW – 3	a) carga isotrópica	$\Delta v v = 0.04$ , $s = 0.8$ MPa ( $p_{\max}$ 0.2 MPa)	5
	b) mojado	$\Delta v v = 0.02$ , $p = 0.2$ MPa ( $s_{\max}$ 0.01 MPa)	39.5
ISOW – 4	a) carga isotrópica	$\Delta v v = 0.04$ , $s = 0.5$ MPa ( $p_{\max}$ 0.3 MPa)	7.5
	b) mojado	$\Delta v v = 0.02$ , $p = 0.3$ MPa ( $s_{\max}$ 0.01 MPa)	24.5
	c) equilibrio	$(u_a - u_w) = 0.0$ MPa, $(\sigma_m - u_a) = 0.3$ MPa	46

$\Delta v v$  : velocidad de cambio de succión o tensión media, según el tipo de trayectoria que se considere.

#### 5.4 Programa y trayectoria del ensayo isotrópico realizado en la célula triaxial con control de succión

El programa consistió de un ensayo que se identificó como TISO-1, donde T se refiere a la célula Triaxial con control de succión, las letras ISO nos indica la realización de un ensayo isotrópico y la unidad hace referencia a la condición del punto de tensión inicial de la muestra de acuerdo a la Fig. 5.7b. El ensayo fue diseñado para proporcionar parámetros de un modelo elastoplástico tales como  $N(s)$ ,  $\lambda(s)$ ,  $\kappa$  y  $p_0$  así como la descripción de la forma y expansión de la superficie de fluencia (LC) propuesta por Alonso *et al.* (1990).

Los procedimientos de montaje de la probeta en la célula triaxial y de la puesta en marcha de los ensayos son los descritos en el Anexo C. En la sección 4.3.2, se describe la técnica de fabricación de las probetas y en la sección 3.7.1 se describe en detalle la célula Triaxial con control de succión

(Fig. 3.21) utilizada en esta tesis. El ensayo se realizó sobre una muestra fabricada de acuerdo a la técnica de tensión controlada con un diámetro de 38 mm y altura de 76 mm ( $h/r = 4$ ). Para la realización del ensayo de compresión isotrópica, el pistón inferior de la cámara de presión de carga vertical, es bloqueado a una altura especificada por un cilindro de acero de 65 mm de altura instalado entre la base y el pistón inferior (Fig. 3.21a). La célula de carga es desenroscada tanto del cabezal de la muestra como del pistón superior, lo que hace difícil que la muestra permanezca en posición vertical durante el montaje o trayectorias de carga-descarga. Para evitar este problema se usa un aparato de alineación no-contacto para el control de la inclinación de la probeta que reemplaza a la célula de carga. El aparato de alineación no-contacto, roscado al pistón superior, es mantenido 5 mm por encima del cabezal por medio de un tornillo bloqueador externo. El aparato de alineación prevé una inclinación máxima de  $0^{\circ}45'$  de la muestra durante las diferentes etapas (Fig. 3.22b). La muestra es sometida a un estado tensional isotrópico, con la muestra colocada sobre la base bloqueada, quedando las caras laterales y la cara superior, libres de contacto mecánico.

En la Tabla 5.7 se presentan los valores del estado inicial de la muestra ensayada y en la Fig. 5.7b se indica el estado inicial en el plano Proctor ( $w_0 = 11\%$ ,  $\rho_{d0} = 1.66 \text{ g/cm}^3$ ).

Inicialmente, se impuso una baja presión de 25 kPa con el objetivo de minimizar errores asociados con el ajuste de los LVDT internos y seguidamente se impone a la muestra las condiciones iniciales de ensayo (punto de tensión A de la Fig. 5.9). De igual manera que en los ensayos edométricos, tanto la presión de aire de poros ( $u_a$ ) como la presión de confinamiento, fueron incrementados simultáneamente por etapas manteniendo una diferencia de presión media neta sobre la muestra de  $(\sigma_m - u_a) < 25 \text{ kPa}$ , bajo condiciones no drenadas en la fase líquida. Se optó por una presión de aire ( $u_a$ ) de 0.9 MPa, que se mantuvo constante durante el desarrollo del ensayo. La succión matricial se impuso en la muestra empleando la técnica de traslación de ejes, manteniendo la presión de aire constante ( $u_a = 0.9 \text{ MPa}$ ) y controlando la presión de agua ( $u_w$ ). La succión inicial de 0.8 MPa se impuso aplicando una presión de agua de 0.1 MPa.

Tabla 5.7 Condiciones iniciales de la muestra. Ensayo isotrópico con control de succión (Célula triaxial con control de succión).

Ensayo	$w_0$ %	$\rho_{d0}$ $\text{g/cm}^3$	$e_0$	$Sr_0$ (%)	$\psi$ MPa	$\sigma_m - u_a$ MPa
TISO-1	$11 \pm 0.2$	1.66	0.627	48	0.8	0.6

$\sigma_m - u_a$ : tensión media de compactación estática en condiciones isotrópicas;  $\psi$ : succión total inicial (técnica psicrométrica).

La trayectoria de tensiones es análoga a la seguida en el ensayo EDO-1 pero en condiciones isotropas. Se han realizado trayectorias de cambio de succión y tensión bajo los siguientes criterios(Fig. 5.9):

- Ciclos de carga–descarga a succión matricial constante.
- Ciclos de humedecimiento–secado a tensión media neta constante.

La muestra es sometida a una trayectoria de carga isotropa (trayectoria A→B, Fig. 5.9) bajo succión constante de 0.8 MPa, la presión de confinamiento fue aumentada por etapas hasta una tensión media neta ( $\sigma_m - u_a$ ) = 0.6 MPa, (siendo 0.6 MPa la tensión de preconsolidación obtenida en el proceso de compactación), cada etapa de carga isotropa (0.05, 0.2, 0.4 y 0.6 MPa) fue mantenida aproximadamente por 2 días, controlando su deformación volumétrica hasta su equilibrio.

Las trayectorias de humedecimiento–secado, bajo una tensión isotropa constante de ( $\sigma_m - u_a$ ) = 0.6 MPa fueron realizadas variando la succión matricial, dichas trayectorias fueron impuestas manteniendo la presión de aire constante ( $u_a = 0.9$  MPa) previamente indicada y controlando la presión de agua ( $u_w$ ) que actúa sobre el disco cerámico (AVEA) del cabezal como del pedestal. Los cambio de presión de agua ( $u_w$ ) se aplican instantáneamente por escalones.

En la primera trayectoria de humedecimiento (B→C, Fig. 5.9), las etapas de cambio de succión fueron: ( $u_a - u_w$ ) = 0.4, 0.3, 0.1 y 0.02 MPa. Posteriormente, la muestra fue sometida a una trayectoria de secado en las siguientes etapas: 0.02, 0.1 y 0.15 MPa (C→D, Fig. 5.9). La segunda trayectoria de humedecimiento (F→G, Fig. 5.9) se realizó con la muestra sobreconsolidada en una sola etapa de cambio de succión de 0.15 a 0.02 MPa, el estado sobreconsolidado fue obtenido después de la trayectoria de carga–descarga (D→E→F, Fig. 5.9). En cada una de las etapas de humedecimiento y secado, se invirtió alrededor de 10 días, tiempo suficiente para alcanzar el equilibrio en términos de deformación y drenaje.

En las trayectorias de carga–descarga isotropa bajo succión constante, se tomaron los mismo criterios que en los ensayos edométricos. La carga isotropa se realizó en incrementos iguales de 0.2 MPa con el objetivo de evitar cambios en la succión matricial, por otro lado, la descarga isotropa también se realizó en igual de disminución de 0.2 MPa (ver trayectoria E→F y H→I Fig. 5.9). Las

trayectorias de carga fueron suficientemente extendidas con la finalidad de cruzar la superficie de fluencia.

El primer ciclo de carga–descarga isotrópica bajo una succión constante de  $(u_a - u_w) = 0.15$  MPa, se efectuó con la muestra ligeramente sobreconsolidada (trayectoria D→E, Fig. 5.9) tras un fenómeno de colapso desarrollado en la trayectoria B→C (Fig. 5.9), el segundo ciclo de carga–descarga isotrópica se realizó en la trayectoria H→I (Fig. 5.9), bajo una succión constante de  $(u_a - u_w) = 0.02$  MPa en una muestra sobreconsolidada tras un ciclo de carga y descarga (D→E→F, Fig.5.9).

En la Tabla 5.8 se presentan los valores de cada una de las etapas seguidas en los ciclos de humedecimiento–secado bajo una tensión media neta constante y en los ciclos de carga–descarga bajo una succión constante. La presión de aire ( $u_a$ ), como se ha mencionado, se mantuvo constante a un valor de 0.9 MPa durante todo el ensayo isotrópico.

Tabla 5.8 Trayectorias realizadas en el ensayo isotrópico (célula triaxial con control de succión).

Trayectoria	$(u_a - u_w)$ MPa	$(\sigma_m - u_a)$ MPa
Equilibrio: A	0.8	0.025
carga: A→B	0.8	0.05, 0.2, 0.4 y 0.6
mojado: B→C	0.4, 0.3, 0.1 y 0.02	0.6
secado: C→D	0.10 y 0.15	0.6
carga: D→E	0.15	0.7, 0.8, 1.0, 1.2 y 1.4
Descarga: E→F	0.15	1.2, 1.0, 0.8 y 0.6
mojado: F→G	0.15 y 0.02	0.6
carga: G→H	0.02	0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8 y 2.0
Descarga: H→I	0.02	1.8, 1.6, 1.4, 1.2, 1.0, 0.8, 0.6, 0.4, 0.2, 0.1 y 0.05

Se completaron dos trayectorias de humedecimiento y una de secado a tensión media constante, en un total de 9 etapas de equilibrio de succión. Por otra parte, se realizaron 2 ciclos de carga–descarga en 27 etapas, y una trayectorias de carga en 4 etapas. En la Tabla 5.9 se presenta un resumen de las principales características de la trayectoria tensional (identificación, trayectoria de tensión y el lapso

de tiempo en realizar dicha trayectoria). Hay que resaltar que en este único ensayo se invirtió un periodo de 147 días de trabajo.

Tabla 5.9 Trayectoria seguida en el ensayo isótropo (célula triaxial con control de succión).

Identificación del ensayo	Trayectoria de tensiones	Descripción, $h/r=4$ , $s = (u_a - u_w)$ , $p=(\sigma_m - u_a)$ , $v_q = 1.0 \mu\text{m}/\text{min}$	Periodo (días)
TISO – 1	a) equilibrio	$s = 0.8 \text{ MPa}$ , $p = 0.025 \text{ MPa}$	5
	b) carga isótropa	4 etapas a $s = 0.8 \text{ MPa}$ , $p_{\text{max}} = 0.6 \text{ MPa}$	9
	c) mojado-secado	6 etapas, $p = 0.6 \text{ MPa}$ , $s = 0.02 - 0.15 \text{ MPa}$	64
	d) carga-descarga	10 etapas a $s = 0.15 \text{ MPa}$ , $p_{\text{max}} = 1.4 \text{ MPa}$	28
	e) mojado	1 etapas a $p = 0.6 \text{ MPa}$ , $s_{\text{min}} = 0.02 \text{ MPa}$	5
	f) carga-descarga	18 etapas a $s = 0.02 \text{ MPa}$ , $p_{\text{max}} = 2.0 \text{ MPa}$	36

## 5.5 Programa de ensayos y trayectorias tensionales de los ensayos triaxiales en muestras no saturadas

La investigación experimental se efectuó con el objetivo de determinar los parámetros de resistencia al corte y examinar la respuesta tanto mecánica (tenso-deformacional) como hidráulica, (cambio de humedad) asociadas a los cambios de succión y de tensión desviadora. En los ensayos se ha pretendido constatar el ya conocido efecto de la succión en la resistencia de suelo, pero además se ha tratado de seguir distintos tipos de trayectorias previa a la rotura en el plano ( $p, s$ ) para observar su influencia en el comportamiento de suelo en la fase de corte. Durante todo el desarrollo de los ensayos se han medido tanto los cambios mecánicos como los de humedad.

### 5.5.1 Programa y trayectorias tensionales de los ensayos triaxiales realizados en la célula triaxial con control de succión

Las probetas fueron preparadas de acuerdo a la técnica de tensión controlada (ver sección 4.3.2), empleando el método de compactación estática en condiciones isótropas descrito en la sección 4.3.1.1. Los ensayos fueron ejecutados en la célula triaxial con control de succión, diseñada específicamente para realizar ensayos en suelos no saturados, no obstante el diseño del equipo también permite realizar ensayos en muestras saturadas ( $\phi = 38 \text{ mm}$  y  $h = 76 \text{ mm}$ ), la célula es descrita con detalle en la sección 3.7 (Fig. 3.21). Una de las innovaciones de la célula triaxial, es la obtención de las deformaciones locales tanto radial ( $\epsilon_r$ ) como axial ( $\epsilon_l$ ) en el centro de la muestra y medidas globales en contenidos de agua y cambio de volumen del suelo. Los procedimientos de

montaje del espécimen en la célula triaxial se describen en el Anexo C, así como los pasos previos al montaje y la puesta en marcha de los ensayos.

Los ensayos de laboratorio, fueron programados para seguir trayectorias tensionales con una determinada sistemática que nos permitieran validar las hipótesis empleadas en el modelo elastoplástico propuesto por Alonso *et al.* (1990). Para ello se realizaron diferentes ensayos de corte bajo una velocidad de deformación constante de  $(v_q) = 1.0 \mu\text{m}/\text{min}$  a succión matricial constante. Se analizaron muestras normalmente (NC) y sobreconsolidadas (OC), con el estado sobreconsolidado inducido por diferentes mecanismos previos a la etapa de corte:

- Un proceso de carga–descarga isótropa a succión constante.
- Cambios de succión (humedecimiento–secado) bajo tensión media neta constante, con una deformación de colapso dominante.
- Un elevado incremento–disminución de la succión bajo condiciones libres de retracción–hinchamiento.

Por otro lado, las muestras normalmente consolidadas fueron estudiadas al nivel máximo de tensión media neta que haya experimentado la muestra bajo succión constante y también en otras muestras después de un previo fenómeno de colapso.

Todas las muestras se han compactado con la misma carga y humedad. En la Tabla 5.10 se indica los valores de las condiciones iniciales de las muestras ensayadas y en la Fig. 5.10 se presenta en el plano Proctor la condición inicial de las muestras. Estas condiciones iniciales son iguales a las de los ensayos ISO-1, ISOW-1 y TISO-1.

Tabal 5.10 Condiciones iniciales de las muestras. Ensayos de compresión triaxial.

Ensayo	$w_0$ %	$\rho_{d0}$ $\text{g}/\text{cm}^3$	$e_0$	$Sr_0$ (%)	$\Psi$ MPa	$\sigma_m - u_a$ MPa
IS – OC – 03	11±0.2	1.67	0.625	47.7	0.8	0.6
IS – NC – 06	11±0.2	1.67	0.623	47.9	0.8	0.6
IS – NC – 12	11±0.2	1.66	0.629	47.4	0.8	0.6
IS – OC – 06	11±0.2	1.66	0.629	47.4	0.8	0.6
IWS – OC – 87	11±0.2	1.67	0.622	47.9	0.8	0.6
IWS – OC – 01	11±0.2	1.67	0.624	47.8	0.8	0.6
IWS – NC – 02	11±0.2	1.65	0.644	46.3	0.8	0.6

Nota:  $\sigma_m - u_a$ : tensión media de compactación estática en condiciones isótropas;  $\Psi$ : succión total inicial (técnica psicrométrica).



La nomenclatura empleada para identificar los diferentes ensayos realizados está de acuerdo a una descripción general de la trayectoria seguida en el ensayo, por ejemplo: *IS-NC-06*, la primera letra nos indica la etapa de carga Isótropa (I), la segunda letra la etapa de corte (S) (Shearing) y las dos últimas letras (NC) la condición de la muestra antes del corte, NC = normalmente consolidado o OC = sobreconsolidado, y el número nos indica la presión radial neta de cámara durante la fase de corte. Por otra parte en la nomenclatura de los ensayos *IWS-NC-01*, la primera letra se refiere también a la etapa de compresión Isótropa (I), la segunda letra nos indica que se realizaron cambios en contenido de agua (W) o cambios de succión y la tercera letra a la etapa de corte (S), la cuarta y quinta letra nos indican la condición de la muestra antes del corte (normalmente consolidado o sobreconsolidado) y el número corresponde al valor máximo o mínimo de succión a la que se somete a la muestra en el ensayo.

El programa experimental se ha clasificado en dos grupos de ensayos, el primer grupo son aquellos identificados con las letras *IS*, y el segundo grupo son aquellos identificados con las letras *IWS*, sumando un total de siete ensayos de compresión triaxial a velocidad de deformación constante, donde se siguieron diferentes trayectorias de tensión antes de aplicar una tensión desviadora las trayectorias seguidas en los ensayos se indican en las Fig. 5.11 - 5.19).

De igual manera que en los ensayos isótropos realizados en la misma célula triaxial, en el inicio del ensayo la presión de aire ( $u_a$ ) y la presión de confinamiento ( $\sigma_3$ ), fueron incrementadas simultáneamente por etapas manteniendo un valor  $(\sigma_m - u_a) \leq 25$  kPa bajo condiciones no drenadas en la fase líquida. Los ensayos fueron iniciados en el punto de tensión A de las Fig. (5.11– 5.19) a una tensión media neta  $(\sigma_m - u_a) = 0.025$  MPa y una succión matricial  $(u_a - u_w) = 0.8$  MPa, se optó por una presión de aire ( $u_a$ ) de 0.9 MPa, que se mantuvo constante durante el desarrollo del ensayo.

### *Ensayos del grupo IS*

Cada ensayo de esta serie, consistió de tres etapas: 1) etapa de equilibrio inicial, 2) etapa de compresión isótropa, y 3) etapa de aplicación de la tensión desviadora.

- 1) en la etapa de equilibrio inicial, se imponen las condiciones iniciales de tensión y succión de ensayo (punto de tensión A de las Fig. 5.11 – 5.14), bajo los siguientes valores: succión matricial de  $(u_a - u_w) = 0.8$  MPa, tensión media neta  $(\sigma_m - u_a) = 0.025$  MPa y un pequeño desviador ( $q$ ) de 10 kPa, de forma que la probeta siempre esté en contacto con la célula de carga. En esta etapa las

condiciones iniciales se mantienen como un mínimo de 72 horas, para garantizar las condiciones iniciales de ensayo.

- 2) al finalizar la etapa de equilibrio, la muestra es sometida a una trayectoria de carga isótropa (trayectoria A→B, Fig. 5.11 – 5.14) bajo succión constante ( $s = 0.8$  MPa), la presión de confinamiento se aumenta por etapas hasta la tensión media neta ( $\sigma_m - u_a$ ) deseada. Los incrementos de carga isótropa fueron aplicados mediante escalones iguales de valor comprendido entre 0.1 MPa y 0.2 MPa. Cada etapa de carga fue mantenida aproximadamente durante 48 horas controlando la deformación volumétrica hasta su equilibrio, por otro lado para evitar cambios importantes en la succión (disminución) se realizaron suficientes etapas de carga.
- 3) la etapa de corte, se realizó a una velocidad de deformación constante  $v_q = 1.0$   $\mu\text{m}/\text{min}$ , bajo una succión constante de  $(u_a - u_w) = 0.8$  MPa y una presión de cámara neta de  $(\sigma_3 - u_a) = 0.3, 0.6$  y  $1.2$  MPa, según el ensayo considerado. Se seleccionó una velocidad de corte suficientemente lenta, siendo esta velocidad la misma para todos los ensayos tanto del grupo IS como del grupo ISW, con ello se trata de asegurar la disipación continua de las presiones intersticiales generadas (Josa 1988).

Para el cálculo de la velocidad de corte ( $v_q$ ), Sivakumar (1993), hace mención de la expresión 5.1 presentada por Bishop y Henkel (1982) que estima el tiempo necesario para que ocurra una disipación del 95 % de la presión de agua ( $u_w$ ) en ensayos triaxiales drenados en muestras saturadas.

$$c_v = \frac{K}{\gamma_w m_v} \quad ; \quad m_v = \frac{\Delta \epsilon}{\Delta \sigma}$$

$$t = \frac{20 h^2}{0.75 c_v} \quad (5.1)$$

donde  $h$  es la altura de la muestra;  $c_v$  = coeficiente de consolidación;  $m_v$  = coeficiente de deformación volumétrica;  $K$  = permeabilidad del suelo al agua;  $\gamma_w$  = densidad del agua.

Sivakumar (1993) haciendo uso de esta ecuación obtuvo un tiempo de rotura de 11 días en ensayos triaxiales en muestras de caolín en condiciones no saturadas ( $h = 10$  cm), alcanzando deformaciones de corte de 20 a 35 % a una velocidad de desplazamiento de  $1.2$   $\mu\text{m}/\text{min}$ . Aplicando la misma ecuación (5.1) para los datos del material en estudio ( $K = 2.6 \times 10^{-9}$  m/s;  $m_v = 0.005$  m<sup>2</sup>/kK;  $\gamma_w = 9.8$

$\text{kN/m}^3$ ;  $2h = 0.076 \text{ m}$ ;  $c_v = 5.2 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ ) presentados anteriormente, se obtiene un tiempo requerido de falla de 8.5 días bajo condiciones drenadas. Sin embargo, dado que la permeabilidad no saturada es menor que la saturada, se optó por un tiempo de falla aproximadamente de 12 días alcanzando una deformación axial ( $\epsilon_l$ ) del orden de 20 %, a una velocidad constante de desplazamiento de  $1.0 \mu\text{m}/\text{min}$ . La forma de comprobar que la velocidad de falla no generara presiones de poro en la muestra, fue deteniendo la velocidad de deformación por un lapso de tiempo de 36 horas, durante este periodo de tiempo no se detectaron cambios de volumen de la muestra, ni alteraciones en el contenido de agua.

En la Figura 5.11, se presenta la trayectoria de tensiones seguida para el ensayo (IS-OC-03) en el espacio de tensiones ( $p, q, s$ ), donde  $p$  es la tensión media neta,  $s$  la succión matricial y  $q$  la tensión desviadora. Al finalizar la etapa de equilibrio, la muestra fue sometida a una trayectoria de compresión isotrópica (trayectoria A→B, Fig. 5.11) bajo succión constante ( $s = 0.8 \text{ MPa}$ ), la presión de confinamiento fue aumentada en dos etapas hasta una tensión media neta de  $(\sigma_m - u_a) = 0.3 \text{ MPa}$ . La muestra resulta sobreconsolidada debido al estado alcanzado en el proceso de compactación. Finalmente se impuso la etapa de corte a una velocidad de deformación constante de  $1.0 \mu\text{m}/\text{min}$ , (B→C, Fig. 5.11) bajo succión y presión neta de cámara constante ( $s = 0.80 \text{ MPa}$  y  $(\sigma_3 - u_a) = 0.3 \text{ MPa}$ ), hasta un valor máximo de  $(p) = 0.697 \text{ MPa}$  y  $q = 1.19 \text{ MPa}$  en que se produjo la rotura del suelo.

En el ensayo (IS-NC-06), la etapa de corte se realizó en una muestra normalmente consolidada, en la Fig. 5.12 se muestra la trayectoria de tensiones en el espacio de tensiones ( $p, q, s$ ). Al término de la etapa de equilibrio, la muestra fue sometida a una trayectoria de compresión isotrópica (trayectoria A→B, Fig. 5.12) bajo succión constante ( $s = 0.8 \text{ MPa}$ ), la presión de confinamiento fue aumentada por etapas hasta una tensión media neta de  $0.6 \text{ MPa}$ , (siendo  $0.6 \text{ MPa}$  la tensión de preconsolidación obtenida en el proceso de compactación), cada etapa de carga isotrópica ( $0.1, 0.2, 0.4$  y  $0.6 \text{ MPa}$ ) fue mantenida aproximadamente por 2 días. La etapa de corte (B→C, Fig. 5.12) sobre la muestra normalmente consolidada se realizó bajo succión constante ( $s = 0.80 \text{ MPa}$ ) y presión radial neta de cámara constante  $(\sigma_3 - u_a) = 0.6 \text{ MPa}$  hasta rotura ( $p = 1.19 \text{ MPa}$  y  $q = 1.76 \text{ MPa}$ ).

Por otro lado, en el ensayo (IS-NC-12), la muestra fue sometida a una trayectoria de carga isotrópica hasta un valor de tensión media neta de  $(\sigma_m - u_a) = 1.2 \text{ MPa}$  bajo succión constante de  $0.8 \text{ MPa}$ , la compresión isotrópica se realizó por etapas ( $0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$  y  $1.2 \text{ MPa}$ ) cada etapa fue

mantenida aproximadamente 2 días (trayectoria A→B, Fig. 5.13). Durante la etapa de corte (B→C, Fig. 5.13) se mantuvo inalterada la succión y la presión neta de cámara ( $(u_a - u_w) = 0.8$  MPa y  $(\sigma_3 - u_a) = 1.2$  MPa) alcanzando la rotura para un valor de tensión de corte de 2.88 MPa (punto de tensión C, Fig. 5.13).

Con la ejecución de estos ensayos (IS-OC-03, IS-NC-06, IS-NC-12) se encontró la línea de estado crítico para un valor en particular de succión  $(u_a - u_w) = 0.8$  MPa, además de proporcionar otros parámetros empleados en el modelo elastoplástico propuesto por Alonso *et al.* (1990). En la Fig. 5.14, se presenta la evolución de estos ensayos en el espacio de tensiones  $(p, q, s)$ .

En el ensayo (IS-OC-06), al término de la etapa de equilibrio, se realizó una trayectoria de carga–descarga isótropa (trayectoria A→B→C, Fig. 5.15) bajo succión constante ( $s = 0.8$  MPa), proporcionando un estado sobreconsolidado a la muestra antes de comenzar la etapa de corte (C→D, Fig. 5.15). Los incrementos de la tensión media neta, fueron aplicados en incrementos iguales ( $\Delta(\sigma_m - u_a) = 0.2$  MPa) con el objetivo de evitar cambios de succión hasta alcanzar una tensión media neta igual a  $(\sigma_m - u_a) = 1.6$  MPa (A→B, Fig. 5.15). La descarga se realizó en escalones iguales de  $\Delta(\sigma_m - u_a) = 0.2$  MPa hasta un valor de la tensión media neta de 0.6 MPa (trayectoria B→C, Fig. 5.15). Al igual que en los ensayos anteriores, la etapa de corte en el ensayo de compresión triaxial fue llevada a cabo a una velocidad de deformación constante de 1  $\mu\text{m}/\text{min}$ , manteniendo constante la succión y la presión neta de cámara ( $(u_a - u_w) = 0.8$  MPa y  $(\sigma_3 - u_a) = 0.6$  MPa), hasta rotura ( $q = 1.74$  MPa) (punto de tensión D, Fig. 5.15).

#### *Ensayos del grupo IWS*

En este grupo de ensayos, cada ensayo consistió de cuatro etapas: 1) etapa de equilibrio inicial, 2) etapa de compresión isótropa, 3) etapa de cambio de succión, y 4) etapa de aplicación de la tensión desviadora. En esta serie de ensayos (IWS), se tomaron los mismos criterios de procedimiento para la realización de las etapas 1, 2 y 4 de los ensayos (IS).

En el ensayo (IWS – OC – 01), se realizó un ciclo de humedecimiento–secado bajo tensión media neta constante  $(\sigma_m - u_a) = 0.6$  MPa al finalizar la etapa de compresión isótropa, generando un estado sobreconsolidado a la muestra antes de comenzar la etapa de corte. La trayectoria de carga isótropa se realizó en cuatro etapas hasta un estado de tensión  $(\sigma_m - u_a) = 0.6$  MPa, bajo succión constante ( $s$

= 0.8 MPa), en la Fig. 5.16 se muestra la correspondiente trayectoria de tensión (A→B). Después del proceso de carga isotrópica, se realizó una trayectoria de humedecimiento–secado variando la succión matricial. Los valores de las etapas de succión en la trayectoria de humedecimiento fueron: 0.8, 0.1 y 0.01 MPa. Posteriormente, se impuso en la muestra una trayectoria de secado en una etapa hasta un valor de 0.8 MPa. En cada una de las etapas, se requirió alrededor de 10 días para alcanzar el estado de equilibrio en términos de deformación y drenaje. En la Fig. 5.16 se muestran las trayectorias de humedecimiento y secado de B→C y C→D respectivamente. Durante la etapa de corte (D→E, Fig. 5.16) se mantuvo constante la succión matricial y la presión neta de confinamiento ( $(u_a - u_w) = 0.8$  MPa y  $(\sigma_3 - u_a) = 0.6$  MPa) hasta rotura (punto E, Fig. 5.16).

En la Figura 5.17, se muestra la trayectoria tensional seguida en el ensayo (IWS-NC-02), al finalizar la etapa de equilibrio, la muestra fue sometida a una trayectoria de carga isotrópica hasta un valor de tensión media neta igual a  $(\sigma_m - u_a) = 0.6$  MPa en cuatro etapas bajo una succión matricial constante de 0.8 MPa (trayectoria A→B, Fig. 5.17). Posteriormente, se continuó con una trayectoria de humedecimiento (B→C), siendo los valores de las etapas de cambio de succión: 0.8, 0.1 y 0.02 MPa. En cada etapa, se requirió un tiempo de 10 días para alcanzar el estado de equilibrio en términos de deformación y drenaje. En este ensayo, la etapa de compresión triaxial se inició a un valor de tensión media neta igual a  $(\sigma_m - u_a) = 0.6$  MPa y succión matricial de  $(u_a - u_w) = 0.02$  MPa (punto de tensión C, Fig. 5.17). Durante la etapa de corte se mantuvo constante la succión y la presión neta de cámara ( $(u_a - u_w) = 0.02$  MPa y  $(\sigma_3 - u_a) = 0.6$  MPa), hasta rotura ( $q = 1.20$  MPa).

En la Figura 5.19, se muestra la trayectoria seguida en el ensayo (IWS-OC-87), donde a la muestra antes de ser montada en la célula triaxial, se le impuso una succión total ( $\Psi$ ) aproximadamente de 87 MPa mediante su equilibrado con el aire de un ambiente cerrado cuya humedad relativa se controla con el uso de una disolución salina saturada de Nitrato de Magnesio Hexahidratado ( $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ), (ver Fig. 5.18). El movimiento de difusión del vapor es lento y para alcanzar el equilibrio se necesita un tiempo mayor de tres semanas (en este caso se emplearon 30 días).

Una vez alcanzado el equilibrio entre la humedad relativa del aire en la atmósfera y la de la fase gaseosa del suelo después de los 30 días, se determinaron las propiedades físicas de la muestra (peso, contenido de agua y dimensiones), se prosiguió a su montaje en la célula triaxial imponiendo unas condiciones tensionales iniciales: succión matricial de  $(u_a - u_w) = 0.8$  MPa, tensión media neta  $(\sigma_m - u_a) = 0.025$  MPa y un pequeño desviador ( $q$ ) de 10 kPa. En esta etapa dichas condiciones se

mantuvieron durante un lapso de tiempo de 17 días aproximadamente, registrando los cambios de volumen de agua de la muestra para determinar su humedad y el tiempo de equilibrio en términos de deformación y drenaje (punto de tensión A, Fig. 5.19). Al finalizar la segunda etapa de equilibrio, la muestra fue sometida a una trayectoria de carga isotrópica (A→B, Fig. 5.19) bajo succión matricial constante de 0.8 MPa, la presión de confinamiento fue aumentada por etapas hasta una tensión media neta  $(\sigma_m - u_a) = 0.6$  MPa, en etapas de carga isotrópica (0.1, 0.2, 0.4 y 0.6 MPa). Finalmente, se impuso la etapa de corte (B→C, Fig. 5.19) con la muestra sobreconsolidada por la retracción debida a la imposición de la succión total de 87 MPa. La compresión triaxial se realizó a succión y presión neta de cámara constante  $((u_a - u_w) = 0.8$  MPa y  $(\sigma_3 - u_a) = 0.6$  MPa), bajo una velocidad de deformación constante igual a 1.0  $\mu\text{m}/\text{min}$ , hasta rotura (punto de tensión C, Fig. 5.19).

En la Tabla 5.11 se presenta un resumen de las principales características de las trayectorias tensionales, en la que se invirtió un periodo alrededor de 290 días de trabajo en la célula triaxial con control de succión.

Los primeros ensayos realizados, cuyos resultados no fueron fiables y han sido desechados, sirvieron para corregir algunos defectos del equipo. Fundamentalmente la modificación del sistema de la imposición de la tensión axial y la adición de las piezas acopladas al transductor de carga. Algunos problemas posteriores, sin embargo, como la rotura de algunas piezas, caída de tensión esporádica o la medida incorrecta de determinados parámetros, hicieron que se tuviera que prescindir de diversos resultados, obligando, en su caso, a solventar dichos problemas (mecanización de nuevas piezas, etc.). Estos mismos ensayos previos fueron también aprovechados con el fin de comprobar la capacidad del equipo para mantener una determinada trayectoria tensional, como se ha mencionado anteriormente.

Tabla 5.11 Programa experimental de ensayos de compresión triaxial en muestras no saturadas. Célula triaxial con control de succión.

Identificación del ensayo	Trayectoria de tensiones	Descripción, $h/r=4$ , $s = (u_a - u_w)$ , $p = (\sigma_m - u_a)$ , $p_r = (\sigma_3 - u_a)$ ,	Periodo (días)
IS-OC-03	a) equilibrio	$s = 0.8$ MPa, $p = 0.025$ MPa	3
	b) carga isotrópica	2 etapas a $s = 0.8$ MPa, $p_{\max} = 0.3$ MPa	4
	c) corte ( $v_q = \text{cte.}$ )	$s = 0.8$ MPa, $p_r = 0.3$ MPa, $q_{\max} = 1.19$ MPa	13
IS-NC-06	a) equilibrio	$s = 0.8$ MPa, $p = 0.025$ MPa	4
	b) carga isotrópica	4 etapas a $s = 0.8$ MPa, $p_{\max} = 0.6$ MPa	13
	c) corte ( $v_q = \text{cte.}$ )	$s = 0.8$ MPa, $p_r = 0.6$ MPa, $q_{\max} = 1.76$ MPa	14
IS-NC-12	a) equilibrio	$s = 0.8$ MPa, $p = 0.025$ MPa	3
	b) carga isotrópica	7 etapas a $s = 0.8$ MPa, $p_{\max} = 1.2$ MPa	15
	c) corte ( $v_q = \text{cte.}$ )	$s = 0.8$ MPa, $p_r = 1.2$ MPa, $q_{\max} = 2.88$ MPa	14
IS-OC-06	a) equilibrio	$s = 0.8$ MPa, $p = 0.025$ MPa	3
	b) carga isotrópica	9 etapas a $s = 0.8$ MPa, $p_{\max} = 1.6$ MPa	16
	c) descarga	4 etapas a $s = 0.8$ MPa, $p_{\min} = 0.6$ MPa	10
	d) corte ( $v_q = \text{cte.}$ )	$s = 0.8$ MPa, $p_r = 0.6$ MPa, $q_{\max} = 1.74$ MPa	11
IWS-OC-87	a) equilibrio	$\Psi = 87$ MPa, $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	30
	b) equilibrio	$s = 0.8$ MPa, $p = 0.025$ MPa	17
	c) carga isotrópica	4 etapas a $s = 0.8$ MPa, $p_{\max} = 0.6$ MPa	8
	d) corte ( $v_q = \text{cte.}$ )	$s = 0.8$ MPa, $p_r = 0.6$ MPa, $q_{\max} = 1.65$ MPa	13
IWS-OC-01	a) equilibrio	$s = 0.8$ MPa, $p = 0.025$ MPa	3
	b) carga isotrópica	4 etapas a $s = 0.8$ MPa, $p_{\max} = 0.6$ MPa	8
	c) mojado	2 etapas a $p = 0.6$ MPa, $s_{\min} = 0.01$ MPa	20
	d) secado	1 etapa a $p = 0.6$ MPa, $s_{\max} = 0.8$ MPa	6
	e) corte ( $v_q = \text{cte.}$ )	$s = 0.8$ MPa, $p_r = 0.6$ MPa, $q_{\max} = 1.83$ MPa	15
IWS-NC-02	a) equilibrio	$s = 0.8$ MPa, $p = 0.025$ MPa	3
	b) carga isotrópica	4 etapas a $s = 0.8$ MPa, $p_{\max} = 0.6$ MPa	8
	c) mojado	2 etapas a $p = 0.6$ MPa, $s_{\min} = 0.02$ MPa	20
	d) corte ( $v_q = \text{cte.}$ )	$s = 0.02$ MPa, $p_r = 0.6$ MPa, $q_{\max} = 1.20$ MPa	12

$V_q$ : velocidad de deformación constante = 1.0  $\mu\text{m}/\text{min}$ ;  $p_r$ : presión neta de cámara constante de corte.