

CAPÍTULO 6

RESULTADOS EXPERIMENTALES

6.1 Resultados edométricos con control de succión

6.1.1 Introducción

En esta sección se presentan y se analizan los resultados experimentales obtenidos en el programa de investigación desarrollado en la nueva célula edométrica con control de succión, cuyas características se han descrito en el Capítulo 3. El objetivo del programa de ensayos desarrollados ha sido estudiar los cambios de volumen en una arcilla de baja plasticidad no saturada. Se trató de aplicar trayectorias de tensiones en las que el suelo en una primera etapa es sometido a humedecimiento hasta alcanzar una succión muy baja. Posteriormente, se procedió a la desaturación de la muestra manteniendo constante en toda la etapa la tensión vertical neta. En la segunda etapa se procedió con un ciclo de carga–descarga de la tensión manteniendo la succión matricial constante. En una tercera etapa, se redujo la succión y bajo esta condición de la succión matricial se realizó un ciclo de carga–descarga final.

Este programa de ensayos ha servido para los siguientes fines:

- Influencia del estado inicial (densidad seca (porosidad) y grado de saturación) en el comportamiento volumétrico.
- Efecto de las tensiones aplicadas en el comportamiento volumétrico.
- Efecto de los cambios de succión en el comportamiento volumétrico.

6.1.2 Aspectos generales de las variables del estado tensional

El comportamiento de la arcilla ha sido analizado a través de dos variables independientes de estado tensional: la tensión neta ($\sigma_{ij} - u_a \delta_{ij}$) y la succión matricial $(u_a - u_w) \delta_{ij}$, donde σ_{ij} es la tensión total, mientras que u_a y u_w corresponden a la presión de la fase gaseosa y líquida respectivamente (Bishop y Blight, 1963; Matyas y Radhakrishna, 1968; Fredlund y Morgenstern, 1977).

En esta memoria de tesis la relación de humedad (definida como la relación entre el volumen de agua al volumen de sólidos) $-\delta e_w = G_s \delta w$ ha sido seleccionada como una variable de estado volumétrico asociada con la succión matricial, de la misma manera que la variable de estado volumétrico, la relación de vacíos $-de$ es la asociada con la variable de tensión neta. Diagramas de trayectorias de tensiones convencionales en el plano $(u_a - u_w)$ vs. $(\sigma_m - u_a)$ y diagramas de compresión en el plano e vs. $(\sigma_m - u_a)$ son complementados con los gráficos de curvas de retención en el plano $(u_a - u_w)$ vs. e y gráficos de variables de estado volumétrico en el plano e vs. e_w . Romero y Vaunat (2000) utilizaron los mismos planos para representar el comportamiento de un suelo bajo condiciones edométricas e isotropas. La ventaja de usar la variable de estado volumétrico e_w es que tiende a la relación de vacíos e bajo un estado muy cercano al saturado ($S_r = e_w/e \rightarrow 1$). Los cambios de e_w se estiman directamente en laboratorio midiendo el volumen de agua que entra o sale en la muestra de suelo si se conoce el volumen de sólidos.

La variable de estado volumétrico e_w ha sido usada en diferentes contextos por diferentes autores trabajando en suelos no saturados. Toll (1995) describió un modelo conceptual para trayectorias de secado y humedecimiento usando e_w para representar el contenido de agua de un suelo no saturado sobre el mismo diagrama que la relación de vacíos. Prashanth *et al.* (1998) lo llamó relación de vacíos de agua o contenido del volumen de agua. Estos autores lo usaron en conjunción con la relación de vacíos para describir las curvas de compactación. Por otro lado, Wheeler (1996) usó el volumen de agua específico ($v_w = 1 + G_s w = 1 + e_w$) y el volumen específico ($v = 1 + e$) como variables de estado volumétrico describiendo el comportamiento de un suelo no saturado.

6.1.3 Resultados de los ensayos edométricos

6.1.3.1 Ensayo EDO – 1

En la Fig. 6.1 se presentan los resultados del ensayo edométrico sobre la arcilla de baja plasticidad en estudio, presentando las siguientes condiciones iniciales (punto B): $e_0 = 0.68$; $e_{w0} = 0.29$; $(e_w/e)_0 = 0.43$ y $(u_a - u_w)_0 = 0.8$ MPa. La máxima tensión de fabricación de la probeta fue de $(\sigma_m - u_a) = 0.6$ MPa, de acuerdo al apartado 4.3.2 (compactación estática en condiciones isotropas: tensión controlada). En la Fig. 5.1 se muestra en el plano Proctor las condiciones iniciales. Los ensayos fueron realizados con la célula edométrica descrita en el apartado 3.5.2.

El gráfico de la curva de retención para este suelo (ver diagrama arriba-izquierda, Fig. 6.1) es complementado con el gráfico de la trayectoria de tensión (diagrama arriba- derecha), el plano de las variables de estado volumétricos (diagrama abajo-izquierda) y el plano de compresión vertical (diagrama abajo-derecha). Casi todos los diagramas se usan en las representaciones convencionales de la mecánica de suelos no saturados, excepto el plano de las variables de estado volumétricos. Este diagrama es equivalente a la representación convencional de las curvas de compactación (densidad seca vs. contenido de agua gravimétrico), donde las líneas discontinuas nos indican los contornos de igual grado de saturación. Esta combinación de representar los datos experimentales en este plano permite la interpretación de los resultados de la curva de retención en un contexto más amplio del acoplamiento hidromecánico. Romero y Vaunat (2000), proponen referirse a este tipo de gráfico como SWEP: S por la succión matricial, W por la relación de agua, E por la relación de vacíos y P por la tensión aplicada.

La trayectoria de tensión seguida de B a J se resume de la siguiente manera (descrita a detalle en la sección 5.2). Después de aplicar la trayectoria de carga vertical hasta un valor de tensión vertical neta de $(\sigma_v - u_a) = 0.6$ MPa (B→C) bajo succión constante de $(u_a - u_w) = 0.8$ MPa, se prosiguió con un ciclo de humedecimiento-secado (C→E) bajo una tensión vertical neta constante $(\sigma_v - u_a) = 0.6$ MPa, que se realizó mantenido la presión de aire constante a un valor de $u_a = 0.9$ MPa y controlando la presión de agua (u_w). La trayectoria de humedecimiento se realizó por etapas hasta un valor de $(u_a - u_w) = 0.05$ MPa (punto D). Después la muestra fue sometida a una trayectoria de secado hasta un valor de $(u_a - u_w) = 0.3$ MPa (punto E). Posteriormente, la muestra fue sometida a una trayectoria de carga (E→F) y descarga (F→G) bajo succión constante $(u_a - u_w) = 0.3$ MPa. Enseguida se prosiguió con una trayectoria de humedecimiento hasta un valor de succión de $(u_a - u_w) = 0.05$ MPa (punto H), y finalmente, se repitió una trayectoria de carga (H→I) y descarga (I→J) a succión constante $(u_a - u_w) = 0.05$ MPa.

En el plano de la variable de estado volumétrico (abajo-izquierda, Fig. 6.1), se observa que en el proceso de humedecimiento (C→D) se desarrollan importantes cambios en el grado de saturación ($S_r = e_w/e$), donde la trayectoria de la variable de estado volumétrico ($\delta e/\delta e_w \approx -0.65$) cruza casi perpendicularmente a las líneas de igual grado de saturación ($S_r = e_w/e$). Por otra parte, estos importantes cambios de grado de saturación están asociados con la ocurrencia de un proceso irrecuperable de compresión volumétrica, debido principalmente al colapso del esqueleto del suelo. Esta forma del incremento en el grado de saturación puede ser relacionada con el desplazamiento de

la superficie LC (loading–collapse) definido por Alonso *et al.* (1990) en un proceso de humedecimiento, el cual es asociado con un colapso irreversible de la macroestructura y del llenado de los macroporos. Este proceso de endurecimiento de la macroestructura induce una densificación de la macroestructura obteniendo un valor de entrada de aire mayor. En la trayectoria de secado (D→E), se observa una respuesta rígida, asociada con cambios pequeños en agua y en la relación de vacíos. No obstante, en esta trayectoria de incremento de succión es más fácil expulsar agua que la inducida por la deformación del esqueleto.

En la Fig. 6.2 se muestran los resultados correspondientes a las diferentes etapas de equilibrio en términos de la deformación volumétrica (ϵ_v), relación de agua (e_w) y grado de saturación ($S_r = e_w/e$) con respecto a los cambios de succión matricial ($s = u_a - u_w$). Se han detectado deformaciones de colapso poco importantes en las primeras etapas de humedecimiento, concentrándose en la última etapa de mojado la deformación de colapso (valores de succión menores que 0.15 MPa). Esta trayectoria de humedecimiento (C→D) ocasiona un desplazamiento de la superficie LC, induciendo cambios en la estructura del suelo que afectará a los siguientes procesos. En la etapa de secado (D→E) se observa una pequeña retracción de 0.21 %. Por otro lado, en la trayectoria de humedecimiento (G→H) se observa una expansión de 0.08 %.

En la Fig. 6.3, se presenta la evolución temporal de la deformación volumétrica (ϵ_v), relación de agua (e_w) y grado de saturación ($S_r = e_w/e$) en la trayectoria de humedecimiento (C→D), para cada una de las etapas de equilibrado bajo una tensión vertical neta constante de $(\sigma_v - u_a) = 0.6$ MPa. Claramente se observa que no se presentan cambios significativos tanto en la deformación volumétrica (ϵ_v) como en los contenidos de agua hasta valores menores de succión de 0.15 MPa. En cada una de las etapas, alrededor de 5 días fue el tiempo suficiente para alcanzar el estado de equilibrio en términos de deformación y drenaje.

En la Fig. 6.4 se presentan los resultados correspondientes a las diferentes etapas de equilibrio en términos de e , e_w y $S_r = e_w/e$ con respecto a los cambios de tensión vertical neta ($\sigma_v - u_a$). Estos ensayos se llevaron a cabo en la modalidad de control de carga. La carga se aplicó por incrementos, con un intervalo aproximado de 48 horas entre incrementos sucesivos. En las figuras 6.5 y 6.6, se observa cómo se alcanza el equilibrio en deformación bajo una carga constante.

En las trayectorias de carga realizadas a succión constante (u_a-u_w) (trayectorias E→F y H→I), es de esperar una reducción del volumen de vacíos como consecuencia del incremento de la tensión neta aplicada $\Delta(\sigma_v-u_a)$. Este fenómeno, implicaría un aumento del grado de saturación ($S_r = e_w/e$), pero debido a la expulsión de agua, tal como se observa en las Fig. 6.4 y 6.5 el grado de saturación permanece prácticamente constante. En la Fig. 6.1 (abajo-izquierda) se observa en las trayectorias de carga (E→F y H→I) una tendencia paralela a las líneas de igual grado de saturación ($S_r = e_w/e$).

En la Fig. 6.6 se presenta la evolución temporal de las deformaciones recuperables, contenidos de agua y grados de saturación para las diferentes etapas realizadas en la trayectoria de la descarga vertical neta (F→G), donde se observa una recuperación elástica del $\epsilon_v = -0.18\%$, manteniendo un contenido de agua y grado de saturación prácticamente constantes.

En la Fig. 6.7, se presenta el comportamiento mecánico en el plano e vs. σ_v-u_a de los ciclos de carga-descarga (E→F→G y H→I→J) bajo succión matricial constante de 0.3 MPa y de 0.05 MPa respectivamente. El comportamiento hidráulico, también se representa en el mismo gráfico en la trayectoria de humedecimiento y secado (C→D →E) en los planos e, e_w vs. u_a-u_w . Finalmente se pretende analizar de forma cualitativa el movimiento de la superficie de fluencia (LC) en el espacio (u_a-u_w, σ_v-u_a) (figura superior, Fig. 6.7). Para ello se han considerado los mismos parámetros del modelo propuesto por Alonso *et al.* (1990), ya indicados en el Capítulo 4 y que se obtuvieron previamente a partir de los ensayos de compresión isotropa saturada y los ensayos de colapso sin control de succión. Estos parámetros se indican en la Tabla 6.1. En la Fig. 6.7 se muestra la forma adoptada de la curva LC inicial y su desplazamiento debido a una disminución en la succión y al incremento de la tensión vertical neta (LC final).

Tabla 6.1 Parámetros del modelo utilizados en el análisis de los ensayos edométricos.

$\lambda(0)$	κ	β (1/MPa)	r	p^c (kPa)
0.073	0.011	3	0.8	2

Se han utilizado estos parámetros debido a que con ellos se han obtenido unas superficies de fluencia en las que se han ajustado bien los puntos de paso del comportamiento elástico a elastoplástico medido en los ensayos. Hay que tener presente que el modelo está formulado en

términos de tensiones medias ($\sigma_m - u_a$) y en los ensayos edométricos se ha utilizado tensión vertical neta ($\sigma_v - u_a$). Por tanto la representación de la superficie LC es sólo cualitativa.

Por otro lado, se han determinado los parámetros asociados a la deformabilidad del suelo en un estado no saturado bajo condiciones edométricas. En las trayectorias de carga y descarga de la tensión vertical neta, se observa una zona antes y después del punto de fluencia, que se puede obtener por la intersección de la extrapolación lineal de ambas zonas. Los parámetros κ (bajo condiciones isotrópicas, en el plano $v : \ln p$) o κ_{edo} (bajo condiciones edométricas, en el plano $v : \ln(\sigma_v - u_a)$) representan la compresibilidad en el rango elástico, y $\lambda(s) = -\delta v / \delta \ln p$ o $\lambda_{edo}(s) = -\delta v / \delta \ln(\sigma_v - u_a)$, el equivalente a los parámetros de compresibilidad en el rango elastoplástico. En la Fig. 6.7 se indican los valores obtenidos de los parámetros de compresibilidad en términos de tensión vertical neta. En la trayectoria de carga bajo una succión constante mayor, se presentó una respuesta más rígida ($\lambda_{edo}(0.3) = 0.084$, $\lambda_{edo}(0.05) = 0.12$). En el caso de la descarga, en ambas condiciones de succión matricial, el parámetro de compresibilidad de la zona elástica resultó con el mismo valor ($\kappa_{edo} = 0.002$).

La tensión de preconsolidación p_0 (condiciones isotrópicas, en el plano $v : \ln p$) o σ_{v0} (condiciones edométricas, en el plano $v : \ln(\sigma_v - u_a)$), determinada por la intersección de la extrapolación lineal de la zona elástica y plástica, se presenta en el plano $s : \sigma_v - u_a$. Se observa cómo se modifica la superficie de fluencia (LC). Una vez que en la trayectoria de carga (E→F) alcanza el punto σ_{v01} , el suelo se comprime plásticamente y la superficie LC es llevada al punto de tensión final de la trayectoria (E→F). En el caso de la trayectoria de carga (H→I) las deformaciones irreversibles comenzarán después de alcanzar el punto de tensión σ_{v02} , moviendo la superficie de fluencia a la posición final (LC final H→I) (Fig. 6.7).

En las trayectorias de humedecimiento (C→D) y secado (D→E), presentadas en el espacio e vs. $u_a - u_w$ y e_w vs. $u_a - u_w$ (Fig. 6.7), se observa que en las primeras etapas de reducción de la succión no presenta valores significativos de entrada de agua en la muestra, mientras que en la última etapa de humedecimiento se observa una entrada de agua muy importante, generando el 80 % de la deformación de colapso medido y repercutiendo en un movimiento de la superficie de fluencia inicial. En la trayectoria de secado (D→E), obtenemos el parámetro de rigidez elástica de $\kappa_{sedo} = 0.002$.

6.1.3.2 Ensayo EDO – 2

En la Fig. 6.8, se presentan los resultados edométricos del ensayo EDO-2 en un gráfico SWEP. Las condiciones iniciales (punto A) obtenidas después de la compactación isotrópica son: $e_0 = 0.74$; $e_{w0} = 0.211$; $\Psi_0 = 2.1$ MPa y $(e_w/e)_0 = 0.28$, y la tensión máxima de fabricación $(\sigma_m - u_a) = 0.6$ MPa. En la Fig. 5.1 se muestran las condiciones iniciales en el plano Proctor.

Las trayectorias de tensiones realizadas de A a J, fueron semejantes a las del ensayo descrito en el párrafo anterior (ver sección 5.2). A partir de una succión inicial total $\Psi_0 = 2.1$ MPa (determinada con la técnica psicrométrica) (Punto A, Fig. 6.8) la muestra fue sometida a un proceso de equilibrado a una succión matricial de $(u_a - u_w) = 0.8$ MPa bajo una carga de 0.05 MPa. Este proceso de equilibrado repercutió en un ligero aumento de volumen ($\epsilon_v = 0.30\%$) (punto B, Fig. 6.8).

En el plano de estado volumétrico (abajo-izquierda, Fig. 6.8), se observa en el proceso de humedecimiento (C→D) un aumento en el grado de saturación, en donde la trayectoria de la variable de estado volumétrico ($\delta e / \delta e_w \approx -1.2$) cruza casi perpendicularmente las líneas de igual grado de saturación ($S_r = e_w/e$), alcanzando un valor por encima del 80 %. Este fenómeno está asociado, principalmente al colapso del esqueleto del suelo.

En la Fig. 6.9 se muestran los resultados de las diferentes etapas de equilibrio en términos de la deformación volumétrica (ϵ_v), relación de agua (e_w) y grado de saturación ($S_r = e_w/e$) con respecto a los cambios de succión matricial ($s = u_a - u_w$). Las deformaciones de colapso son generadas desde primeras etapas de humedecimiento (C→D). Este comportamiento es debido a que la muestra ha sido preparada con una estructura menos densa (Tabla 6.2) que la del ensayo EDO-1, lo que favorece al colapso.

En la Fig. 6.10, se presenta la evolución temporal de la deformación volumétrica (ϵ_v), relación de agua (e_w) y grado de saturación ($S_r = e_w/e$) de la trayectoria de humedecimiento (C→D), bajo una misma carga vertical neta constante de $(\sigma_v - u_a) = 0.6$ MPa.

En la Fig. 6.11 se muestran los resultados de las diferentes etapas de equilibrio en términos de e , e_w y $S_r = e_w/e$ con respecto a los cambios en la tensión vertical neta ($\sigma_v - u_a$), en donde el proceso de colapso, hace tender al suelo a un estado casi saturado, densificando la macroestructura, obteniendo un valor de entrada de aire mayor y rigidizando la respuesta del suelo en las etapas posteriores. La

deformación en esta etapa fue de 11.2 %, lo cual corrobora, el hecho de que un suelo experimenta un colapso importante al aumentar su grado de saturación cuando posee una estructura muy abierta. En la trayectoria de secado (D→E) también se observa una ligera retracción elástica ($\epsilon_v = 0.22$ %), mientras que en la trayectoria de mojado (G→H) se manifiesta en una recuperación elástica ($\epsilon_v = 0.13$ %).

Este ensayo edométrico no fue del todo satisfactorio para reproducir los movimientos de la superficie de fluencia LC en el plano $u_a - u_w$ vs. $\sigma_v - u_a$, debido a la incertidumbre para definir los valores de la tensión de preconsolidación σ_{v0} (Fig. 6.12). Debido a que el pistón que transmite la carga vertical neta a la muestra alcanzó su desplazamiento límite (número 7 y 8, Fig. 3.10), originado por las deformaciones volumétricas acumuladas hasta el punto de tensión (E) más las deformaciones de las primeras etapas de la trayectoria de carga (E→F). La solución inmediata que se tomó, fue descargar la muestra totalmente, cerrando la válvula que conecta el sistema de presión de agua a la muestra para evitar la pérdida de agua del suelo durante el proceso de la descarga vertical neta. Posteriormente se redujo la presión de aire (u_a) y la presión de cámara (σ_v) simultáneamente hasta obtener una presión neta nula en la muestra. Una vez retirado el cuerpo superior que conforma el equipo edométrico, se retiró el pistón de carga (ver Figuras 3.8 y 3.10) para colocar una piedra porosa anular muy permeable de 3 mm de altura sobre la muestra. Después se colocó el pistón de carga sobre la piedra porosa (número 12, Fig. 3.10), prosiguiendo con el montaje del cuerpo superior del edómetro. Una vez realizado el montaje, se incrementó simultáneamente la presión de aire (u_a) y cámara (σ_v), así como la presión de agua (u_w), hasta alcanzar las condiciones del punto de tensión (E) ($u_a - u_w = 0.3$ MPa y $\sigma_v - u_a = 0.6$ MPa), manteniendo dichas condiciones durante un lapso de tiempo de 10 días, para garantizar las condiciones impuestas, antes de comenzar la trayectoria de carga E→F, registrando lecturas de tiempo–desplazamiento y tiempo–cambio de contenido de agua.

En la Fig. 6.12, se presenta el comportamiento mecánico de los ciclos de carga-descarga (E→F→G y H→I→J), el comportamiento hidráulico de la trayectoria de humedecimiento-secado (C→D→E) y en el espacio ($u_a - u_w$, $\sigma_v - u_a$) se analiza de forma cualitativa el movimiento de la superficie LC, considerando los parámetros ($\lambda(0)$, κ , β , r y p^c) de la Tabla 6.1.

En la Fig. 6.12, en el espacio $e : \sigma_v - u_a$, se muestran los valores de los parámetros de compresibilidad en términos de tensión vertical neta, presentando el suelo una respuesta más rígida para la

trayectoria de carga bajo una succión constante mayor ($\lambda_{edo}(0.3) = 0.06$, $\lambda_{edo}(0.05) = 0.11$). En la trayectoria de la descarga donde se observan deformaciones recuperables, el parámetro de compresibilidad elástica prácticamente fue el mismo en ambas condiciones de succión matricial ($\kappa_{edo}(0.3) = 0.002$, $\kappa_{edo}(0.05) = 0.0027$).

La tensión de preconsolidación σ_{v0} (condiciones edométricas, en el plano $v : \ln(\sigma_v - u_a)$), determinada por la intersección de la extrapolación lineal de la zona elástica y plástica, presenta valores, tanto para σ_{v01} como σ_{v02} , que son mayores a los valores obtenidos para la superficie de fluencia LC utilizando los parámetros presentados en la Tabla 6.1 (Fig. 6.12).

Analizando el comportamiento hidráulico, en la Fig. 6.12, se observa que desde las primeras etapas de reducción de succión se presenta entrada de agua a la muestra, generando importantes cambios de volumen irreversibles y repercutiendo en un movimiento de la superficie de fluencia. En la trayectoria de aumento de succión (D→E), se genera una compresión elástica de 0.22% con un parámetro de rigidez elástico de $\kappa_{sedo} = 0.002$.

6.1.3.3 Ensayo EDO – 3

En este ensayo, la muestra se fabricó con una tensión máxima de $(\sigma_m - u_a) = 0.3$ MPa, dando como resultado unas condiciones iniciales (punto B): $e_0 = 0.78$; $e_{w0} = 0.305$; $(e_w/e)_0 = 0.39$ y $(u_a - u_w)_0 = 0.9$ MPa (Fig. 6.13). En la Fig. 5.1 se muestran estas condiciones en el plano Proctor. A diferencia de los ensayos que complementan el programa, la muestra se fabricó bajo una tensión media neta menor $(\sigma_m - u_a)$, dando como resultado una densidad seca muy similar a la del ensayo EDO-2, pero con un grado de saturación mayor (Tabla 6.2). En la Fig. 6.13 se presentan los resultados del ensayo EDO-3 en un gráfico SWEP, donde se observa que la deformación de colapso, en la trayectoria de humedecimiento (C→D), es menor que la obtenida en el ensayo EDO-2. Este comportamiento, ratifica el hecho de que los suelos con un grado de saturación inicial bajo, presentan una deformación de colapso mayor que los compactados con mayor humedad cuando son sometidos a un proceso de humedecimiento.

En el plano de estado volumétrico (abajo-izquierda, Fig. 6.13), se observa que en el proceso de humedecimiento (C→D) la trayectoria de la variable de estado volumétrico cruza las líneas de igual grado de saturación con una pendiente menor ($\delta e / \delta e_w \approx -0.50$), alcanzando un valor de grado de

saturación relativamente bajo aunque por encima del 50 %, causando unas deformaciones irrecuperables del orden del 2.6 % y moviendo la superficie de fluencia LC.

En las Fig. 6.14 se muestran las curvas de la deformación volumétrica (ϵ_v), relación de agua (e_w) y grado de saturación ($S_r = e_w/e$) para cada una de las etapas de cambio de succión matricial ($s = u_a - u_w$). En las primeras etapas se observa que las deformaciones irrecuperables en la trayectoria (C→D) son poco importantes, concentrándose en la última etapa el 62 % de la deformación de colapso medido. En la Fig. 6.15 se presenta la evolución temporal de la trayectoria de humedecimiento (C→D), en términos de la deformación volumétrica (ϵ_v), relación de agua (e_w) y grado de saturación ($S_r = e_w/e$). En la figura se observa que la mayor cantidad de agua entra en la muestra en la última etapa, manifestándose en un aumento claro de la compresión y del grado de saturación.

Por otro lado, en la Fig. 6.16 se indican los resultados de las diferentes etapas de equilibrio en términos de e , e_w y $S_r = e_w/e$ con respecto a los cambios de tensión vertical neta ($\sigma_v - u_a$). Se observa una reducción del volumen de vacíos como consecuencia del incremento de la carga $\Delta(\sigma_v - u_a)$, aumentando ligeramente el grado de saturación y la expulsión de agua de la muestra, mientras que al disminuir la carga, las deformaciones se recuperan parcialmente manteniéndose prácticamente constante el grado de saturación y el contenido de agua.

En la Fig. 6.17 se presenta el comportamiento hidromecánico y el movimiento de la superficie de fluencia (LC) de carácter cualitativo en el espacio ($u_a - u_w$, $\sigma_v - u_a$), considerando los mismos parámetros de la Tabla 6.1. En el espacio $e : \sigma_v - u_a$ (Fig. 6.17), se presentan los valores de los parámetros de compresibilidad, $\lambda_{edo}(0.3) = 0.12$ y $\lambda_{edo}(0.05) = 0.14$, para el parámetro de compresibilidad elástica prácticamente se obtiene el mismo valor en ambas condiciones ($\kappa_{edo}(0.3) = 0.0036$, $\kappa_{edo}(0.05) = 0.0034$). También se observa que en la trayectoria de secado (D→E) la deformación no se altera de forma significativa (retracción elástica = 0.07 %), mientras que en la trayectoria de mojado (G→H) se manifiesta en una ligera recuperación elástica ($\epsilon_v = 0.25$ %).

La tensión de preconsolidación σ_{v0} (condiciones edométricas, en el plano $v : \ln \sigma_v - u_a$), determinado por la intersección de la extrapolación lineal de la zona elástica y plástica, se presenta en el plano $s : \ln(\sigma_v - u_a)$, donde se observa el desplazamiento de superficie de fluencia LC inicial. En la trayectoria de carga (E→F) cuando intercepta la LC en el punto de tensión σ_{v01} , el suelo comenzará a

comprimirse plásticamente, moviendo la LC al punto final de la trayectoria. En el caso de la trayectoria de carga (H→I) las deformaciones irreversibles comenzaran después de alcanzar la LC en el punto de tensión σ_{v02} , moviendo la LC a la posición final (LC final H→I) (Fig. 6.17).

En el plano $e_w : u_a - u_w$, se presenta la curva de retención (C→D→E), donde se observa cómo conforme entra agua a la muestra se presentan deformaciones irreversibles, afectando la superficie de fluencia. Por otro lado, en la trayectoria de aumento de la succión se genera una ligera retracción elástica de 0.07% obteniendo el parámetro de rigidez elástico ($\kappa_{sedo} = 0.001$) (Fig. 6.17).

6.1.3.4 Ensayo EDO – 4

En este ensayo, la probeta se fabricó con un contenido de humedad más cercano al óptimo de compactación (Tabla 6.2). Las condiciones iniciales de la muestra son las presentadas en el punto de tensión (A) (Fig. 6.18): $e_0 = 0.59$; $e_{w0} = 0.33$; $\Psi_0 = 0.50$ MPa y $(e_w/e)_0 = 0.55$ (en el plano Proctor, Fig. 5.1).

Las trayectorias de tensiones realizadas de A a J, fueron análogas a los ensayos descritos en los párrafos anteriores (ver sección 5.2). Debido a que su succión inicial total era de $\Psi_0 = 0.5$ MPa, la muestra fue sometida a un proceso de equilibrado inicial, imponiendo unas condiciones de succión matricial ($u_a - u_w$) = 0.8 MPa, bajo una carga vertical neta ($\sigma_v - u_a$) = 0.05 MPa, lo que generó una retracción inicial ($\epsilon_v = 0.35\%$) (punto B, Fig. 6.18).

En la Fig. 6.18, se observa que en la trayectoria de humedecimiento (C→D) las deformaciones irreversibles (del orden del 3.6%) son menores que en los ensayos EDO-1 y EDO-2, este comportamiento se explica por la mayor densidad y grado de saturación inicial del suelo. Sin embargo, en el plano de estado volumétrico (abajo-izquierda, Fig. 6.18), en la trayectoria de humedecimiento (C→D) se observa un aumento en el grado de saturación, donde la variable de estado volumétrico cruza las líneas de igual grado de saturación alcanzando un valor muy próximo al 80 %, con una pendiente $\delta e / \delta e_w \approx -0.90$, causando deformaciones irreversibles. Por otro lado, se observa que en la trayectoria de secado (D→E) se genera una retracción elástica de $\epsilon_v = 0.16\%$, mientras que en la trayectoria de mojado (G→H) se manifiesta en una ligera recuperación elástica $\epsilon_v = 0.08\%$ (abajo-derecha, Fig. 6.18).

En el espacio $\varepsilon_v : u_a - u_w$ de la Fig. 6.19, durante la trayectoria de humedecimiento (C→D) se observa que en la última etapa surge la mayor entrada de agua, provocando el 92 % de la deformación de colapso. En la Fig. 6.20 se presenta la evolución temporal de la trayectoria de humedecimiento (C→D), donde claramente se observa que la mayor entrada de agua surge en la última etapa de cambio de succión generando el mayor cambio de volumen irreversible de la trayectoria, así como el aumento en el grado de saturación.

En la Fig. 6.21, se presentan los resultados en términos de e , e_w y $S_r = e_w/e$ con respecto a los cambios de tensión vertical neta ($\sigma_v - u_a$), donde se observa que el mayor cambio en índice de poros es alcanzado en la segunda trayectoria de carga (H→I), alcanzando un valor en el grado de saturación del 100%.

En la Fig. 6.22, se presenta el comportamiento hidromecánico y el movimiento cualitativo de la superficie de fluencia (LC) en el espacio ($u_a - u_w$, $\sigma_v - u_a$). En el espacio e vs. $\sigma_v - u_a$ de la Fig. 6.22, el comportamiento más rígido se obtuvo en la trayectoria realizada bajo una succión mayor ($\lambda_{edo}(0.3) = 0.087$, $\lambda_{edo}(0.05) = 0.11$), mientras que el parámetro de compresibilidad elástica en ambas condiciones fue el mismo valor ($\kappa_{edo} = 0.002$).

La tensión de preconsolidación σ_{v0} (condiciones edométricas, en el plano $v : \ln \sigma_v - u_a$), se presenta en el plano $s : \ln \sigma_v - u_a$, donde se observa el desplazamiento de la superficie de fluencia LC inicial, generado por las trayectorias de tensiones a la que fue sometida la muestra (Fig. 6.22).

6.1.5 Comentarios Finales

En este apartado se comentan algunos aspectos que surgieron durante la realización del programa de ensayos. Alguno de los resultados confirman la experiencia existente en la bibliografía.

El análisis de los resultados obtenidos permite afirmar que las muestras que han sido compactadas por la rama seca tienen tendencia a experimentar colapsos. La magnitud de estos colapsos está directamente relacionada con la humedad de compactación, el grado de saturación inicial y el nivel de la energía de compactación empleada (Tabla 6.2). En todos los ensayos el colapso disminuyó al aumentar la humedad de compactación y el grado de saturación inicial del suelo compactado.

En la Fig. 6.23 se muestran los resultados de los ensayos correspondientes a las diferentes etapas de equilibrio en términos de ε_v y e_w con respecto a los cambios de succión, donde se observa que la deformación de colapso mayor es para la muestra (EDO-2) siendo la que presenta una humedad de compactación menor ($e_{w0} = 0.21$ ó $w_0 = 8\%$), disminuyendo este fenómeno conforme aumenta dicha humedad. En la Fig. 6.24 se observa en el proceso de humedecimiento (C→D) un aumento en el grado de saturación, donde las trayectorias de las variables de estado volumétrico cruzan casi perpendicularmente las líneas de igual grado de saturación. El ensayo EDO-2 presenta el mayor incremento en su grado de saturación. Este fenómeno está asociado principalmente al colapso del esqueleto del suelo. Se puede admitir que para humedades de compactación bajas, la causa dominante del colapso radica en la desaparición de la succión existente y el consiguiente reordenamiento de la estructura.

Por otro lado, partiendo de una humedad de compactación específica en la rama seca, si las presiones aplicadas crecen (en una trayectoria tensional a succión constante), el suelo sufre una modificación de la estructura, con reducción importante del índice de vacíos y aumento del grado de saturación, que dan como resultado una estructura más ordenada y estable.

El nivel de la energía aplicada al suelo al compactarlo también ha sido decisivo en la magnitud de los colapsos obtenidos, ya que niveles de energía de compactación elevados conduce a estructuras más estables cuando se ven sometidas a reducciones en su succión (Tabla 6.2). En la Fig. 6.25, se puede observar este fenómeno, donde el ensayo EDO-3 presenta menor deformación volumétrica. En la misma Fig. 6.25, en la trayectoria de carga, donde el incremento de la tensión vertical neta ($\sigma_v - u_a$) causa una reducción en los vacíos, se esperaría un aumento en el grado de saturación, pero debido a la expulsión de agua, el grado de saturación permanece casi constante.

Por otro lado, estos ensayos edométricos han brindado también información útil para determinar unos parámetro en términos de la tensión vertical neta ($\sigma_v - u_a$). En las trayectorias de carga E→F y H→I se determinaron las pendientes de las curvas λ_{edo} (bajo condiciones edométricas: $v : \ln(\sigma_v - u_a)$), presentando valores menores para las trayectorias realizadas bajo una succión mayor (Fig. 6.26). A partir de la rama de descarga (trayectorias F→G y I→J) se ha medido las pendientes de las curvas (bajo condiciones edométricas: $v : \ln(\sigma_v - u_a)$) κ_{edo} , presentando valores similares en ambas trayectorias. En la trayectoria de secado, en el plano $e : \ln(u_a - u_w)$, se obtuvo el parámetro de rigidez elástica κ_{sedo} (Tabla 6.3).

Con los valores obtenidos de la tensión de preconsolidación σ_{v0} y considerando los parámetros del modelo (Alonso *et al.* 1990) $\lambda(0)$ y κ obtenidos de los ensayos de compresión isótropa bajo condiciones saturadas (Tabla 6.1), se pudo analizar de forma cualitativa el movimiento de la superficie de fluencia (LC) en el espacio $(\sigma_v - u_a, u_a - u_w)$ debido a las diferentes trayectorias de tensiones realizadas.

En la Fig. 6.27, se muestra una vista tridimensional de la superficie de fluencia en el espacio de tensiones (p, q, s) . También se indica de forma esquemática el desplazamiento de la superficie de fluencia LC en la trayectoria de humedecimiento C→D. Las condiciones iniciales corresponden a las generadas por el proceso de compactación en condiciones isótropas. En la Fig. 6.27 se indica la superficie de fluencia (LC inicial) adoptada. En la trayectoria del incremento de la tensión vertical neta $(\sigma_v - u_a)$ a succión constante (B→C) tiene lugar en el interior de la superficie de fluencia inicial (LC inicial) y por tanto las deformaciones asociadas serán elásticas. Cabe recordar que en estos ensayos no se ha registrado la evolución de la tensión horizontal (σ_h) por lo que la trayectoria K_0 no se ha medido. Se puede estimar este valor usando la expresión propuesta por Jaky (Wood, 1990) para suelos saturados, expresada por la siguiente expresión :

$$K_0 = 1 - \text{sen } \phi' \quad (6.1)$$

con esta expresión podemos estimar la tensión horizontal (σ_h) , la tensión media (p) y la tensión desviadora (q) :

$$K_0 = \frac{\sigma_h - u_a}{\sigma_v - u_a} \quad ; \quad p = \frac{\sigma_v + 2\sigma_h}{3} - u_a \quad \text{y} \quad q = \sigma_v - \sigma_h \quad (6.2)$$

El valor de ϕ' se obtiene de los ensayos triaxiales con control de succión. Con ello, es una forma de comprobar que la trayectoria (B→C) tiene lugar en el interior de la superficie de fluencia inicial (LC inicial). Romero (1999) midió valores de K_0 en suelos parcialmente saturados y normalmente consolidados inferiores a los a los estimados por la ecuación 6.1

Evidencias experimentales presentadas por Romero (1999) en ensayos edométricos en un suelo colapsable en trayectorias de humedecimiento bajo tensión vertical constante, muestran cambios relativamente importantes de la relación K_0 durante dicho proceso (primero un aumento y después una disminución a medida que se reduce la succión), por lo que se puede decir que K_0 depende de la

succión. Por esta razón las variables tensionales p y q presentan variaciones difíciles de predecir en un ensayo bajo condiciones edométricas.

Tabla 6.2 Cambios de volumen en trayectorias de humedecimiento–secado.

Ensayo	ε_v (%) A→B Equilibrio	ε_v (%) C→D, mojado Colapso máximo	ε_v (%) D→E secado	ε_v (%) * G→H mojado	Condiciones iniciales				
					σ_m-u_a MPa	e_0	e_{w0}	$(e_w/e)_0$	Ψ MPa
EDO-1	----	4.13	0.21	- 0.08	0.6	0.68	0.29	0.43	0.8
EDO-2	0.30 *	11.2	0.22	- 0.13	0.6	0.74	0.21	0.28	2.1
EDO-3	----	2.6	0.07	- 0.245	0.3	0.78	0.30	0.39	0.9
EDO-4	0.35	3.6	0.16	- 0.08	0.6	0.59	0.33	0.55	0.50

*recuperación elástica de la deformación; σ_m-u_a : tensión media neta de compactación estática en condiciones isotropas; Ψ : succión total (técnica psicrométrica); ε_v : deformación volumétrica.

En las Fig. 6.7, 6.12, 6.17 y 6.22 en el plano $e : u_a-u_w$, se puede observar que a una succión determinada se produce un quiebro. Este punto se ha asociado con la intersección de la trayectoria de tensión representada en la Fig. 6.27 con la superficie de fluencia inicial LC. A partir de este punto se generan deformaciones plásticas cuya componente volumétrica induce un endurecimiento de la superficie de fluencia arrastrándola hasta la posición final (LC final). La compresión inicial puede estar asociada con un aumento de la tensión media neta en la etapa inicial de disminución de la succión. A partir del punto de fluencia se consideró que la tensión media neta no se modificaba con el decremento de la succión (Fig. 6.27).

El equipo edométrico con control de succión es un equipo adecuado que nos permite la determinación de las deformaciones volumétricas en suelos no saturados bajo control de succión matricial, empleando la técnica de traslación de ejes. Se han detectado deformaciones volumétricas en trayectorias de humedecimiento y secado del orden de 0.08 % y 0.07 % respectivamente, ya que las deformaciones propias del equipo son mínimas al ser un equipo muy rígido. El diseño del equipo nos permite realizar ensayos con trayectorias complejas en el plano $\sigma_v-u_a : u_a-u_w$ que son relativamente largos en tiempo, obteniendo buenos resultados.

Tabla 6.3 Parámetros del suelo en términos de la tensión vertical neta.

Ensayo	$\sigma_m - u_a$ MPa	$\sigma_{v01}(0.3)$ MPa	$\lambda_{edo} (0.3)$	$\kappa_{edo} (0.3)$	$\sigma_{v02}(0.5)$ MPa	$\lambda_{edo} (0.05)$	$\kappa_{edo} (0.05)$ (descarga)	κ_{sedo} (secado)
EDO-1	0.6	0.87	0.084	0.002	1.07	0.12	0.002	0.002
EDO-2	0.6	1.6 ?	0.060	0.0022	1.93 ?	0.11	0.0027	0.002
EDO-3	0.3	0.41	0.12	0.0036	0.95	0.14	0.0034	0.001
EDO-4	0.6	0.91	0.087	0.002	1.06	0.11	0.002	0.001

σ_{v0} : tensión de preconsolidación en condiciones edométricas en el plano $v : \ln(\sigma_v - u_a)$.

Al final de cada ensayo se ha pesado la muestra para determinar su humedad, de manera que esta pueda ser comparada con el valor calculado mediante las lecturas del medidor de cambio volumen de agua intersticial. En la Tabla 6.4 se presentan los valores obtenidos.

Tabla 6.4 Contenido de agua en las muestras al final del ensayo.

Ensayo	w(%) (secado al horno)	w(%) (sistema de buretas)
EDO-1	15.22	15.86
EDO-2	12.70	12.79
EDO-3	13.66	14.0
EDO-4	13.92	14.47

Con estos valores se puede considerar que el sistema de medida empleado es apropiado para evaluar los cambios de humedad del suelo durante el ensayo, considerando que han sido ensayos donde se ha invertido un periodo de tiempo largo.

6.2 Resultados isotrópicos con control de succión

6.2.1 Ensayos isotrópicos: Mini – célula isotrópica rígida

6.2.1.1 Ensayos de humedecimiento bajo carga constante

En esta sección se presentan y se analizan los resultados experimentales de los ensayos isotrópicos con control de succión realizados en la mini-célula isotrópica rígida, descrita en la sección 3.6. El programa de ensayos y las trayectorias realizadas tuvieron como objetivo analizar el comportamiento deformacional de un suelo sobreconsolidado no saturado asociado con los cambios de succión bajo carga constante, así como obtener parámetros que nos proporcionaran la forma y el movimiento de la superficie de fluencia LC en una trayectoria de humedecimiento. El estado sobreconsolidado se llevó a cabo mediante la compactación isotrópica. Se trató de aplicar trayectorias de tensiones en las que el suelo sobreconsolidado, en una primera etapa fuera sometido a una carga isotrópica bajo succión constante. Posteriormente, se procedió con la trayectoria de humedecimiento de la muestra bajo una carga constante. En la Tabla 6.5 se presentan las condiciones iniciales de las muestras ensayadas, y en la Fig. 5.7a se representan en el plano Proctor.

Tabal 6.5 Condiciones iniciales de las muestras ensayadas.

Ensayo	w_0 %	e_w	ρ_{d0} g/cm ³	e_0	e_w/e_0	Ψ MPa	$(\sigma_m-u_a)_0$ MPa	(σ_m-u_a) MPa
ISOW-1	11±0.2	0.298	1.66	0.629	0.47	0.8	0.6	0.3
ISOW-2	8±0.2	0.217	1.52	0.777	0.28	2.1	0.6	0.3
ISOW-3	11±0.2	0.298	1.53	0.776	0.38	0.9	0.3	0.2
ISOW-4	12±0.2	0.325	1.69	0.598	0.54	0.6	0.6	0.3

Nota: $(\sigma_m-u_a)_0 = p_0$: tensión media de compactación estática en condiciones isotrópicas; (σ_m-u_a) : tensión media neta en la etapa de humedecimiento; Ψ : succión total inicial (técnica psicrométrica).

En las Fig. 6.28, 6.29, 6.30 y 6.31, se presentan los resultados isotrópicos de los ensayos ISOW-1, ISOW-2, ISOW-3 y ISOW-4 respectivamente en gráficos SWEP. La trayectoria de tensión seguida de B a D en los ensayos, se resume de la siguiente manera (descrita en detalle en la sección 5.3). Inicialmente, la muestra es sometida a un proceso de carga isotrópica de manera continua a una velocidad de variación constante de 0.04 MPa/día hasta 0.3 MPa, excepto para el ensayo ISOW-3 (hasta un valor de 0.2 MPa) bajo succión constante. Posteriormente, se continuó con la trayectoria de humedecimiento en las muestras sobreconsolidadas, la cual se llevó a cabo manteniendo la presión de aire constante (u_a) y aumentando la presión de agua (u_w) de forma continua a una

velocidad de variación constante igual a 0.02 MPa/día. De esta manera se disminuyó la succión matricial hasta un valor de $(u_a - u_w) = 0.01$ MPa bajo tensión media neta constante $(\sigma_m - u_a)$ (Tabla 6.5). En la trayectoria (D→E) del ensayo ISOW-4 (Fig. 6.31) la presión de agua (u_w) y presión de aire (u_a) fueron suministradas con el mismo regulador, para garantizar la igualdad de las presiones intersticiales.

En el plano de la variable de estado volumétrico (abajo–izquierda, Fig. 6.28-6.31), se observa que en el proceso de humedecimiento (C→D) se desarrollan cambios en el grado de saturación ($S_r = e_w/e$), donde la trayectoria de estado volumétrico ($\delta e/\delta e_w \approx -0.35, -0.50, -0.55, -0.60$) cruza casi perpendicularmente las líneas de igual grado de saturación. El aumento promedio en el grado de saturación para estos ensayos fue aproximadamente de $\Delta S_r \approx 16\%$, se observa también la ocurrencia de un proceso recuperable e irrecuperable en la deformación volumétrica, debido a un hinchamiento y colapso respectivamente del esqueleto del suelo (abajo-derecha, Fig. 6.28-6.31). Este comportamiento, era de esperar, debido a que las muestras son sobreconsolidadas y la trayectoria de humedecimiento bajo carga constante se inicia dentro de la superficie de fluencia inicial LC (loading-collapse). En la Tabla 6.6 se presentan las deformaciones volumétricas generadas en estos ensayos.

Tabla 6.6 Cambios de volumen. Ensayos isotrópicos (mini-célula isotrópica rígida).

Ensayo	ϵ_v (%) hinchamiento	ϵ_v (%) colapso	$\delta e/\delta e_w$	$\delta e/\delta lns$	p_{01} (MPa)
ISOW-1	- 0.40	--	- 0.35	0.01	?
ISOW-2	- 2.3	--	- 0.50	0.02	?
ISOW-3	- 0.40	3.74	- 0.40	0.09	0.022
ISOW-4	- 0.13	--	- 0.60	0.003	?

En las Fig. 6.32, 6.33, 6.34 y 6.35, se muestran los resultados de los ensayos ISOW-1, ISOW-2, ISOW-3 y ISOW-4 respectivamente, en términos de deformación volumétrica (ϵ_v), relación de agua (e_w) y grado de saturación ($S_r = e_w/e$) con respecto a la variación de la succión matricial ($s = u_a - u_w$). Cabe recordar que la medida de la deformación volumétrica de la muestra es global, obtenida a través de un medidor de volumen que nos mide el flujo que entra o sale de la cámara de confinamiento de la célula. Este sistema es capaz de medir deformaciones volumétricas con una

resolución de 30 %. El segundo medidor de volumen es utilizado para medir la cantidad de agua intersticial que entra o sale de la muestra (Anexo B).

En las figuras antes mencionadas (Fig. 6.32-6.35), se puede observar que el hinchamiento máximo coincide con el cambio de pendiente de las curvas de relación de agua y de grado de saturación. Esto es indicativo de que en el momento en que entra una mayor cantidad de agua a la muestra comienza el cambio de sentido en las deformaciones volumétricas. En la Fig. 6.34, que corresponde al ensayo ISOW-3 (muestra compactada a menor presión isotropa) se observan dos cambios de pendientes en la curva representada en el plano $e_w:u_a-u_w$ y $e_w/e:u_a-u_w$. Un cambio puede observarse en la deformación volumétrica (ϵ_v) dentro del rango de succión $s = 0.5$ a 0.018 MPa. El segundo cambio de pendiente mayor que el primero, comienza después de una succión por debajo de 0.018 MPa, midiéndose una deformación de colapso del orden de $\epsilon_v = 3.74$ %, ocasionando un desplazamiento de la superficie de fluencia inicial LC (Fig. 6.38).

En el ensayo ISOW-4, donde las condiciones iniciales de la muestra son muy próximas a las condiciones óptimas en una curva de compactación en el plano Proctor (Fig. 5.7a), la trayectoria de humedecimiento se realizó hasta alcanzar una succión igual a cero ($u_a = u_w$). En la Fig. 6.35, se observa que las deformaciones volumétricas detectadas fueron menores que la resolución que se puede registrar con este sistema, por lo que los cambios registrados, se atribuyen en parte, a cambios de temperatura. Este comportamiento confirma que en muestras con una humedad de compactación muy cercana al óptimo, las deformaciones producidas por colapso serán mínimas (Rico y del Castillo, 1976).

En las Fig. 6.36, 6.37, 6.38 y 6.39, se presenta en el plano tensión media neta y succión matricial (σ_m-u_a) : (u_a-u_w) la superficie de fluencia inicial obtenida a partir de la presión de compactación estática en condiciones isotropas y los parámetros derivados de los ensayos saturados. En la Tabla 6.7 se muestran los parámetros usados para representar la forma y el movimiento de la curva LC. En relación a los parámetros utilizados hasta ahora para describir cualitativamente el comportamiento del suelo en los ensayos edométricos se ha incrementado el valor del parámetro β para un mejor ajuste del punto de cruce de las superficies de fluencia en trayectorias de humedecimiento. El valor del parámetro p^c también se ha reducido para obtener una mejor representación del movimiento de la superficie de fluencia LC debido a los cambios de tensión y succión.

Tabla 6.7 Parámetros del modelo utilizados para el análisis de los ensayos isótopos.

$\lambda (0)$	κ	β (1/MPa)	r	p^c (Pa)
0.073	0.011	100	0.8	65

En las mismas figuras (Fig. 6.36-6.39) se muestra la localización de la presión de preconsolidación (p_{01}) (Tabla 6.6) obtenida por un proceso de humedecimiento de los ensayos ISOW-1, ISOW-2, ISOW-3 y ISOW-4 respectivamente. También se presenta el comportamiento hidráulico en el plano $e : u_a - u_w$. De estos gráficos podemos concluir que los resultados de los ensayos no fueron del todo coherentes para suelos muy sobreconsolidados, que fue el caso de los ensayos ISOW-1 (Fig. 6.36), ISOW-2 (Fig. 6.37) y ISOW-4 (Fig. 6.39). Por el contrario, para una muestra ligeramente sobreconsolidada (Fig. 6.38), se observa que al reducir la succión se intercepta la superficie de fluencia inicial LC (inicial) en el punto de tensión p_{01} (presión de preconsolidación obtenido en el plano $e : u_a - u_w$), que es coherente con la forma de la superficie LC supuesta.

6.2.1.2 Ensayos de humedecimiento – secado y carga – descarga

En esta sección se presentan y se analizan los resultados de los ensayos complementarios del programa de ensayos isótopos realizados en la mini-célula isótropa rígida. Las trayectorias tensionales realizadas tuvieron como propósito analizar el comportamiento deformacional de un suelo no saturado asociado con los cambios de succión y de tensión, así como obtener la forma y expansión de la superficie de fluencia (LC) bajo un fenómeno de colapso e incremento de la tensión.

Se trató de aplicar trayectorias de tensiones en las que el suelo en una primera etapa es sometido a un proceso de carga isótropa de manera continua a una velocidad de variación constante de 0.04 MPa/día, hasta alcanzar la tensión isótropa de compactación bajo una succión constante (Tabla 6.8). En una segunda etapa se llevó a cabo una trayectoria de humedecimiento, manteniendo la presión de aire constante (u_a) y aumentando la presión de agua (u_w) de forma continua a una velocidad de variación constante igual a 0.02 MPa/día, hasta un valor de succión de $(u_a - u_w) = 0.02$ MPa, posteriormente, se procedió a la desaturación de la muestra manteniendo en toda la etapa la tensión constante. En una tercera etapa se procedió con un ciclo de carga–descarga bajo succión constante.

La trayectoria de tensión seguida de A a G es descrita a detalle en la sección 5.3. En la Tabla 6.8 se presentan las condiciones iniciales de las muestras ensayadas, y en la Fig. 5.7a se representan en el plano Proctor.

En las Fig. 6.40 y 6.41, se presentan los resultados isotrópicos de los ensayos ISO-1 y ISO-2 respectivamente, representados en gráficos SWEP. En el plano de la variable de estado volumétrico (abajo-izquierda, Fig. 6.40, 6.41) se observa que en el proceso de humedecimiento (C→D) se desarrollan cambios importantes en el grado de saturación ($S_r = e_w/e$) mayores que en los ensayos ISOW, donde la trayectoria de estado volumétrico ($\delta e/\delta e_w \approx -0.94, -1.4$) cruza casi perpendicularmente las líneas de igual grado de saturación. Estos importantes cambios de grado de saturación están asociados con la ocurrencia de un proceso irrecuperable de compresión volumétrica, debido al colapso del esqueleto del suelo. En la trayectoria de secado (D→E), se observa una respuesta rígida, asociada con pequeños cambios de agua y en la relación de vacíos. En las trayectorias de carga y descarga no se presentan variaciones considerables en el grado de saturación, observándose una tendencia casi paralela a las líneas de igual grado de saturación (S_r).

Tabal 6.8 Estado inicial de las muestras de los ensayos isotrópicos (mini-célula isotrópica rígida).

Ensayo	w_0 %	e_w	ρ_{d0} g/cm ³	e_0	e_w/e_0	Ψ MPa	$(\sigma_m - u_a)_0$ MPa
ISO-1	11±0.2	0.298	1.67	0.620	0.48	0.8	0.6
ISO-2	8.0±0.2	0.217	1.55	0.743	0.29	2.1	0.6

Nota: $(\sigma_m - u_a)_0 = p_0$: compactación estática en condiciones isotrópicas; Ψ : succión total inicial (técnica psicrométrica).

En las Fig. 6.42 y 6.43, se proporciona información de la evolución del cambio de volumen (ϵ_v), relación de agua (e_w) y grado de saturación ($S_r = e_w/e$) con respecto a la variación de la succión matricial ($u_a - u_w$) de los ensayos ISO-1 y ISO-2. Se observa que para el ensayo ISO-2, la deformación de colapso se genera a partir de una succión de 0.53 MPa, mientras que en la muestra del ensayo ISO-1 se genera a partir de una succión de 0.13 MPa. Por otro lado también se observa, que la muestra del ensayo ISO-2 presenta mayores cambios en el grado de saturación (e_w/e) y en su relación de agua (e_w). Estos comportamientos eran de esperarse, debido a que la muestra del ensayo ISO-2 exhibe una estructura inicial más abierta y una humedad de compactación menor.

En las Fig. 6.44a y 6.45a, se indican los resultados en términos de e , e_w y e_w/e con respecto a los cambios de la tensión media neta ($\sigma_m - u_a$) de los ensayos ISO-1 y ISO-2. En el plano $e : (\sigma_m - u_a)$ se presenta la deformación de colapso siendo mayor para la muestra del ensayo ISO-2 ($\epsilon_v = 8.6\%$) que para la muestra del ensayo ISO-1 ($\epsilon_v = 3.4\%$). También se ha medido un ligero aumento en el grado de saturación y expulsión de agua de la muestra como consecuencia del incremento de la carga mientras que al disminuirla, las deformaciones se recuperan parcialmente manteniéndose prácticamente constante el grado de saturación y la humedad.

En las Fig. Fig. 6.44b y 6.45b, se presentan sólo los resultados de la trayectoria de carga–descarga (E→F→G) de los ensayos ISO-1 y ISO-2, para presentar la evidencia de una única tensión de fluencia a partir de la cual comienzan los fenómenos plásticos asociados con las variables volumétricas e , e_w y e_w/e . Igualmente se observa un incremento apreciable en el grado de saturación con la compresión en la zona elastoplásticas.

En las Fig. 6.46 y 6.47, se presenta el comportamiento mecánico de los ensayos ISO-1 y ISO-2 en el plano $e : \sigma_m - u_a$ del ciclo de carga y descarga (E→F→G) bajo una succión matricial constante ($s = 0.2$ MPa). El comportamiento hidráulico también se representa en el mismo gráfico en la trayectoria de humedecimiento y secado (C→D→E) en el plano $e : u_a - u_w$. Finalmente en el plano $\sigma_m - u_a : u_a - u_w$ se presenta el aumento de tamaño de la superficie de fluencia inicial asociado a los cambios de succión y de la tensión.

Al igual que en los ensayos edométricos con control de succión, en las trayectorias de carga–descarga de la tensión isotropa, se observa una zona antes y después del punto de fluencia. El punto de fluencia se obtiene por la intersección de la extrapolación lineal de ambas zonas. En las Fig. 6.46 y 6.47 y en la Tabla 6.9, se indican los valores obtenidos de los parámetros de compresibilidad, donde κ en el plano $e : \sigma_m - u_a$ representa el parámetro de compresibilidad en el rango elástico y $\lambda(s)$ el parámetro de compresibilidad en el rango elastoplástico.

Analizando el comportamiento hidráulico en el plano $e : u_a - u_w$ de la trayectoria de humedecimiento (C→D) (Fig. 6.46 y 6.47) se observa que al disminuir la succión matricial se intercepta la superficie de fluencia inicial (LC inicial) en el punto de tensión p_{01} donde posteriormente el suelo comenzará a comprimirse plásticamente moviendo la LC. En la trayectoria de secado (D→E) se genera una compresión elástica, que permite obtener el parámetro de rigidez elástica κ_s (Tabla 6.9).

La tensión de preconsolidación p_{02} puede determinarse a partir de la intersección de la extrapolación lineal de la zona elástica y plástica en el plano $e : \sigma_m - u_a$. Una vez que en la trayectoria de carga (E→F) alcanza p_{02} , el suelo se comprime plásticamente y la superficie LC es llevada al punto de tensión final de la trayectoria LC (E→F) final.

Tabla 6.9 Parámetros del suelo. Ensayos isótropos (Mini-célula isótropa rígida).

Ensayo	ε_v (%) colapso	$\delta e / \delta e_w$ colapso	$\delta e / \delta \ln s$ colapso	κ_s	κ	λ (0.2)	p_{01} (MPa) fenómeno hidráulico	p_{02} (MPa) fenómeno mecánico
ISO-1	3.38	- 0.94	0.03	0.002	0.003	0.10	0.13	0.84
ISO-2	8.60	- 1.4	0.04	0.001	0.002	0.12	0.53	0.87

En la Fig. 6.48 se muestra de forma esquemática una vista tridimensional de las superficies de fluencia en el espacio de tensiones (p, q, s) obtenidas tras el desplazamiento de la superficie de fluencia inicial (LC). Las condiciones iniciales corresponden a las generadas por el proceso de compactación en condiciones isótropas. En la trayectoria de humedecimiento (C→D) se observa cómo se desplaza en forma esquemática la superficie de fluencia inicial. La trayectoria de secado (D→E) tiene lugar en el interior de la superficie de fluencia (LC final (C→D)) y por tanto las deformaciones asociadas serán elásticas. En la trayectoria del incremento de la tensión isotropa ($\sigma_m - u_a$) a succión constante una vez que se alcanza la superficie de fluencia LC final (C→D) en el punto de tensión p_{02} , el suelo se comprime plásticamente y la superficie es movida al punto de tensión final de la trayectoria (E→F).

6.2.1.3 Comentarios finales

En la Fig. 6.49, se presentan los dos ensayos isótropos (ISO-1 y ISO-2) en los planos ($e : e_w$), ($e_w : u_a - u_w$) y ($\varepsilon_v, e : \sigma_m - u_a$). Se observa que el ensayo ISO-2 presenta un aumento mayor en el grado de saturación generando una deformación de colapso mayor que el ensayo ISO-1. Tal como era de esperar este comportamiento en el ensayo ISO-2 es debido a que la muestra fue fabricada con unas condiciones iniciales de humedad y densidad menores que la muestra del ensayo ISO-1. Este comportamiento corrobora el hecho de que los suelos con una estructura menos densa son más propensos a presentar un fenómeno de colapso al presentar un aumento en su grado de saturación.

En los ensayos de humedecimiento en muestras muy sobreconsolidadas, el equipo no fue capaz de medir con precisión las pequeñas deformaciones experimentadas por las muestras. Sin embargo, en muestras normalmente consolidadas y ligeramente consolidadas, el equipo fue capaz de determinar deformaciones volumétricas (ϵ_v) de la muestra bajo trayectorias de humedecimiento-secado y carga-descarga.

En el programa de ensayos isótropos realizados en la mini-célula isótropa rígida, se ha podido definir la superficie de fluencia con un conjunto único de parámetros (Tabla 6.7). El desplazamiento de la superficie de fluencia en trayectorias de carga–descarga y en trayectorias donde se produce un fenómeno de colapso ha sido coherente con los resultados de los ensayos.

Una de las ventajas de la mini-célula isótropa rígida, es la importante reducción en el tiempo de equilibrado de las presiones intersticiales, debido a las pequeñas dimensiones de la probeta ($\phi = 20$ mm, $h = 20$ mm).

Una desventaja del equipo, es que sólo presenta un frente de hidratación en la parte inferior de la muestra, por lo que puede quedar aire atrapado en la parte superior, haciendo difícil de lograr grados de saturación elevados. Por otro lado, el sistema de medida de volumen es capaz de detectar variaciones con una resolución de la deformación volumétrica de 0.3 %. Esta resolución es elevada comparada con la del equipo edométrico de 0.01 %, por esta razón este equipo no es adecuado para ensayar muestras que presenten una rigidez elevada frente a cambios de tensión y succión.

Al final de cada ensayo se ha determinado la humedad de la muestra, de manera que ésta pueda ser contrastada con el valor calculado mediante las lecturas del medidor de volumen del cambio de agua intersticial. Estos valores se indican en la Tabla 6.10. Con la diferencia de valores obtenida se puede considerar que el sistema de medida empleado es apropiado para evaluar los cambios de humedad del suelo durante el ensayo.

Tabla 6.10 Contenido de agua en las muestras al final del ensayo.

Ensayo	w(%) (secado al horno)	w(%) (sistema de buretas)
ISO-1	11.32	10.99
ISO-2	11.52	11.28
ISOW-1	12.97	13.08
ISOW-2	14.21	13.66
ISOW-3	13.72	13.60
ISOW-4	17.05	16.43

6.2.2 Ensayos isótropos: Célula triaxial con control de succión

6.2.2.1 Trayectorias múltiples de humedecimiento – secado y carga – descarga

En esta sección se presentan los resultados del ensayo bajo tensión isótropa y control de la succión matricial realizados en la célula triaxial. En la Tabla 6.11 se presentan las condiciones iniciales de la muestra y en la Fig. 5.7b su posición en el plano Proctor. El programa del ensayo de compresión isótropa ha sido realizado con una célula triaxial con control de succión, donde es posible registrar la evolución temporal de las deformaciones axiales (ϵ_l) y radiales (ϵ_3) de forma local y global (ver sección 3.7, Fig. 3.21). Los resultados incluyen la evolución temporal de las deformaciones axiales y radiales y los cambios en contenido de agua, así como el estado de equilibrio al final de cada una de las etapas en los ciclos de humedecimiento–secado y carga–descarga. La información de la respuesta del suelo se representada con la evolución de la deformación volumétrica ($\epsilon_v = \epsilon_l + 2 \epsilon_3$) y la deformación de corte ($\epsilon_s = 2(\epsilon_l - \epsilon_3)/3$). La información se complementa con la evolución del contenido de humedad (w) y del grado de saturación (S_r).

La trayectoria de tensión seguida de B a J es análoga a la realizada con la célula edométrica, que se resume de la siguiente manera (descrita a detalle en la sección 5.4). Se realizó una trayectoria de incremento en la carga isótropa hasta un valor de $(\sigma_m - u_a) = 0.6$ MPa (B→C) bajo succión constante ($u_a - u_w = 0.8$ MPa), se prosiguió con un ciclo de humedecimiento-secado (C→E) bajo una tensión media neta constante ($\sigma_m - u_a = 0.6$ MPa), que se realizó mantenido la presión de aire constante ($u_a = 0.9$ MPa) y controlando la presión de agua (u_w). La trayectoria de humedecimiento se realizó por etapas hasta un valor de $(u_a - u_w) = 0.02$ MPa (punto D). Posteriormente, la muestra se sometió a una trayectoria de secado hasta un valor de $(u_a - u_w) = 0.15$ MPa (punto E). Posteriormente la muestra fue sometida a una trayectoria de carga (E→F) y descarga (F→G) bajo succión constante ($u_a - u_w = 0.15$

MPa). Se continuó con una trayectoria de humedecimiento hasta un valor de succión de $(u_a - u_w) = 0.02$ MPa (punto H) y finalmente, se repitió una trayectoria de carga (H→I) y descarga (I→J) a succión constante ($u_a - u_w = 0.02$ MPa) (Fig.6.50).

Tabla 6.11 Condiciones iniciales de la muestra. Ensayo isótropo (célula triaxial).

Ensayo	w_0 (%)	e_w	e_w/e	ρ_{do} g/cm ³	e_0	Ψ_0 MPa	$(\sigma_m - u_a)_0$ MPa
TISO-1	11±0.2	0.298	0.48	1.66	0.627	0.8	0.6

$(\sigma_m - u_a)_0$: tensión media de compactación; Ψ_0 : succión total inicial (técnica psicrométrica)

En la Fig. 6.50 se presentan los resultados en un gráfico SWEP proporcionando información de forma general del comportamiento mecánico e hidráulico del ensayo. En el plano de la variable de estado volumétrico (abajo-izquierda, Fig. 6.50), se observa el proceso de humedecimiento (C→D) desarrollando cambios en el grado de saturación ($S_r = e_w/e$), donde la trayectoria de la variable de estado volumétrico ($\delta e/\delta e_w \approx -0.68$) cruza casi perpendicularmente las líneas de igual grado de saturación ($S_r = e_w/e$). Por otra parte, este cambio en el grado de saturación está asociado con la ocurrencia de un proceso irrecuperable de compresión volumétrica, que se relaciona con el desplazamiento de la superficie LC. En la trayectoria de secado (D→E) se observa una respuesta rígida, asociada con cambios pequeños en agua y en la relación de vacíos. No obstante, en esta trayectoria de incremento de succión es más fácil expulsar agua que inducir deformación del esqueleto.

En la Fig. 6.51 se muestra la etapa de humedecimiento donde se redujo la succión matricial de $(u_a - u_w) = 0.10$ MPa a 0.02 MPa bajo una tensión media neta de $(\sigma_m - u_a) = 0.6$ MPa. En la figura se muestra la evolución temporal de las deformaciones axial (ϵ_1), radial (ϵ_3), volumétrica (ϵ_{vc}) y de corte (ϵ_s), así como los cambios en contenidos de agua (e_w) y grados de saturación $S_r = e_w/e$. La evolución de la deformación radial corresponde a la parte central del espécimen (indicado con un subíndice “c”). Por otro lado la evolución de la relación entre la deformación axial y radial (ϵ_1/ϵ_{3c}) nos complementa la descripción de la distorsión de la muestra en este proceso de mojado. Se puede observar una tendencia de hinchamiento al inicio de la etapa, que se detecta por los LVDTs locales, a pesar de que la trayectoria de tensiones parte de un punto en la superficie de fluencia LC impuesta por la compactación estática. Este comportamiento puede ser explicado en términos de la existencia de un cierto incremento de presión de aire atrapado durante las etapas iniciales de humedecimiento

que induce una pequeña descarga de la tensión neta sobre la muestra. Este efecto también ha sido observado por Romero (1999). Por otro lado, las diferencias de lecturas en los sensores láser (láser 1 y 2) en la obtención de las deformaciones radiales son debidas a los pequeños desplazamientos horizontales que son inducidos por el movimiento libre del cabezal (se usó un vástago de alineación para controlar la inclinación inicial de la muestra). No obstante, al sumar ambas lecturas (láser 1 y 2) los movimientos horizontales como sólido rígido se compensan y la deformación radial puede obtenerse sin errores. En Romero (1999) se discuten más aspectos sobre los errores en la medida de los desplazamientos laterales.

En la misma Fig. 6.51, se observa que se han alcanzado bajos grados de saturación en la muestra al aplicar una succión matricial de 0.02 MPa. Este fenómeno está parcialmente asociado al sistema de doble drenaje usado en la célula triaxial, donde queda aire atrapado en el centro del espécimen que es difícil de expulsar. Por tanto, se esperarían mayores deformaciones de colapso si se consiguiera hacer entrar un contenido mayor de agua en la muestra. En el ensayo edométrico EDO-1, se puede comparar que se logran mayores grados de saturación ($S_r = e_w/e = 0.72$) a mayor succión matricial (0.05 MPa) siguiendo una trayectoria similar de humedecimiento (sección 6.1.3.1).

Como era de esperar, para una muestra que ha sido compactada en condiciones isotrópicas, se observa una evolución isotrópica que se evidencian por las bajas deformaciones de corte que se desarrollan y por la tendencia a la unidad de la relación entre la deformación axial y radial (ϵ_l/ϵ_{3c}).

En la Fig. 6.52 se indican los resultados correspondientes a las diferentes etapas de equilibrio de la trayectoria de humedecimiento-secado (C→D→E) en términos de la deformación axial (ϵ_l), radial (ϵ_3), de corte (ϵ_s) y volumétrica (ϵ_v), así como contenidos de agua (e_w) y grados de saturación (e_w/e). La deformación volumétrica y de corte, así como los valores de grado de saturación fueron calculados basándose en la deformación radial medida en la zona central de la probeta (indicado con el subíndice “c”). En los resultados de la deformación de corte se muestra una evolución isotrópica, midiéndose una pequeña distorsión de la muestra al inicio de la etapa de humedecimiento. Por otro lado, al igual que en los ensayos edométricos, no se observan importantes deformaciones de colapso en las primeras etapas de humedecimiento, concentrándose aproximadamente el 80 % de la deformación en la última etapa. Este comportamiento está asociado con la forma de la superficie de fluencia (LC) en el plano (u_a-u_w) : (σ_m-u_a), que presenta una pendiente casi vertical en el rango de succiones no muy cercanas a cero.

El aumento en el grado de saturación en la trayectoria (C→D), está asociado con la ocurrencia de un proceso irrecuperable de compresión volumétrica debido al colapso del esqueleto del suelo, que se relaciona con el desplazamiento de la superficie de fluencia LC en un proceso de endurecimiento. En el caso de la etapa de secado (D→E) se observa una respuesta rígida, asociada con cambios pequeños en agua y en la relación de vacíos.

En la Fig. 6.53a, se presentan los resultados correspondientes a las diferentes etapas de equilibrio en términos de la deformación axial local (ϵ_l), radial local y global (ϵ_{3c} , ϵ_3) y volumétrica local (ϵ_{vc}) y global (ϵ_v) (determinada con la deformación radial global), así como los contenidos de agua (e_w) y grados de saturación (e_w/e) con respecto a los cambios de la tensión media neta ($\sigma_m - u_a$). Se observa que la deformación axial y radial tienen un comportamiento similar, presentando una deformación volumétrica isótropa. También se compara la deformación radial local (ϵ_{3c}) y global (ϵ_3) para cada etapa de carga, siendo ligeramente mayor la deformación local (ϵ_{3c}) y que se relaciona con una mayor deformación volumétrica (ϵ_{vc}). La diferencia de la deformación radial local y global se debe a la no-uniformidad de la deformación radial de la muestra provocada por los efectos de fricción en ambos extremos de la probeta. Este fenómeno se puede observar en las Fig. 6.57 a la 6.60. Para el cálculo del grado de saturación ($S_r = e_w/e$) se ha considerado la medida global de la deformación volumétrica.

En las trayectorias de carga (E→F y H→I) de las Fig. Fig. 6.53a y 6.53b, se observa una reducción del volumen de vacíos que implicaría un aumento del grado de saturación, pero debido a que se registró simultáneamente una expulsión de agua, el grado de saturación permanece casi constante creciendo ligeramente en la zona elastoplástica. En la Fig. 6.53b, se presentan las trayectorias de carga–descarga (E→F→G y H→I→J), constatando una tensión de fluencia a partir de la cual comienzan los fenómenos plásticos asociados a las variables volumétricas e , e_w , y e_w/e al igual que en los ensayos isótropos realizados en la mini-célula isótropa. En la Fig. 6.50 (abajo-izquierda) se observa una tendencia paralela a las líneas de igual grado de saturación en la trayectoria de carga.

En la Fig. 6.57, se muestra el desarrollo de la deformación radial global (ϵ_3) a través del perfil de la muestra para las diferentes etapas de humedecimiento y secado (C→D→E) bajo tensión media constante ($\sigma_m - u_a = 0.6$ MPa). El primer perfil representa la deformación radial acumulada de la trayectoria de carga (B→C) hasta alcanzar una tensión media de ($\sigma_m - u_a$)= 0.6 MPa. Los diferentes perfiles nos representan la deformación acumulada hasta el equilibrio en las diferentes etapas de

cambio de succión. El promedio de la deformación lateral ($\bar{\epsilon}_3$) también se presenta en la figura. Se observa que en la trayectoria de mojado, específicamente en la etapa de cambio de succión de ($s = 0.1 \text{ MPa} \rightarrow 0.02 \text{ MPa}$) es donde se genera la mayor deformación radial. Por otro lado en la trayectoria de secado ($s = 0.02 \text{ MPa} \rightarrow 0.15 \text{ MPa}$) se genera una pequeña retracción elástica del orden del 0.2 % (representado con la línea más gruesa, Fig. 6.57). En las deformaciones de colapso y de retracción desarrolladas a lo largo de la altura del espécimen, se observa un comportamiento relativamente homogéneo, mostrando el efecto que causa el emplear una compactación isótropa en la fabricación de las muestras. Este comportamiento no se presenta en muestras fabricadas con un procedimiento de compactación estática unidimensional (sin deformación lateral), que se ha comprobado en los ensayos de colapso realizados con el mismo equipo triaxial y representado en Barrera *et al.*, 2000.

En la Fig. 6.54, se presenta el comportamiento mecánico en el plano $e : \sigma_m - u_a$ de las dos etapas de incremento y disminución (E \rightarrow F \rightarrow G y H \rightarrow I \rightarrow J) de la tensión media neta, bajo una succión constante de 0.15 MPa y 0.02 MPa respectivamente. El comportamiento hidráulico también se representa en la misma figura en el plano $e : u_a - u_w$ con la trayectoria de humedecimiento y secado bajo tensión media constante (C \rightarrow D \rightarrow E). Finalmente, en el espacio $u_a - u_w : \sigma_m - u_a$ se presenta la evolución de la superficie de fluencia (LC) bajo las diferentes trayectorias de tensión y succión a la que ha sido sometido el suelo. En la Tabla 6.12 se presentan los valores de los parámetros usados para representar la forma y el movimiento de la curva LC, estos valores son los mismos que los empleados para exhibir el comportamiento de la curva LC en los ensayos isótropos realizados en la mini-célula isótropa.

En la Fig. 6.54 se indican los valores obtenidos de los parámetros que definen la compresibilidad del suelo frente a cambios de carga y de succión. En la trayectoria de carga bajo una succión constante mayor se presentó una respuesta ligeramente más rígida ($\lambda(0.15) = 0.080$, $\lambda(0.02) = 0.095$), comparada con la observada en el ensayo isótropo realizado en la Mini-célula isótropa (ISO-1: $\lambda(0.2) = 0.10$). En las trayectorias de descarga, en ambas condiciones de succión matricial, el parámetro de compresibilidad de la zona elástica varió ligeramente ($\kappa(0.15) = 0.006$, $\kappa(0.02) = 0.008$), presentando valores mayores a los obtenidos con el ensayo ISO-1 ($\kappa(0.2) = 0.003$) (Tabla 6.15).

Tabla 6.12 Parámetros del modelo utilizados para el análisis de los ensayos triaxiales.

$\lambda(0)$	κ	β (1/MPa)	r	p^c (Pa)
0.073	0.011	100	0.8	65

La tensión de preconsolidación p_0 determinada por la intersección de la extrapolación lineal de la zona elástica y plástica se presenta en el plano $s : \sigma_m - u_a$, donde se observa cómo se mueve la superficie de fluencia (LC) debido a los incrementos de la tensión. Cuando en la trayectoria de carga (E→F) se alcanza el punto p_{02} , el suelo se comprime plásticamente y la superficie LC se llega al punto de tensión final de la trayectoria (E→F). En el caso de la trayectoria de carga (H→I) las deformaciones irreversibles comenzarán después de alcanzar el punto de tensión p_{03} , moviendo la superficie de fluencia a la posición final (LC final H→I) (Fig. 6.54 y 6.55). En la Fig. 6.55 se muestra el desplazamiento de la superficie de fluencia (LC) inicial de forma esquemática en una vista tridimensional en el espacio de tensiones (p, q, s). Las condiciones iniciales corresponden a las generadas por el proceso de compactación en condiciones isotropas.

En las trayectorias de humedecimiento (C→D) y secado (D→E), presentadas en el espacio $e : u_a - u_w$ (Fig. 6.54), se observa que en las primeras etapas de reducción de la succión no se presentan valores significativos de entrada de agua en la muestra, mientras que en la última etapa de humedecimiento se observa una entrada de agua muy importante, generando el 80 % de la deformación de colapso medido y repercutiendo en un movimiento de la superficie de fluencia inicial. Este comportamiento es similar al observado en el ensayo edométrico (EDO-1) e isotropo (ISO-1). En la trayectoria de secado (D→E) se obtiene el parámetro de rigidez elástica $\kappa_s = 0.001 < \kappa_{s(ISO-1)} = 0.002$. En la trayectoria (G→H) donde se reduce la succión se observa una expansión muy ligera. En la Tabla 6.13 se resumen los valores de los parámetros obtenidos en el ensayo. En la Fig. 6.56 se presentan los valores de los parámetros $\lambda(s)$ y κ con respecto al cambio de succión de los ensayos edométricos e isotropos (mini-célula isotropa) y comparados con los obtenidos en este ensayo (célula triaxial).

Tabla 6.13 Parámetros del suelo. Ensayos de tensión isotropa. Célula triaxial.

Ensayo	$(\sigma_m - u_a)_0$ MPa	p_{01} MPa	$\delta e / \delta s$ colapso	κ_s	p_{02} MPa	$\lambda(0.15)$	$\kappa(0.15)$	p_{03} MPa	$\lambda(0.02)$	$\kappa(0.02)$
TISO-1	0.6	0.10	0.023	0.001	0.87	0.08	0.006	1.20	0.095	0.008

En la Fig. 6.58 se presenta la deformación radial global (ϵ_3) de la muestra en la trayectoria de carga-descarga (E→F→G) bajo succión constante ($s= 0.15$ MPa), donde se observa el efecto de fricción en ambos extremos de la muestra, así como el comportamiento relativamente homogéneo de las deformaciones ($\bar{\epsilon}_3$). Por otro lado, en la segunda trayectoria de humedecimiento (G→H) (indicado el perfil con una línea más gruesa, Fig. 6.58), se presenta una recuperación elástica de la deformación radial ($\epsilon_3 = 0.20$ %).

En las Fig. 6.59 y 6.60 se presentan los perfiles de la deformación radial en las trayectorias de carga (H→I) y descarga (I→J) respectivamente, bajo succión constante ($u_a-u_w= 0.02$ MPa). En los gráficos se indican las condiciones de la tensión media (σ_m-u_a) en la que se ha alcanzado el equilibrio en deformación. Se ha medido una compresión en la trayectoria de carga donde las deformaciones irreversibles comenzarán después de alcanzar la superficie de fluencia en el punto de tensión p_{03} moviendo la LC hasta el punto final y una recuperación elástica en la trayectoria final del ensayo.

6.2.2.2 Comentarios finales

La célula Triaxial con control de succión es un equipo adecuado para realizar ensayos isótopos en muestras no saturadas, que nos permite trabajar con presiones elevadas de confinamiento gracias a la robustez del diseño de la cámara (Fig. 3.24). Otro aspecto importante que hay que destacar del equipo, es que nos permite manejar succiones altas empleando la técnica de traslación de ejes y que esta limitado al valor de entrada de aire de los discos cerámicos. La célula triaxial automatizada nos permite realizar ensayos con diferentes trayectorias de tensión y succión en lapsos de tiempo largos (en este ensayo se invirtió un periodo de tiempo de 147 días continuos).

El sistema de doble drenaje presenta la ventaja de reducir el tiempo de equilibrado de las presiones intersticiales, pero presenta la desventaja de atrapar aire en el centro de la muestra haciendo difícil lograr grados de saturación elevados a succiones bajas. Al final del ensayo se ha determinado la humedad de la muestra para que esta pueda ser comparada con el valor calculado mediante las lecturas de los medidores de volumen del cambio de agua intersticial (Tabla 6.14).

Tabla 6.14 Contenido de agua en las muestras al final del ensayo.

Ensayo	w(%) (secado al horno)	w(%) (sistema de buretas)
TISO-1	12.94	13.70

Esta pequeña diferencia constata, el hecho de la pérdida de agua por evaporación en ensayos largos, pero puede considerarse que el sistema de medida empleado, como en los ensayos anteriores, es apropiado para evaluar los cambios de humedad y grados de saturación del suelo durante el ensayo.

Otra ventaja y novedad de la célula triaxial con control de succión ha sido la propuesta del sistema de medida con los sensores Láser, que nos proporcionan lecturas fiables y estables de la deformación radial local y a lo largo de toda la altura de la muestra. Se ha detectado el efecto de los cabezales, así como la pequeña inclinación de la muestra asociado al movimiento libre del cabezal superior.

El ensayo ha permitido observar los comportamientos de colapso bajo un estado de tensiones isotropas, donde se ha mostrado que al decrecer la succión sobre un suelo normalmente consolidado se presenta un fenómeno de colapso debido a cambios en la macroestructura del esqueleto del suelo. Las medidas de deformación lateral han puesto de manifiesto que este colapso es isotrópico. La utilización de succiones altas ha permitido constatar que en el rango alto de succión las deformaciones asociadas al colapso son pequeñas.

6.2.3 Comparación de resultados de la Mini – célula isotrópica y Célula Triaxial

En la Fig. 6.61 se presentan los resultados de los ensayos isotropos ISO-1 (mini-célula isotrópica) y TISO-1 (célula triaxial), en un gráfico SWEP. En esta sección se comentará el comportamiento hidro-mecánico de ambos ensayos, ya que se ha realizado una trayectoria de tensión y succión muy similar en muestras con unas condiciones iniciales similares en humedad y densidad, fabricadas con el mismo proceso de compactación isotrópica.

En la Fig. 6.61 se muestra la diferencia de la deformación volumétrica, siendo mayor la del ensayo ISO-1 (mini-célula) que la del ensayo TISO-1 (célula triaxial). En el plano de estado volumétrico (abajo-izquierda) en la trayectoria de humedecimiento la variable de estado volumétrico cruza las

líneas de igual grado de saturación con una pendiente mayor para el ensayo ISO-1, que se manifiesta en un fenómeno de colapso mayor. En la Fig. 6.62 se muestran las curvas de la deformación volumétrica (ε_v), relación de agua (e_w) y grado de saturación (e_w/e) con respecto a los cambios de succión matricial. Allí se observa que a succiones altas no se presentan importantes cambios de volumen, concentrándose la mayor deformación de colapso a succiones bajas. También se observa que las variaciones en la relación de agua (e_w), en ambos ensayos, presentan un comportamiento muy similar, no obstante los cambios en el grado de saturación (e_w/e) son algo mayores para el ensayo ISO-1.

En la primera etapa de compresión realizada con la mini-célula isótropa (trayectoria B→C, Fig. 6.61) muestra una respuesta con una mayor compresibilidad (compresibilidad asociada a la muestra y compresibilidad del sistema). Dicha compresibilidad del sistema se debe a los acomodos iniciales de la membrana a la muestra y la compresibilidad inicial del líquido confinante, a pesar de la etapa de desaireación inicial. Una vez estabilizada la presión confinante, la respuesta del suelo en trayectorias de humedecimiento y secado es totalmente comparable con la respuesta obtenida con el equipo triaxial (trayectoria C→D→E, Fig. 6.62). Las etapas posteriores de carga y descarga, realizadas a una mayor presión de confinamiento y menos susceptibles a dichos acomodos, no evidencian la influencia de la compresibilidad del sistema, por lo que los resultados obtenidos son igualmente comparables con los del equipo triaxial (trayectoria E→F→G, Fig. 6.63).

En la Fig. 6.63 se presentan los parámetros obtenidos en ambos ensayos, tras un proceso hidráulico (en el plano $e : s$) y un proceso mecánico (en el plano $e : \sigma_m - u_a$), midiendo valores de parámetros muy similares. En la Tabla 6.15 y Fig 6.56 se comparan los parámetros obtenidos en los ensayos isótropos, así como los parámetros obtenidos en términos de tensión vertical neta ($\sigma_v - u_a$), del ensayo edométrico EDO-1.

Tabla 6.15 Parámetros de compresibilidad en ensayos isótropos y edométricos.

Ensayo	$(u_a - u_w)$ MPa	λ	κ	κ_s
EDO-1 *	0.3	0.084	0.002	0.002
	0.05	0.12	0.002	
ISO-1	0.2	0.10	0.003	0.002
TISO-1	0.15	0.08	0.006	0.001
	0.02	0.095	0.008	

* para el ensayo edométrico los parámetros fueron obtenidos en términos de tensión vertical neta ($\sigma_v - u_a$).

6.3 Resultados triaxiales con control de succión

6.3.1 Introducción

En esta sección se reportan los resultados experimentales obtenidos en el estudio del comportamiento hidromecánico de la arcilla durante la aplicación de un desviador. El programa de ensayos se enfocó al estudio del comportamiento hidromecánico, así como a la determinación de parámetros de resistencia al corte y al análisis de la respuesta mecánica tenso-deformacional del suelo, ya que pocos estudios experimentales se han enfocado en el acoplamiento hidromecánico durante la etapa de corte (Rampino *et al.* 1999; Rampino *et al.* 2000; Wheeler & Sivakumar, 2000). Por otro lado, se han reportado pocos resultados experimentales en cuanto a la evolución de la deformación axial y radial de forma local y global durante la etapa de corte.

El trabajo experimental consistió de diferentes tipos de ensayos de corte bajo deformación controlada y bajo una succión matricial constante relativamente alta. Se analizaron muestras normalmente consolidadas (NC) y sobreconsolidadas (OC). El estado sobreconsolidado fue inducido por diferentes mecanismos previos a la etapa de corte. Se utilizó un proceso mecánico de carga–descarga isótropa a succión constante y un proceso hidráulico realizando ciclos de cambios de succión (humedecimiento–secado) bajo tensión media neta constante, con una deformación de colapso dominante. Otro mecanismo de sobreconsolidación fue el imponer un elevado incremento–disminución de la succión total bajo condiciones libres de expansión y retracción. Las muestras normalmente consolidadas se estudiaron a un nivel de tensión media neta igual al máximo que haya experimentado la muestra bajo succión constante y también en otras muestras después de un fenómeno de colapso previo.

6.3.2 Ensayos triaxiales con control de succión del grupo IS

En el grupo de ensayos IS, la rotura y las fases de carga (y descarga si se aplica) se realizan a una misma succión de 0.8 MPa. En la Tabla 6.16 se indican los valores del estado inicial de las muestras ensayadas, presentando aproximadamente los mismos valores. En la Fig. 5.10 se representan en el plano Proctor. La nomenclatura usada para identificar los diferentes ensayos fue de acuerdo a una descripción general de la trayectoria seguida. La primera letra nos indica la etapa de compresión Isótropa (I), la segunda letra la etapa de corte (S : shearing) y las dos últimas letras nos indican la condición de la muestra antes de la etapa de corte (NC : normalmente consolidada o OC : sobreconsolidada), finalmente el número hace referencia a la tensión radial durante la fase de corte.

Tabla 6.16 Condiciones iniciales de las muestras ensayadas. Grupo IS.

Ensayo	W_0 %	ρ_{d0} g/cm ³	e_0	Sr_0 (%)	Ψ 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

$\sigma_m - u_a$: tensión media neta de compactación estática en condiciones isotropas; Ψ : succión total inicial.

6.3.2.1 Etapa de compresión isotropa

La trayectoria de tensión seguida para cada uno de los ensayos se describe en detalle en la sección 5.5.1. La evolución del índice de poros y del comportamiento hidráulico durante esta etapa de compresión isotropa (trayectoria A→B, Fig. 6.64, 6.65) muestra un comportamiento similar a los ensayos isotropos realizados (sección 6.2.2).

En el ensayo IS-OC-03, en la etapa de compresión isotropa, la tensión máxima alcanzada ($\sigma_m - u_a = 0.3$ MPa) fue menor a la obtenida durante el proceso de compactación ($\sigma_m - u_a = 0.6$ MPa), con el objetivo de analizar la rotura de una muestra sobreconsolidada. Para el ensayo ISO-NC-06 la tensión media neta fue la misma obtenida en el proceso de compactación ($\sigma_m - u_a = 0.6$ MPa). En el ensayo ISO-NC-12, la tensión media neta máxima fue de $\sigma_m - u_a = 1.2$ MPa (Fig. 6.64). En el ensayo IS-OC-06 se realizó un ciclo de carga–descarga isotropa bajo succión constante proporcionando un estado sobreconsolidado a la muestra antes de comenzar con la etapa de corte (Trayectoria A→B→C, Fig. 6.65). En este ensayo la trayectoria de carga (A→B) fue suficientemente extendida (hasta $\sigma_m - u_a = 1.6$ MPa) con la finalidad de causar un desplazamiento de la superficie de fluencia (LC) (Fig. 6.65, 6.77). Los incrementos de la tensión media neta fueron aplicados en incrementos iguales $\Delta(\sigma_m - u_a) = 0.2$ MPa, donde cada uno se mantuvo aproximadamente por 48 horas controlando la deformación volumétrica hasta su equilibrio. Por otro lado, esos incrementos se consideraron suficientemente pequeños como para poder evitar cambios de succión (disminución) importantes en la etapa inicial de carga.

En las Fig. 6.64 y 6.65 se presentan los resultados de los ensayos IS-NC-12 y IS-OC-06 correspondientes a las diferentes etapas de equilibrio en términos del índice de poros (e), deformación volumétrica (ε_{vc}), contenidos de agua (e_w) y grados de saturación (e_w/e) con respecto a

los cambios de la tensión media neta ($\sigma_m - u_a$). En las mismas figuras se observa en la etapa de carga una reducción del índice de vacíos, lo que implicaría un aumento en el grado de saturación ($S_r = e_w/e$) pero debido a la expulsión de agua, el grado de saturación permanece prácticamente constante. Por otro lado, en ambas figuras, se observa el comportamiento elastoplástico ya constatado en los ensayos de carga isotrópica descritas en los apartados anteriores. En la Fig. 6.65, correspondiente al ensayo IS-OC-06, se observó un valor menor de $\kappa = 0.003$ en la trayectoria de carga (A-B) que en la trayectoria de descarga ($\kappa = 0.007$) (B-C). En el caso del parámetro de compresibilidad las muestras del ensayo IS-NC-12 se detectó una respuesta ligeramente más rígida ($\kappa = 0.003$).

En los ensayos IS-NC-12 y IS-OC-06 (Fig. 6.64 y 6.65) se comprueba que la tensión de preconsolidación inicial (p_0) es la obtenida tras la compactación isotrópica. Cuando en la trayectoria de carga (A-B) alcanza la superficie de fluencia inicial en el punto (p_0), el suelo comienza a generar deformaciones plásticas y por lo tanto la superficie de fluencia será desplazada al final de la trayectoria A-B (Fig. 6.75 y 6.77). Este comportamiento fue consistente con el modelo propuesto por Alonso *et al.* (1990). En la Fig. D.15 del Anexo D, se presenta el perfil de las deformaciones laterales en la trayectoria de carga para el ensayo IS-OC-06.

6.3.2.2 Etapa de rotura

Los cuatro ensayos del grupo IS, de compresión triaxial a una velocidad de deformación axial constante de $v_q = 1.0 \mu\text{m}/\text{min}$, se realizaron bajo una succión matricial ($u_a - u_w$) = 0.8 MPa y presión de cámara neta ($\sigma_3 - u_a$) constante. En las Fig. 6.66, 6.67, 6.68 y 6.69, se resumen los resultados durante la etapa de compresión triaxial de los ensayos IS-NC-06, IS-NC-12, IS-OC-03 y IS-OC-06, respectivamente. La evolución de la tensión desviadora (q), deformación de corte (ε_s), deformación volumétrica (ε_v) así como los cambios de la relación de agua (e_w) y grado de saturación (e_w/e) con respecto a la deformación axial (ε_l) muestran el acoplamiento hidromecánico y la respuesta tensodeformacional. Durante la etapa de corte se registraron continuamente las medidas locales de la deformación axial (ε_l) y radial (ε_{3c}) en el centro de la muestra. No obstante, a predeterminados intervalos se obtuvieron las deformaciones radiales globales (ε_3) obtenidas de los perfiles de la deformación lateral, los cuales fueron determinados por medio de los sensores láser (Fig. 6.71). Las deformaciones volumétricas (ε_v) y de corte (ε_s) de forma global, así como el valor del grado de saturación (e_w/e) se representan en los gráficos por medio de una línea continua con símbolos

(círculos), donde cada símbolo corresponde a los diferentes intervalos que fueron seleccionados para medir la deformación radial del perfil de la muestra. Se observa que la principal diferencia entre la deformación global y local y el efecto en los cambios del grado de saturación, comienza a una deformación axial mayor de $\varepsilon_l = 5\%$, mientras que para el ensayo IS-OC-03 serán después del $\varepsilon_l = 9\%$. Los cambios en el grado de saturación son más representativos cuando se consideran las deformaciones radiales globales.

La evolución de las curvas tensión desviadora / deformación axial (ver Fig. 6.66 - 6.69) crece en forma monótona a un valor asintótico, sin presentar evidencia de un pico, fallando las muestras por abarrilamiento (Fig. 6.71). Para los ensayos con muestras normalmente consolidadas (IS-NC-06 y IS-NC-12) las curvas tensión–deformación (Fig. 6.66 y 6.67) tienden a seguir una respuesta normalmente consolidada, donde no hay un apreciable punto de fluencia, generando deformaciones plásticas desde el inicio del corte. El ensayo IS-NC-12 (Fig. 6.67), donde la presión neta de confinamiento fue de $(\sigma_3 - u_a) = 1.2$ MPa, la tensión desviadora alcanzó un mayor valor para conseguir el estado crítico. En las Fig. 6.73 y 6.75 se presenta la posición de la muestra antes de comenzar con la etapa de corte para los ensayos IS-NC-06 y IS-NC-12 respectivamente, donde la muestra se encuentra sobre la superficie de fluencia (punto B). Cuando la etapa de corte comienza, únicamente se generaran deformaciones plásticas de corte hasta un punto C de la línea de estado crítico. En todos los ensayos se efectuó un ciclo de descarga–recarga a una deformación axial entre $\varepsilon_l = 1$ y 2% , para obtener los parámetros elásticos del suelo.

Los ensayos se analizaron dentro de un contexto elastoplástico de estado crítico desarrollado por Alonso *et al.* (1990). El tamaño de la superficie de fluencia inicial, indicadas en las Fig. 6.73, 6.75 y 6.77 como LC (inicial), es definida por el proceso de la tensión de compactación $p = \sigma_m - u_a = 0.6$ MPa y la succión inicial $s = u_a - u_w = 0.8$ MPa. Los ensayos con muestras sobreconsolidadas (IS-OC-03 y IS-OC-06) mostraron una evolución quasi-lineal en una primera etapa y posteriormente se presentaron las deformaciones plásticas. La forma de las curvas tensión–deformación nos indica la localización de la superficie de fluencia. En la Fig. 6.76 se muestra claramente el punto de fluencia en el comportamiento de corte, obtenido de las curvas en los planos $e : (\sigma_m - u_a)$ y $q : \varepsilon_l$ con un valor de $p_{0l} = 0.89$ MPa. En el ensayo IS-OC-06 (Fig. 6.69) se observa que la curva presenta una respuesta más rígida antes de tocar el punto de fluencia (p_{0l}) hasta un valor por encima de $q \approx 0.81$ MPa. Este comportamiento es consistente con la trayectoria de tensión elástica inicial dentro de la LC (inicial), la cual fue arrastrada por la trayectoria de compresión isótropa (A-B). En la Fig. 6.77

se puede observar cómo se mueve la superficie LC (inicial). Una vez que en la trayectoria de carga isotrópica (A-B) alcanza el punto de fluencia (p_0), el suelo se comprime plásticamente y la superficie de fluencia LC es llevada al punto de tensión final de la trayectoria de carga isotrópica. En los ensayos donde la etapa de compresión triaxial se ha realizado a una presión de cámara constante de $(\sigma_3 - u_a) = 0.6$ MPa (IS-NC-06 y IS-OC-06), la variable q logra estabilizarse a un mismo valor de $q = 1.76$ MPa (OC) y $q = 1.74$ MPa (NC), respectivamente (Fig. 6.70).

En los ensayos, el volumen de las muestras decrece en forma monótona durante la etapa de corte. Este comportamiento contractante cesa a partir de una deformación axial mayor de $\varepsilon_1 > 13\%$, salvo para el ensayo IS-OC-06 que fue a $\varepsilon_1 > 8\%$. Dicho comportamiento también se observó en las deformaciones volumétrica obtenidas de forma global. A partir de esas deformaciones, se detectó un comportamiento dilatante hasta el final de cada ensayo en las medidas locales y globales, sin presentar en la curva deformación / desviador ningún signo de reblandecimiento. Este comportamiento también ha sido reportado por Charles W. & Abraham C. (2001). No obstante, al final de la falla, el volumen del suelo permaneció constante. Todo indica que las variables de estado p , q , y e se estabilizan y alcanzando un estado crítico (Fig. 6.70).

En las Fig. 6.66-6.69, se observa el comportamiento hidráulico, donde las muestras expulsan agua durante la etapa de corte hasta llegar a un valor estable. Rampino *et al.* (2000) observó que los suelos llevados a corte expulsaban agua durante la compresión y absorbían agua durante la dilatancia. En el caso de los ensayos presentados, en la etapa durante el comportamiento dilatante, no se observó este fenómeno.

En la Fig. 6.71 se presenta el desarrollo progresivo de las deformaciones laterales del perfil de la muestra durante la etapa de corte del ensayo IS-NC-06. También se muestran las deformaciones radiales globales indicadas con líneas discontinuas y las deformaciones axiales acumulada del ensayo. La forma de abarrilamiento de la muestra nos muestra que la determinación del grado de saturación de forma local es menos representativa que la global. En el Anexo D en las Fig. D.16, D.17 y D.18 se muestra el desarrollo progresivo de las deformaciones laterales del perfil de la muestra de los ensayos IS-NC-12, IS-OC-03 y IS-OC-06 respectivamente.

En las Fig. 6.73, 6.75 y 6.77 se presenta la trayectoria de tensiones el desplazamiento de la superficie de fluencia (LC), así como los vectores que nos indican la dirección de los incrementos

de las deformaciones plásticas de los ensayos IS-NC-06, IS-NC-12 y IS-OC-06, respectivamente. Los parámetros elásticos fueron evaluados de la trayectoria de descarga (Fig. 6.66 - 6.69). La dirección del vector de deformaciones plásticas ($\delta\epsilon^p$) evoluciona cambiando gradualmente durante la etapa de corte, partiendo de una dirección horizontal teniendo únicamente la componente de las deformaciones volumétricas plásticas ($\delta\epsilon_v^p$) con los incrementos de las deformaciones plásticas de corte nulos ($\delta\epsilon_s^p = 0$) y gradualmente alcanza el estado crítico donde $\delta\epsilon_v^p = 0$, existiendo únicamente la componente vertical ($\delta\epsilon_s^p$). Las deformaciones volumétricas elásticas y elásticas de corte inducidas por las tensiones (p, q) dentro de la superficie de fluencia están dadas por:

$$d\epsilon_v^e = \frac{\kappa}{v} \frac{dp}{p} \quad (6.3)$$

$$d\epsilon_s^e = \frac{dq}{3G} \quad (6.4)$$

Para el cálculo de las deformaciones volumétricas plásticas y deformaciones plásticas de corte, se tomaron los valores de los parámetros elásticos del suelo obtenidos en cada ensayo (Fig. 6.95-6.97). En la Tabla 6.19 se resumen los parámetros del suelo obtenidos.

En las Fig. 6.72 y 6.74 se muestran las deformaciones volumétricas plásticas ($\delta\epsilon_v^p$) y las deformaciones plásticas de corte ($\delta\epsilon_s^p$) con respecto a la tensión media neta ($\sigma_m - u_a$) para los ensayos con muestras normalmente consolidadas. Se observa cómo las deformaciones plásticas de corte se incrementan gradualmente y las deformaciones volumétricas disminuyen gradualmente hasta un valor nulo. En las mismas figuras (6.72, 6.74) se muestra la variación en la dirección de los incrementos de las deformaciones plásticas ($\delta\epsilon_v^p / \delta\epsilon_s^p$) como una función de la tensión media neta ($p = \sigma_m - u_a$). Para una mejor claridad se filtraron los datos experimentales.

Para estas muestras que presentan una historia de tensiones isótropa, la dirección de los vectores de incremento de la deformación plástica son razonables, asumiendo una regla de flujo asociada y una superficie de fluencia (simétrica / elíptica) para una succión constante (Alonso *et al.*, 1990). Por otro lado, el incremento de volumen medido en algunas etapas de los ensayos, introduce componentes horizontales negativas en los vectores de incremento de la deformación plástica, pero al final de la etapa de rotura, la dirección de los vectores es vertical.

6.3.3 Ensayos triaxiales con control de succión del grupo IWS

En este apartado se presentan los resultados de los ensayos de compresión triaxial del grupo IWS. En la sección 4.3.2 se detalla la fabricación de las muestras (tensión controlada) y en la Tabla 6.17 y Fig. 5.10 se indica el estado inicial de las muestras. La nomenclatura empleada para identificar los ensayos fue de acuerdo a una descripción general de la trayectoria realizada. La primera letra se refiere también a la etapa de compresión Isótropa (I), la segunda letra nos indica que se realizaron cambios de succión (W), la tercera letra hace referencia a la etapa de corte (S), la cuarta y quinta letras nos indican la condición de la muestra antes de la etapa de corte (normalmente consolidada o sobreconsolidada) y el número corresponde al valor máximo o mínimo de succión a la que se somete a la muestra en el ensayo.

Tabla 6.17 Condiciones iniciales de las muestras. Grupo IWS.

Ensayo	w_0 %	ρ_{d0} g/cm ³	e_0	Sr_0 (%)	Ψ MPa	$\sigma_m - u_a$ MPa
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

Las trayectorias realizadas en los ensayos del grupo IWS se puede resumir de la siguiente manera, en la sección (5.5.1) se detallan los procedimientos y las trayectorias seguidas.

Inicialmente, en el ensayo IWS–OC–87, se impuso una succión total (Ψ) aproximada de 87 MPa mediante el uso de una disolución salina saturada dentro de un sistema termodinámicamente cerrado (ver Fig. 5.18). Después de 30 días (tiempo de equilibrio) se montó la muestra en la célula triaxial imponiendo unas condiciones iniciales de tensión y succión matricial. Las deformaciones volumétricas sufridas por la muestra en el ciclo de secado se midieron con la ayuda de un calibre (midiendo el diámetro y la altura en varios puntos referenciados de la muestra). Posteriormente la muestra se sometió a una trayectoria de carga isótropa bajo succión matricial constante. Finalmente, se desarrolló la etapa de corte en la muestra ligeramente sobreconsolidada (estado dado por la imposición de la succión total $\Psi = 87$ MPa).

Para 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, dando un estado ligeramente sobreconsolidado a la muestra antes de comenzar la etapa de corte.

En el ensayo IWS-NC-02 la muestra se sometió a una trayectoria de carga isotrópica, continuando con una trayectoria de humedecimiento hasta una succión $s = 0.02$ MPa, donde finalmente se realizó la etapa de corte.

6.3.3.1 Etapa de compresión isotrópica

En este grupo de ensayos, el estado sobreconsolidado y normalmente consolidado de las muestras antes de la etapa de corte, se indujo por un proceso hidráulico, mientras que en los ensayos del grupo IS el estado de la muestra se generó por un proceso mecánico.

Los incrementos de la tensión media neta fueron aplicados por etapas en incrementos iguales $\Delta(\sigma_m - u_a) = 0.2$ MPa, cada incremento se mantuvo aproximadamente por 48 horas controlando la deformación volumétrica hasta su equilibrio y manteniendo la condición de succión constante.

En las Fig. 6.78, 6.79 y 6.80 en el plano $e : \sigma_m - u_a$, se observa que en la etapa de carga isotrópica (A-B) máxima alcanzada fue de $(\sigma_m - u_a) = 0.6$ MPa, que es la misma tensión impuesta a la muestra durante el proceso de compactación. En la Fig. 6.78 se observa que durante esta etapa de compresión isotrópica para el ensayo IWS-OC-87, prácticamente no sufre cambios en el contenido de agua y el grado de saturación. De esta trayectoria (A-B) realizada en los ensayos, se obtuvieron los siguientes valores del parámetro de compresibilidad en el rango elástico $\kappa_{(IWS-OC-87)} = 0.0063$, $\kappa_{(IWS-OC-01)} = 0.0043$ y $\kappa_{(IWS-NC-02)} = 0.0054$, siendo estos valores consistentes con los parámetros obtenidos de los ensayos del grupo IS.

6.3.3.2 Etapa de cambio de succión

En la Fig. 6.78 se observa el cambio de volumen que sufre la muestra del ensayo IWS-OC-87 al ser sometida a una succión total de $\Psi = 87$ MPa. Si se considera el modelo elastoplástico propuesto por Alonso *et al.* (1990), un incremento en la succión puede inducir deformaciones irreversibles. La succión (s_0) puede definirse como el valor de succión más elevado al que ha estado sometido en toda su historia el suelo para un cierto valor de tensión esférica, de forma que, cuando la succión aplicada sobrepasa este valor, surgen deformaciones permanentes o irreversibles. Este valor de succión (s_0), es la frontera de la transición del estado elástico al rango virgen cuando la succión se incrementa, esta frontera se denomina SI.

En la Fig. 6.78 se observa que la deformación volumétrica al ser sometida la muestra a un secado bajo una succión total de $\Psi = 87$ MPa es del orden de $\varepsilon_v = 2.28$ %. Cuando la muestra se somete a una succión matricial $(u_a - u_w) = 0.8$ MPa dentro de la célula triaxial, se genera un hinchamiento que recupera una deformación volumétrica de $\varepsilon_v = -1.79$ %, (en la Fig. D.25 del Anexo D se muestra la evolución temporal de esta etapa). En este proceso de secado–humedecimiento se generarán unas deformaciones irreversibles del orden de $\varepsilon_v^p = 0.5$ %. En la Fig. 6.81b se muestra el movimiento de la superficie de fluencia LC (inicial), ocasionado por el desplazamiento de la superficie SI que desarrolla unas deformaciones irreversibles. La superficie de fluencia inicial indicada como LC (inicial), se definió por el proceso de compactación ($\sigma_m - u_a = 0.6$ MPa). Este cambio de succión bajo condiciones libres de retracción, definió el estado sobreconsolidado de la muestra antes de la etapa de corte.

En las Fig. 6.79 y 6.80 se presentan los resultados de los ensayos IWS-OC-01 y IWS-NC-02, respectivamente, en un diagrama SWEP que representa la trayectoria de compresión isótropa y de cambio de succión matricial. La trayectoria de tensión seguida en los ensayos se resume de la siguiente manera (descrita a detalle en la sección 5.5.1). Inicialmente, las muestras fueron sometidas a una trayectoria de carga isótropa hasta una tensión media neta igual a la de compactación ($\sigma_m - u_a = 0.6$ MPa). Se continuó con una trayectoria de humidificación (B→C) bajo tensión media neta constante ($\sigma_m - u_a$), que se llevó a cabo manteniendo la presión de aire constante ($u_a = 0.9$ MPa) y controlando la presión de agua (u_w). Las trayectorias de humidificación se realizaron por etapas hasta un valor de $(u_a - u_w) = 0.01$ MPa y 0.02 MPa para los ensayos IWS-OC-01 y IWS-NC-02, respectivamente. En el caso del ensayo IWS-NC-02, se continuó con la etapa de corte sobre la muestra normalmente consolidada bajo este valor de succión. En el ensayo IWS-OC-01 se continuó con una trayectoria de secado hasta un valor de 0.8 MPa (C→D), imponiendo a la muestra un estado sobreconsolidado antes de comenzar con la trayectoria de corte. En el Anexo D, se muestra en las figuras D.26–D.31 los resultados de los ensayos IWS-OC-01 y IWS-NC-02, presentando la evolución temporal del fenómeno de colapso producido en la última etapa de humidificación, así como los resultados correspondientes a las diferentes etapas de equilibrio en cada cambio de succión matricial y los perfiles de la deformación radial global en la trayectoria de humidificación.

En las Fig. 6.79 y 6.80, en el plano de las variables de estado volumétrico (abajo–izquierda), se observa que en el proceso de humidificación (B→C) se desarrollan cambios en el grado de saturación ($S_r = e_w/e$), donde la trayectoria de estado volumétrico ($\delta e/\delta e_w \approx -0.68$ y -0.61) cruza casi

perpendicularmente a las líneas de igual grado de saturación. Este aumento está asociado con la ocurrencia de un proceso irrecuperable en la deformación volumétrica, debido a un colapso del esqueleto del suelo (abajo-derecha, Fig. 6.79, 6.80). En el ensayo IWS-OC-01 (Fig. 6.79), en la trayectoria de humedecimiento se generó una deformación volumétrica $\varepsilon_{vc} = 2.8 \%$ y una deformación por retracción en la trayectoria de secado de $\varepsilon_{vc} = 0.8 \%$, mientras que en el ensayo IWS-NC-02 (Fig. 6.80) la deformación volumétrica total en la trayectoria de humedecimiento fue de $\varepsilon_{vc} = 2.98 \%$. Las deformaciones volumétricas reportadas fueron calculadas basándose en la deformación radial medida en la zona central del espécimen.

El comportamiento del suelo en los ensayos realizados ha sido analizado dentro del contexto del modelo elastoplástico desarrollado por Alonso et al. 1990, inspirado en conceptos de estado crítico. El tamaño de la superficie de fluencia inicial (Fig. 6.83 y 6.84) LC (inicial) y la succión matricial inicial se definió por el proceso de compactación ($\sigma_m - u_a = 0.6$ MPa y $s = 0.8$ MPa). Esta superficie permanece quieta durante la primera etapa de compresión isótropa en los ensayos triaxiales (trayectoria, A-B). La reducción de la succión (B-C) induce una reducción del volumen con importantes deformaciones volumétricas irreversibles (fenómeno de colapso), por lo que la LC (inicial) es arrastrada (Fig. 6.83-6.84) hasta el punto de tensión (p_{0l}). En la Tabla 6.12 se presentan los valores de los parámetros usados para representar la forma y el movimiento de la curva LC, estos valores son los mismos que los empleados para exhibir el comportamiento de la curva LC de los ensayos isótropos comentados anteriormente.

En el caso del ensayo (IWS-NC-02), la etapa de corte comienza en el punto de tensión sobre la superficie de fluencia ($s = 0.02$ MPa y $p_{0l} = 0.6$ MPa) en una muestra normalmente consolidada, donde las deformaciones plásticas ocurrirán al comenzar con la etapa de corte (C-D) (Fig. 6.84). Por otro lado, el ensayo (IWS-OC-01) continuó con una trayectoria de secado (C-D), que indujo cierta retracción, donde la LC (inicial) se mantuvo sin cambios. La etapa de corte en el punto de tensión ($s = 0.8$ MPa y $p_0 = 0.6$ MPa) comenzó en un estado sobreconsolidada. En la etapa inicial de la fase de corte sólo se desarrollarán deformaciones elásticas. Una vez que se encuentra la superficie de fluencia desplazada por el fenómeno de colapso, ocurrirán las deformaciones plásticas (Fig. 6.83).

6.3.3.3 Etapa de rotura

Los ensayos de compresión triaxial del grupo IWS, se realizaron en muestras sobreconsolidadas (IWS-OC-87 y IWS-OC-01) y en muestras normalmente consolidadas (IWS-NC-02) bajo una variación de deformación constante de $v_q = 1.0 \mu\text{m}/\text{min}$ a tensión de cámara neta de $\sigma_3 - u_a = 0.6$ MPa y succión matricial constante de $s = 0.8$ MPa para las muestras sobreconsolidadas y $s = 0.02$ MPa para la muestra normalmente consolidada. En las Fig. 6.85, 6.86 y 6.87 se resumen los resultados durante la etapa de compresión triaxial de los ensayos IWS-OC-87, IWS-OC-01 y IWS-NC-02, respectivamente. La evolución de la tensión desviadora (q), deformación de corte (ε_s), deformación volumétrica (ε_v), así como los cambios de la relación de agua (e_w) y grado de saturación (e_w/e), muestran la respuesta tensodeformacional, así como el acoplamiento hidromecánico.

El registro de las deformaciones axial (ε_l) y radial (ε_r) se realizó de igual manera que en los ensayos del grupo IS, haciendo mediciones continuas (deformaciones locales) y mediciones en predeterminados intervalos (deformaciones globales). En las Fig. 6.85, 6.86 y 6.87 las deformaciones globales se representan por una línea continua con símbolos, donde cada símbolo corresponde a los diferentes intervalos seleccionados para medir las deformaciones laterales. Se observa que en la muestra normalmente consolidada (Fig. 6.87) se presenta una mayor diferencia entre la deformación global y local y el efecto en los cambios del grado de saturación. En las muestras sobreconsolidadas, esta diferencia se observa a una deformación axial mayor del $\varepsilon_l = 2\%$. En la Fig. 6.88 se presenta el desarrollo progresivo de las deformaciones laterales del perfil de la muestra durante la etapa de corte del ensayo IWS-OC-01, indicando la deformación radial global con líneas discontinuas y la deformación axial acumulada. También se muestran las deformaciones laterales durante la segunda etapa de descarga y recarga a una deformación axial del orden de 12 %, en esta figura se muestra claramente la restricción de el desplazamiento lateral que impone el cabezal rugoso. En el Anexo D en las Fig. D.19 y D.20 se muestra el desarrollo progresivo de las deformaciones laterales de los perfiles de las muestras de los ensayos IWS-OC-87 y IWS-NC-02, respectivamente.

En las Fig. 6.85-6.87 se muestra también la curva tensión–deformación ($q:\varepsilon_l$). Con las curvas se observa cómo el desviador crece monótonamente a un valor asintótico sin presentar evidencia de un pico. En la muestra normalmente consolidada, la curva tensión–deformación tiende a seguir una respuesta normalmente consolidada donde no se observa un punto de fluencia, generando

deformaciones plásticas desde el comienzo de la etapa de corte. En los ensayos con muestras sobreconsolidadas se observa que inicialmente presentan una mayor rigidez con un desviador que crece de forma quasi-lineal, continuando con unas deformaciones que inducen endurecimiento.

En la Fig. 6.89, se presenta el comportamiento tenso-deformación para muestras normalmente consolidadas y sobreconsolidadas bajo una tensión neta de cámara constante ($\sigma_3 - u_a = 0.6$ MPa) y succión constante ($u_a - u_w = 0.8$ MPa). Se observa que las variables de estado p , q , y e se estabilizan, alcanzando un estado crítico. En las Fig. 6.87 y 6.89 se observa que la respuesta del suelo es dependiente de la succión. Un incremento de la succión tiene un efecto sobre las propiedades mecánicas del material, incrementando tanto la rigidez como la resistencia al corte. En todos los casos se efectuó un ciclo de descarga-recarga a una deformación axial entre $\varepsilon_l = 1\%$ y 2% , para obtener los parámetros elásticos del suelo.

El comportamiento volumétrico de las muestras presentó el mismo fenómeno que en los ensayos del grupo IS, en donde la deformación volumétrica decrece monótonamente durante la etapa de corte. Este comportamiento contractante cesa a partir de una deformación axial mayor del 6% , con excepción de la muestra normalmente consolidada que fue a una $\varepsilon_l > 13\%$. Posteriormente se detectó un comportamiento volumétrico dilatante hasta el final de cada ensayo, tanto en las deformaciones volumétricas locales como globales, sin presentar evidencia de reblandecimiento del suelo. En la Fig. 6.89 se observa que la muestra bajo una succión matricial menor presenta un comportamiento contractante mayor, como era de esperar.

En las Fig. 6.85 y 6.86 de los ensayos IWS-OC-87 y IWS-OC-01, respectivamente, se observa el comportamiento hidráulico, donde las muestras expulsaron agua durante la etapa de corte hasta llegar a un valor estable. Por otro lado, en el ensayo IWS-NC-02 donde la muestra se llega a la rotura bajo una succión matricial menor ($s = 0.02$ MPa), se observa que en la etapa inicial entra agua a la muestra y posteriormente expulsa agua hasta llegar a un valor estable. En todos los ensayos de compresión triaxial se ha observado que al final de la etapa de corte la muestra deja de expulsar agua hasta alcanzar un valor estable. No se presentó evidencia experimental de entrada de agua en la etapa dilatante final.

En las Fig. 6.81a y 6.82, se muestra cómo se obtiene el punto de fluencia en la etapa de corte de las muestras sobreconsolidadas, a través de las curvas en el espacio $e : (\sigma_m - u_a)$ y $q : \varepsilon_l$. Las muestras

presentan una respuesta más rígida antes de tocar el punto de fluencia (p_{01}) a un valor por encima de $q \approx 0.34$ MPa para el ensayo IWS-OC-87 y de $q \approx 0.48$ MPa para el ensayo IWS-OC-01. Las deformaciones volumétricas elásticas ($\delta\varepsilon_v^e$) y deformaciones elásticas de corte ($\delta\varepsilon_s^e$) inducidas por las tensiones $p : q$, fueron calculadas de acuerdo con las ecuaciones (6.7) y (6.8). En las Fig. 6.81b, 6.83 y 6.84 se presenta la trayectoria de tensiones realizada, el movimiento de la superficie de fluencia, así como los vectores que nos indican la dirección de los incrementos de las deformaciones plásticas de los ensayos IWS-OC-87, IWS-OC-01 y IWS-NC-02, respectivamente. La dirección de los vectores cambia gradualmente, de una posición prácticamente horizontal ($\delta\varepsilon_s^p = 0$) hasta una dirección vertical ($\delta\varepsilon_v^p = 0$). Para estas muestras, que presentan una historia previa de tensiones isotropa, la dirección de los vectores es razonablemente predicha asumiendo una regla de flujo asociada y una superficie de fluencia (simétrica / elíptica) a succión constante (Alonso *et al.*, 1990).

En las Fig. D.21, D.22 y D.23 del Anexo D, se muestran las deformaciones volumétricas plásticas ($\delta\varepsilon_v^p$), las deformaciones plásticas de corte ($\delta\varepsilon_s^p$) y la variación en la dirección de los incrementos de las deformaciones plásticas ($\delta\varepsilon_v^p / \delta\varepsilon_s^p$) con respecto a la tensión media neta ($\sigma_m - u_a$) para los ensayos del grupo IWS.

En la Tabla 6.19 se presentan los parámetros del suelo, donde se puede observar la influencia de la succión matricial sobre los parámetros elásticos en muestras normalmente consolidadas y sobreconsolidadas.

6.3.4 Líneas de estado crítico

Los puntos de la línea de estado crítico se obtuvieron del valor máximo alcanzado en el espacio ($q : \varepsilon_l$). En la Fig. 6.90 se muestra en el espacio tensión media neta–tensión desviadora ($p : q$) la línea de estado crítico aproximada obtenida de los ensayos IS-OC-03, IS-NC-06 y IS-NC-12.

Alonso *et al.* (1990), en la ecuación (6.5), asume que la tensión del suelo está linealmente relacionada con la succión y la tensión media neta:

$$q = M p + M k s \quad (6.5)$$

Donde M es la pendiente de la línea de estado crítico para suelos saturados y k es una constante. Wheeler & Sivakumar (1995), modifican la ecuación (6.5) a partir de datos experimentales por la expresión siguiente:

$$q = M(s) p + \mu(s) \quad (6.6)$$

Donde $M(s)$ es la pendiente de la línea de estado crítico, que puede variar con la succión y $\mu(s)$ es el incremento no lineal con la succión.

En la Fig. 6.91 se muestra la línea de estado crítico para los ensayos con unos mismos valores de succión ($s = 0.8$ MPa) y la línea de estado crítico de los ensayos triaxiales en muestras saturadas (CD-103), donde el valor de la pendiente M fue el mismo. Por lo tanto, se puede concluir de estos ensayos es que el valor de M no tiene una alta dependencia con la succión.

Los parámetros de la línea de estado crítico tanto de la pendiente (M) y del intercepto $\mu(s)$ fueron:

$$M (s = 0.8 \text{ MPa}) = 1.154$$

$$\mu (s = 0.8 \text{ MPa}) = 0.39 \text{ MPa}$$

El ángulo de fricción (ϕ') fue obtenido de la expresión (6.7), partiendo de que el valor de M es constante, obteniendo un valor del ángulo de fricción de $\phi' = 28.94^\circ$.

$$\text{sen}\phi' = \frac{3 M}{6 + M} \quad (6.7)$$

La función de fluencia para la siguiente familia de elipses en el espacio de tensiones (p, q, s) está dada por la siguiente expresión (Alonso *et al.*, 1990):

$$q^2 - M^2 (p + p_s)(p_0 - p) = 0 \quad (6.8)$$

donde p es la tensión media neta, q la tensión desviadora, s la succión y p_s es la relación del incremento aparente de la cohesión con la succión, M es la pendiente de la línea de estado crítico y p_0 la tensión de preconsolidación bajo condiciones isotrópicas a una succión determinada.

El estado final de las muestras en los ensayos de compresión triaxial también se ha representado en el espacio volumen específico y tensión media neta ($v : p$). Esta línea de estado crítico que varía con la succión esta definida por la siguiente expresión (Wheeler & Sivakumar, 1995):

$$v = \Gamma(s) - \psi(s) \ln \left(\frac{p}{p_{at}} \right) \quad (6.9)$$

Donde $\psi(s)$ es la pendiente y $\Gamma(s)$ el intercepto de la línea de estado crítico en función de la succión. Los valores obtenidos de la pendiente $\psi(s)$ y del intercepto $\Gamma(s)$ fueron:

$$\begin{aligned} \psi(s = 0.8) &= -0.18 & \psi(s = 0) &= -0.058 \\ \Gamma(s = 0.8) &= 0.66 & \Gamma(s = 0) &= 0.38 \end{aligned}$$

En la Fig. 6.92 se muestra la línea de estado crítico (CSL), así como la línea normalmente consolidada (NCL), para los ensayos bajo una succión $s = 0.8$ MPa y en muestras saturadas ($s = 0$). Se observa que la pendiente de la línea de estado crítico y la línea normalmente consolidada de las muestras saturadas presentan un menor valor. Por otro lado, se observa que en los ensayos en muestras no saturadas la línea NCL no es paralela a la línea CSL presentando una mayor pendiente que la CSL. En las muestras saturadas las dos líneas son casi paralelas.

6.3.5 Comentarios finales

La célula triaxial con control de succión es un equipo adecuado para investigar la respuesta hidromecánica de las muestras no saturadas en ensayos de compresión triaxial. En ella se pueden realizar diferentes trayectorias tensionales antes de una etapa de corte, pudiendo analizar muestras sobreconsolidadas y normalmente consolidadas, imponiendo el estado a la muestra por un proceso hidráulico y/o mecánico.

El sistema de doble drenaje reduce el tiempo de equilibrio de las presiones intersticiales, no obstante presenta la desventaja de atrapar aire en el centro de la muestra haciendo difícil de conseguir grados de saturación más elevados a succiones bajas. Al final de cada ensayo se ha determinado la humedad de la muestra, de manera que ésta pueda ser comparada con el valor obtenido mediante las lecturas de los medidores de volumen del cambio de agua intersticial (Tabla 6.18). Con estos valores, puede considerarse que el sistema de medida empleado fue apropiado para evaluar los cambios de humedad del suelo durante el ensayo.

Tabla 6.18 Valores del contenido de humedad al final del ensayo.

Ensayo	w(%)	w(%)
	(secado al horno)	(sistema de buretas)
IS – NC – 06	9.97	10.48
IS – NC – 12	9.53	9.32
IS – OC – 03	9.79	9.86
IS – OC – 06	10.0	10.48
IWS – OC – 87	8.39	8.62
IWS – OC – 01	9.67	10.10
IWS – NC – 02	12.16	12.64

En la Fig. 6.93, se presenta un resumen de los resultados de compresión triaxial, donde se observa la estabilización de los desviadores y de los cambios de volumen. En la evolución del volumen con la deformación axial se observa un comportamiento contractante que cesa a partir de una deformación axial aproximadamente mayor de $\varepsilon_l > 7\%$ en muestras sobreconsolidadas y $\varepsilon_l > 13\%$ en muestras normalmente consolidadas. Los resultados fueron interpretados dentro de un contexto de estado crítico (Alonso *et al.*, 1990). La tendencia al aumento de volumen de las muestras sobreconsolidadas es coherente con el citado modelo, sin embargo el aumento de volumen que se ha medido al final de las fases de corte en las muestras normalmente consolidadas no parece encajar con las previsiones del citado modelo.

En la Fig. 6.94a se muestra en el plano $q : \varepsilon_l$ la curva tensión–deformación medida en los ensayos hasta una deformación axial aproxima de $\varepsilon_l = 2.0\%$. Se observa la mayor rigidez de las muestras sobreconsolidadas por medio de un ciclo de humedecimiento–secado y de un ciclo de carga–descarga isotropa, mostrando una primera etapa con una evolución lineal hasta alcanzar la superficie de fluencia inicial, continuando con deformaciones plásticas.

Durante la etapa de corte en todas las muestras, se observó la expulsión de agua hasta alcanzar un valor estable, excepto para el ensayo bajo una succión inferior ($s = 0.02$ MPa) en donde en la etapa inicial de rotura entró agua a la muestra y posteriormente a una deformación axial mayor de 5% comenzó a expulsar agua hasta llegar a un valor estable. En la Fig. 6.94b se presentan las trayectorias asociadas con las variables e y e_w en los distintos ensayos de rotura midiendo cambios importantes en los grados de saturación en las trayectorias de los ensayos IS-OC-03, IWS-OC-87 y IWS-OC-01, asociadas con la dilatación que experimentan las muestras en las etapas finales de la rotura. Igualmente en esta figura se aprecia que no existen cambios importantes en el contenido de

agua durante el comportamiento dilatante. Algunos autores (Rampino *et al.*, 2000) han observado cierta entrada de agua durante esta etapa.

En las Fig. 6.95, 6.96 y 6.97 se han dibujado la influencia de la succión (s), grado de saturación (S_r) y tensión radial neta ($\sigma_3 - u_a$) sobre el módulo de Young (E), para las muestras normalmente consolidadas y sobre consolidadas. En la Fig. 6.95, se observa que el incremento de la succión induce un incremento en el módulo E . Dicho módulo disminuye con el incremento del grado de saturación (Fig. 6.96). Sin embargo, se observa que el efecto de la succión es más importante que el del grado de saturación, ya que muestras con distintos grados de saturación y la misma succión presentan valores del módulo elástico muy parecidos. Por otro lado también se ve afectado por la tensión radial neta, a mayor tensión mayor módulo de E (Fig. 6.97). Este comportamiento del módulo E influido por la s , S_r y $\sigma_3 - u_a$ también fue reportado por Rampino *et al.* (2000). En la Tabla 6.19 se resumen los valores de los parámetros del suelo obtenidos en cada ensayo.

Tabla 6.19 Parámetros del suelo. Ensayo de compresión triaxiales en muestras no saturadas.

Ensayo	$\sigma_3 - u_a$ MPa	$u_a - u_w$ MPa	E MPa	G MPa	ν Poisson	κ	λ (s)
IS – NC – 06	0.6	0.8	389	135	0.33	0.006	0.078
IS – NC – 12	1.2	0.8	548	213	0.32	0.003–0.007	0.064
IS – OC – 03	0.3	0.8	231	64	0.26	0.007	0.085
IS – OC – 06	0.6	0.8	407	153	0.34	0.0055	0.091
IWS – OC – 87	0.6	0.8	428	155	0.36	0.0063	0.060
IWS – OC – 01	0.6	0.8	398	130	0.45	0.0043	0.085
IWS – NC – 02	0.6	0.02	226	119	0.27	0.0054	0.085

6.4 Interpretación de los ensayos de compresión triaxial mediante el modelo elastoplástico BBM

6.4.1 Introducción

Hasta el momento se han presentado las superficies de fluencia del modelo de Barcelona utilizando unos parámetros obtenidos a partir del ajuste de los ensayos de compresión isotrópica en condiciones saturadas y tratando de reproducir las condiciones en las que se pasaba del régimen elástico al elastoplástico. Como se ha visto en las secciones anteriores, con esos parámetros se pueden obtener puntos de la superficie de fluencia en el plano $p : q$ que se asemejan mucho a los medidos. Sin embargo, con el empleo simultáneo de toda la información derivada de todos los ensayos

(incluyendo los ensayos de compresión triaxial), se conduce a un conjunto de parámetros más global que permitirá explicar mejor los resultados obtenidos. A continuación se indica la forma en que se ha obtenido cada uno de los parámetros del modelo de Barcelona y en la Tabla 6.20 se recoge el valor finalmente adoptado para los mismos. El procedimiento que se ha utilizado para la obtención de los parámetros se indica a continuación:

- $\lambda(0)$, β y r : coeficiente de compresibilidad y parámetros que controlan la compresibilidad del suelo. Para su determinación se han tenido en cuenta los resultados de los ensayos de compresión isótropa en muestras saturadas (Tabla 4.16, Fig. 4.36) y de los ensayos triaxiales en muestras saturadas CD-103 y CD-104 (Tabla 4.21, Fig. 4.54 y 4.55). Se ha seleccionado un conjunto de parámetros que ha permitido el mejor ajuste en la simulación.
- κ : es el coeficiente de compresibilidad en el rango elástico. Este parámetro se determina a partir de la curva saturada de descarga–recarga de los ensayos de compresión isótropa (Tabla 4.16, Fig. 4.36) y de los ensayos triaxiales saturados CD-103 y CD-104 (Tabla 4.21, Fig. 4.54 y 4.55). El valor de κ se ajustó a un valor que permitiera reproducir con la máxima precisión posible los ensayos. Alguna dependencia de κ sobre s es también probable (Alonso, 1993), pero se ha utilizado un valor constante para asegurar que la parte elástica de modelo sea conservativa.
- p^c : es una tensión de referencia. Es la tensión media neta para la que se alcanza el estado saturado virgen partiendo de un estado no saturado, igualmente virgen, en una trayectoria de reducción de la succión que solamente genera hinchamientos elásticos. La elección del valor más apropiado de p^c fue el que mejor ajuste dio en la simulación para reproducir los resultados experimentales.
- λ_s : parámetros de rigidez con respecto a los cambios en succión para el estado virgen del suelo. Este parámetro se obtuvo del ensayo de compresión triaxial (IWS–OC–87) en la trayectoria de aumento de la succión de $\Psi_0 = 0.8 \text{ MPa} \rightarrow \Psi_0 \approx 87 \text{ MPa}$ (Fig. 6.101).
- κ_s : parámetro de rigidez elástica para cambios en succión. Se ha obtenido de las trayectorias de secado tras una disminución previa de la succión, en ambos casos a tensión media neta constante. Los valores de los parámetros se obtuvieron de los ensayos isótropos ISO-1, ISO-2 (Tabla 6.9, Fig. 6.46, 6.47), TISO-1 (Tabla 6.15, Fig. 6.54) y del ensayo de compresión triaxial IWS-OC-01 (Fig. D.27 del Anexo D).
- G , ν , E , K : se han obtenido de las curvas $q : \varepsilon_s$ y $q : \varepsilon_l$ en la etapa de descarga–recarga de los ensayos de compresión triaxial, tomando la pendiente correspondiente a la recta tangente de

dichas curvas. Se ha observado que el módulo E tiene una cierta dependencia de la succión ($u_a - u_w$), grado de saturación (S_r) y de la tensión radial neta ($\sigma_3 - u_a$) (Tabla 6.19, Fig.6.95-6.97).

- M : pendiente de la línea de estado crítico. Este parámetro ha sido obtenido de los ensayos triaxiales en muestras saturadas (Fig. 4.53) y de los ensayos triaxiales en muestras no saturadas siguiendo una trayectoria $\delta q / \delta p = 3$ a succión constante y tomando el valor máximo alcanzado en el espacio $p : \varepsilon_l$ (Fig. 6.90 y 6.93).
- α : parámetro de la regla de flujo. Obtenido del cálculo de M, κ y $\lambda(0)$. Su elección es tal que la regla flujo prediga cero deformaciones laterales para un estado de tensiones correspondientes a una condición de K_0 (Alonso *et al.*, 1990).
- k_s : parámetro que relaciona la cohesión con la succión. Obtenido de los ensayos de compresión triaxial IS-OC-03, IS-NC-06 y IS-NC-12 (Fig. 6.90).

Tabla 6.20 Parámetros del material usados en la simulación con el modelo BBM.

Símbolo	Parámetro	Valor
$\lambda(0)$	coeficiente de compresibilidad elastoplástico en condiciones saturadas con respecto a p	0.073
$\lambda(s)$	coeficiente de compresibilidad elastoplástico en condiciones no saturadas con respecto a p	0.060
κ	coeficiente de compresibilidad elástico con respecto a p	0.005
p^c	tensión de referencia	0.07 kPa
r	parámetro que controla la compresibilidad del suelo	0.782
β	parámetro que controla la compresibilidad del suelo	155 MPa ⁻¹
λ_s	parámetro de rigidez con respecto a los cambios en succión para el estado virgen del suelo	0.005
κ_s	parámetro de rigidez elástica para cambios en succión	0.001
ν	módulo de Poisson	0.33
M	pendiente de la línea de estado crítico	1.155
α	Parámetro de la regla de flujo	0.60
k_s	Parámetro que relaciona cohesión con la succión	0.42

- p_0^* : tensión de preconsolidación para la condición saturada. Este valor fue obtenido de los ensayos de compresión isotropa en condiciones saturadas (Tabla 4.16, 4.21; Fig. 4.36, 4.54 y 4.55).

Puede observarse que la diferencia con los valores de los parámetros utilizados anteriormente no es muy significativa. Sin embargo, con estos nuevos parámetros se logra un mejor ajuste en las deformaciones. En la Fig. 6.98 se muestra la forma de la superficie de fluencia inicial para una tensión de compactación isotrópica de 0.6 MPa y una succión de 0.8 MPa, que se obtiene con cada uno de los tres conjuntos de parámetros utilizados en la tesis. Se observa que la forma de la superficie de fluencia es muy similar cuando se usan los parámetros para el análisis de los ensayos isotrópicos, triaxiales y con la simulación con el BBM. Sin embargo la forma adoptada para la superficie de fluencia empleando los parámetros a partir de los ensayos edométricos es diferente, indicando una mayor deformación de colapso cuando se disminuye la succión.

6.4.2 Reproducción de los resultados experimentales

En esta sección se comparan algunos resultados experimentales obtenidos de los ensayos de compresión triaxial (muestras normalmente consolidadas y sobreconsolidadas) con los resultados numéricos del modelo BBM empleando los parámetros de la Tabla 6.20. En la sección 6.3, se presenta el análisis de los resultados obtenidos, así como la forma y la posición adoptada de la superficie de fluencia (LC) durante los diferentes procesos previos al corte usando los parámetros de la Tabla 6.12. En la Tabla 6.21 se muestran los ensayos que han sido utilizados para reproducir su comportamiento por medio del modelo, así como las condiciones iniciales de las muestras.

En la Fig. 6.99 se muestra la comparación en términos de ε_v y p , entre la simulación con el modelo y los resultados experimentales de la trayectoria de *carga–descarga* isotrópica a succión constante del ensayo IS-OC-06 (A→B→C), tal como se muestra en la trayectoria de la Fig. 5.15. Se comprueba que la predicción realizada se ajusta muy bien a las medidas.

Tabla 6.21 Ensayos de laboratorio y sus condiciones iniciales.

Ensayo	Trayectoria tensional	Condiciones iniciales
IS – NC – 06	Fig. 5.12	$w_0 = 11.0 \pm 0.2 \%$, $s_0 = 0.8 \text{ MPa}$ $(\sigma_m - u_a)_0 = 0.6 \text{ MPa}$, $e_0 \approx 0.63$ $\gamma_s = 26.6 \text{ kN/m}^3$, $Sr_0 \approx 48 \%$ $\rho_{d0} \approx 1.67 \text{ g/cm}^3$
IS – OC – 06	Fig. 5.15	
IWS – OC – 01	Fig. 5.16	
IWS – OC – 87	Fig. 5.19	

En la Fig. 6.100 se presenta la curva experimental $\varepsilon_v : s$ correspondiente al ensayo de compresión triaxial IWS-OC-01, de la trayectoria de *humedecimiento–secado* (B→C→D) bajo tensión media neta constante, comparada con la curva obtenida por el modelo. Se observa que la predicción se ajusta adecuadamente a los resultados experimentales.

En el ensayo IWS–OC–87 se ha medido un hinchamiento elástico tras la aplicación de la elevada succión, que presentó unos valores muy grandes en la dirección radial. Dado que en el resto de los ensayos se ha observado un comportamiento deformacional isótropo, se ha optado por definir la deformación volumétrica sólo a partir de la deformación axial. Con estas hipótesis se observa que el modelo reproduce razonablemente el comportamiento volumétrico (Fig. 6.101), así como el comportamiento en la trayectoria de corte (Fig. 6.102).

En la Tabla 6.21 se indican las figuras que muestran las trayectorias tensionales seguidas en los cuatro ensayos que se presentan en la Fig. 6.102, donde se muestra la comparación de la predicción del modelo y los resultados experimentales de la *trayectoria de corte* en términos de q y ε_l . Se observa que para la muestra normalmente consolidada (IS–NC–06), el modelo reproduce adecuadamente una deformación gradual de las deformaciones plásticas desde el comienzo de la etapa de rotura. Las muestras sobreconsolidadas, que muestran una mayor rigidez inicialmente y después continúan con deformaciones de endurecimiento, también son adecuadamente simuladas.

En la Fig. 6.103 se muestran las curvas de los resultados experimentales en el plano $\varepsilon_v : \varepsilon_l$ comparadas con las curvas predichas con el modelo. Se han comparado las deformaciones volumétricas locales (ε_{vc}) y globales (ε_v) durante la etapa de corte, donde se ha observado una satisfactoria concordancia desde el punto de vista cualitativo. La predicción del comportamiento normalmente consolidado del ensayo IS–NC–06 presenta una notable respuesta contractante, la cual es menos importante para las muestras sobreconsolidadas. No obstante, el modelo no puede ajustar las medidas del comportamiento dilatante que se presentan al final de la etapa de rotura.

Finalmente en la Fig. 6.104 se presentan los cuatro ejemplos correspondientes a los ensayos mencionados en la Tabla 6.21, en términos de $\varepsilon_s : \varepsilon_l$ comparados con las curvas obtenidas por el modelo. Se ha reproducido satisfactoriamente la deformación de corte (ε_s) con respecto a la deformación axial (ε_l).

6.4.3 Comentarios finales

En general, la predicción de los resultados experimentales con el modelo (BBM) ha sido bastante precisa, empleando un conjunto único de parámetros (Tabla 6.20) que se obtuvo del programa experimental.

La comparación en las trayectorias de corte muestra una buena capacidad del modelo de reproducir el comportamiento de los resultados experimentales. En el caso de la muestra normalmente consolidada el modelo reproduce adecuadamente de forma gradual las deformaciones plásticas al comienzo de la etapa de rotura. La respuesta rígida antes de alcanzar la superficie de fluencia en las muestras sobreconsolidadas también se reproducen satisfactoriamente. Sin embargo, el punto de fluencia de la curva predicha por el modelo en el espacio $q : \varepsilon_l$ se presenta muy repentinamente, por lo que un futuro sería necesario proporcionar una transición más gradual.

Por otro lado, se puede decir que para estos ensayos dentro del comportamiento volumétrico en términos de $\varepsilon_v : s$ y $\varepsilon_v : \varepsilon_1$ y desde un punto de vista cualitativo, las predicciones obtenidas pueden considerarse correctas. Sin embargo, el modelo no puede ajustar las medidas del comportamiento dilatante que se presentan al final de la etapa de rotura. Por otro lado en el comportamiento volumétrico en el plano $\varepsilon_v : p$ se aprecia una buena concordancia tanto de forma cualitativa como cuantitativa. Igualmente, se muestra un adecuado acoplamiento entre las superficies de fluencia LC y SI. Esta última se activo a lo largo de la etapa de secado del ensayos IWS-OC-87.