



Departamento de Ingeniería del Terreno,
Cartográfica y Geofísica

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DEL
COMPORTAMIENTO HIDROMECAÁNICO DE
UNA ARCILLA COMPACTADA.

TESIS DOCTORAL

Presentada por:
Carlos Manuel Buenfil Berzunza

Directores de tesis:
Antonio Lloret Morancho
Antonio Gens Solé

Barcelona, Septiembre de 2007

6. RESULTADOS EXPERIMENTALES DE CONSOLIDACIÓN Y REDUCCIÓN DE SUCCIÓN.

6.1 Introducción.

Este capítulo contiene los resultados y análisis de los ensayos ejecutados durante la investigación. Los ensayos fueron realizados siguiendo el programa experimental descrito en el capítulo 5.

Los ensayos constan de varias etapas, mostradas en la Tabla 5.2. Para realizar una mejor descripción de los resultados, análisis y conclusiones del programa experimental, con base a los objetivos de la tesis, se han agrupado de la siguiente manera:

- Etapa de equilibrio.
- Etapas de compresión isótropa.
- Etapas de compresión anisótropa.
- Etapas de reducción cuasi-continua de succión matricial bajo condiciones de relación de tensión $q/(p-u_a)$ constante.
- Etapas de compresión triaxial drenada con succión constante.

En este capítulo se presentan y analizan los resultados de los primeros cuatro grupos descritos arriba. Los resultados de las etapas de compresión triaxial se presentan y analizan en el capítulo 7.

Cada uno de los grupos, anteriormente descritos, incluye los ensayos saturados y no saturados. En el caso de ensayos saturados, la etapa de saturación equivale a la etapa de equilibrio de los ensayos sobre muestras parcialmente saturadas, para alcanzar la succión matricial de cero.

Tal y como fue mencionado en el capítulo 5, el estado de tensiones del suelo parcialmente saturado quedará determinado mediante tres variables independientes: la tensión media neta, $p-u_a=(\sigma_a+2\sigma_r)/3-u_a$, la tensión de corte, $q=\sigma_a-\sigma_r$, y la succión matricial $s=u_a-u_w$, donde σ_a y σ_r son las tensiones principales axial total y radial total respectivamente. En el caso de ensayos triaxiales saturados la succión matricial es igual a cero, y el estado de tensiones quedará determinado

mediante la tensión media efectiva, $p' = p - u_w = (\sigma_a + 2\sigma_r)/3 - u_w$, y la tensión de corte, $q = \sigma_a - \sigma_r$. El estado de tensiones anisótropo se describe mediante la relación de tensión de corte entre tensión media neta, $\eta = q/(p - u_a)$. Sin embargo, en algunos casos se utiliza también, $K = (\sigma_r - u_a)/(\sigma_a - u_a)$.

Para la descripción del comportamiento mecánico del suelo, saturado y parcialmente saturado, se adoptaron el incremento de la deformación volumétrica, dada por $\delta\varepsilon_v = \delta\varepsilon_a + 2\delta\varepsilon_r$, y la deformación de corte, dada por $\delta\varepsilon_s = 2/3(\delta\varepsilon_a - \delta\varepsilon_r)$, donde $\delta\varepsilon_a$ y $\delta\varepsilon_r$ son los incrementos de deformación axial y radial respectivamente. Estas variables de deformación son convenientes debido a que se asocian con las variables de estado de tensión en pares de conjugadas de trabajo. Para suelos saturados, el par asociado al incremento de trabajo volumétrico son el incremento de la deformación volumétrica, $\delta\varepsilon_v = \delta\varepsilon_a + 2\delta\varepsilon_r$, y la tensión media efectiva, $p' = (\sigma'_a + 2\sigma'_r)/3 - u_w$, y el asociado al incremento de trabajo de distorsión, son la deformación de corte, $\delta\varepsilon_s = 2/3(\delta\varepsilon_a - \delta\varepsilon_r)$, y la tensión de corte, $q = \sigma_a - \sigma_r$. De esta forma estas variables separan los efectos volumétricos y de distorsión. Otra variable usada en esta tesis para representar los cambios volumétricos es el índice de poros, e .

La relación de agua, e_w , será utilizada en este trabajo para describir el comportamiento hidromecánico del suelo. La relación de agua (definida como la relación entre el volumen de agua al volumen de sólidos), $-de_w = -\delta V_w/V_s = -G_s dw$, es la variable asociada a la succión matricial de la misma manera que el índice de poros (e), como variable de estado volumétrica, es asociada con la tensión media neta ($p - u_a$). En la relación anterior, V_w es el volumen de agua, V_s es el volumen de sólidos, G_s es la densidad de sólidos y w es el contenido de agua gravimétrico. Esta variable de estado ha sido utilizada en diferentes contextos por diferentes autores trabajando en suelos no saturados: Toll (1995), Prashant et al. (1998). Una descripción más detallada sobre las variables de estado de tensión y deformación conjugadas de trabajo se ha presentado en el capítulo 2.

6.2 Etapa de equilibrio. Trayectorias de humedecimiento o secado en bajas cargas. Resultados y su interpretación.

6.2.1 Descripción de trayectorias de secado y mojado en bajas cargas.

Antes de que las muestras fueran consolidadas, bajo trayectorias de tensiones isótropas y anisótropas, se les aplicó la succión matricial requerida ($s=u_a-u_w$), bajo una tensión media neta ($p-u_a$) de 23 kPa y una tensión de corte (q) de 10 kPa. Esta fase de los ensayos es llamada etapa de equilibrio en esta tesis. Las succiones matriciales aplicadas son 10 kPa, 100 kPa, 200 kPa y 600 kPa. Las muestras fueron dejadas en estas condiciones el tiempo necesario para alcanzar el equilibrio. La trayectoria de tensiones en esta etapa consiste en humedecimiento o secado de la muestra desde condiciones vírgenes de tensión media neta ($p-u_a$) y succión matricial ($s=u_a-u_w$) muy cercana a la succión de final de compactación. Las trayectorias de tensiones seguidas durante ésta etapa de equilibrio se muestran en la Figura 5.7 y Figura 6.1. La etapa de la aplicación de sobrepresión de aire es representada por el segmento O-A, y la etapa de equilibrio es representada por el segmento A-B.

La etapa de la aplicación de sobrepresión corresponde a la aplicación de la presión de aire de poros del espécimen (u_a) y a una trayectoria de tensiones ($p-u_a$ y q) en condiciones no drenadas de la fase líquida, con el fin realizar las etapas posteriores bajo una presión de aire de poros (u_a) constante, diferente de cero. La etapa se inicia tan pronto finaliza el montaje de la muestra; y los incrementos de la presión de aire (u_a) y presión de confinamiento, σ_r (igual a la tensión radial), se realizan por etapas manteniendo una diferencia de presión media neta ($p-u_a$) menor a 10 kPa. Debido a los pequeños cambios que se generan en el espécimen durante la etapa de sobrepresión de aire, mostrados en la Figura 5.6, sus efectos pueden ser considerados despreciables (deformación axial $\epsilon_a < 0.08\%$ y deformación radial $\epsilon_r < 0.06\%$, aunque debido a las afectaciones que causa el acomodo inicial del equipo y de la membrana, se presenta cierta incertidumbre en las medidas de desplazamiento en el tramo inicial de la etapa). En el capítulo 3 se describen las calibraciones efectuadas para evaluar las afectaciones por acomodo inicial del equipo y membranas.

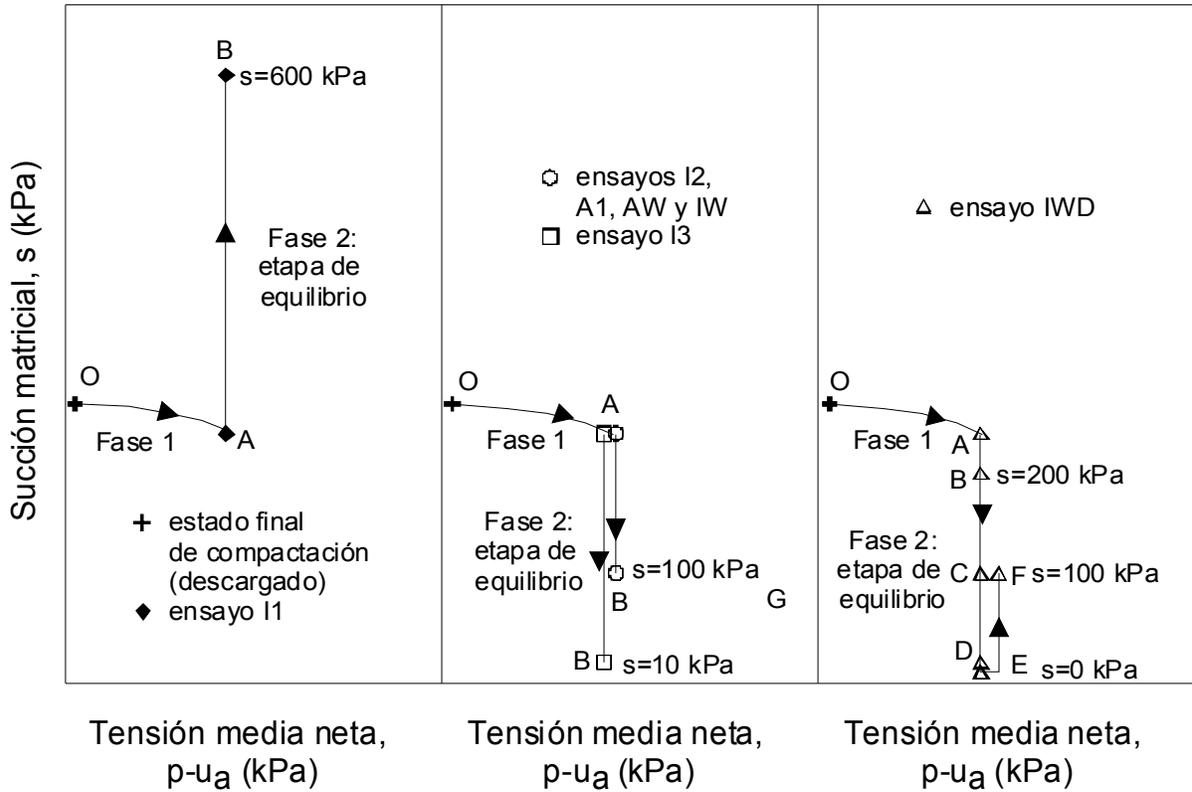


Figura 6.1 Esquema, sin escala, de las trayectorias de humedecimiento o secado de la muestra desde su estado final de compactación, realizadas en los ensayos I1, I2, I3, A1, AW, IW e IWD. La fase 1 corresponde a la aplicación de la técnica de sobrepresión de aire (traslación de ejes) en condiciones no drenadas hasta conseguir una tensión neta $p-u_a$ de 23 kPa.

6.2.2 Cambios de relación de agua durante las trayectorias de secado y mojado.

En la Tabla 6.1 se presentan las condiciones iniciales y finales en la etapa de equilibrio en los ensayos no saturados. La Figura 6.2 muestra la evolución con el tiempo de los cambios del índice de poros, relación de agua y grado de saturación durante las etapas de equilibrio. Debido a los pequeños cambios registrados cuando la succión matricial aplicada durante la etapa de equilibrio fue de 100 kPa, se presentan en la Figura 6.3 los resultados amplificados de los ensayos I2, A1, AW e IW. La etapa se da por finalizada cuando el contenido de agua y las deformaciones en el espécimen llegan a estabilizarse. Los períodos de equilibrio, normalmente, duraron entre 2 y 4 días (véase Tabla 5.2), pero se presentó un período muy largo de, aproximadamente, 10.5 días cuando se aplicó una succión matricial de 10 kPa.

La Tabla 6.1 y Tabla 6.2 muestran los valores de índice de poros (e), relación de agua (e_w) y grado de saturación (S_r) obtenidos al final del proceso de compactación, con sus correspondientes valores registrados al final de la etapa de equilibrio (o etapa de saturación, en su caso). Al final del proceso de compactación el índice de poros promedio fue de aproximadamente de 0.828 con variación máxima de ± 0.008 , la relación de agua de 0.325 con variación máxima de ± 0.006 (contenido de agua gravimétrico de 12.00 % con variación de $\pm 0.23\%$) y el grado de saturación de 39.3% con una variación de $\pm 0.8\%$. Los valores son muy repetibles y consistentes, presentando pequeñas variaciones, que proporcionan evidencia de la uniformidad del suelo usado, de la repetibilidad del procedimiento de preparación de la muestra y de la precisión resultante en la técnica e instrumentos usados en la medición. Por lo anterior, se asume que la fábrica de suelo obtenida es repetible, y por lo tanto los resultados presentados en el capítulo 4 (curvas de retención y porosimetrías del suelo), sobre muestras similares a las usadas en el programa de investigación, pueden ser relacionadas con los resultados de éste programa experimental. Es posible asumir, también, que la succión al final de la compactación para todas las muestras es cercana a 270 kPa. Esta succión se midió en una sola muestra usando un tensiómetro de alto rango, empleado por Ridley y Burland (1993) (aunque, como se verá posteriormente, esto puede no ser del todo exacto debido a que pequeños cambios de humedad pueden producir variaciones importantes de succión en algunos intervalos de contenidos de agua).

Durante la etapa de equilibrio, en los ensayos I2 e I3, donde se aplicaron succiones matriciales de 100 kPa y 10 kPa el agua fluye al interior de la muestra, generando el incremento de la cantidad de agua (relación de agua, e_w); mientras que en los ensayos I1 e IWD, con succiones matriciales de 600 kPa y 200 kPa respectivamente, el agua sale de la muestra produciendo la reducción de la relación de agua, e_w (Tabla 6.1, Figura 6.2 y Figura 6.3). El fenómeno anterior (de mojado de la muestra con succión matricial de 10 kPa y 100 kPa, y secado con succión matricial de 200 kPa y 600 kPa) sugiere que la succión matricial presente al inicio de la etapa de equilibrio estuvo entre 100 kPa y 200 kPa. Adicionalmente, cuando la succión matricial aplicada fue de 100 kPa se observaron muy pequeños cambios en la relación de agua (Figura 6.2 y Figura 6.3), indicando su cercanía a la succión matricial inicial en la etapa de equilibrio.

Tabla 6.1 Condiciones iniciales y finales en la etapa de equilibrio en los ensayos no saturados.

Ensayo	condiciones iniciales					final de etapa de equilibrio				
	e_0	e_{0w} ($w_0, \%$)	Sr_0 (%)	$p-u_a$ kPa	u_a-u_w kPa	e	e_w ($w, \%$)	Sr (%)	u_a-u_w kPa	ε_v (%)
I1	0.832	0.321 (11.8)	38.7	23	270*	0.816	0.288 (10.6)	35.4	600	0.837
I2	0.829	0.323 (11.9)	38.9	23	270*	0.834	0.324 (12.0)	40.0	100	-0.300
I3	0.824	0.324 (12.0)	39.3	23	270*	0.830	0.392 (14.5)	47.2	10	-0.338
A1	0.824	0.331 (12.2)	40.1	23	270*	0.824	0.331 (12.2)	40.1	100	0.012
AW	0.828	0.326 (12.0)	39.4	23	270*	0.834	0.334 (12.3)	40.0	100	-0.308
IW	0.826	0.319 (11.8)	39.7	23	270*	0.827	0.329 (12.1)	40.2	100	-0.108
IWD	0.828	0.324 (12.0)	39.1	23	270*	0.822	0.314 (11.6)	38.3	200	0.333

* Succión obtenida sobre el espécimen compactado, usando un tensiómetro de alto rango (empleado por Ridley y Burland, 1993).

Tabla 6.2 Condiciones iniciales y finales en la etapa de saturación en los ensayos saturados.

Ensayo	condiciones iniciales				final de etapa de saturación			
	e_0	e_{0w} ($w_0, \%$)	Sr_0 (%)	u_a-u_w kPa	e	e_w ($w, \%$)	$p-u_w$ kPa	ε_v (%) (Δe)
SI1	0.831	0.325 (12.0)	39.1	270*	0.841	0.841 (31.0)	9	-0.546 (0.012)
SI2	0.836	0.328 (12.1)	39.2	270*	0.746	0.746 (27.5)	21	4.902 (-0.108)
SI3	0.829	0.328 (12.1)	39.6	270*	0.739	0.739 (27.3)	21	4.921 (-0.109)
SA	0.831	0.328 (12.1)	39.5	270*	0.761	0.761 (28.1)	21	3.823 (-0.084)
SM1	0.827	0.328 (12.1)	39.7	270*	0.797	0.797 (29.4)	21	1.642 (-0.036)
SM2	0.823	0.322 (11.9)	39.1	270*	0.763	0.763 (28.2)	21	3.291 (-0.073)

* Succión de obtenida sobre el espécimen compactado, usando un tensiómetro de alto rango (empleado por Ridley y Burland, 1993).

Sin embargo, se esperaba que la muestra siguiera una trayectoria de mojado al aplicarse la succión de 200 kPa durante la etapa de equilibrio (véase tramo A-B del ensayo IWD en la Figura 6.1), debido a que la succión obtenida sobre el espécimen compactado fue de 270 kPa. Esta discrepancia podría ser causada por las pequeñas deformaciones causadas durante la etapa de sobrepresión (con condiciones no drenadas de flujo de agua) que generan un pequeño incremento en el grado de saturación de la muestra y las pequeñas dispersiones en los valores de la relación de agua de la muestra que se presentan al final del proceso de compactación. Tal como se observa en la Figura 6.4 un pequeño cambio en el grado de saturación es capaz de cambiar la succión matricial debido a la pendiente que presenta la curva de retención de la muestra entre 100 kPa y 600 kPa (pendiente $dS_r/ds = -0.00016 \text{ kPa}^{-1}$); la pequeña dispersión de la relación de agua obtenida al final del proceso de compactación (de ± 0.006), podría causar una variación de ± 60 kPa (con un rango total de 120 kPa) dentro del intervalo de succión matricial de 100 a 600 kPa. Una más amplia descripción de la Figura 6.4 se presentará posteriormente.

En la Tabla 6.1 y Figura 6.3 se observa que, a pesar de ser pequeños, los cambios registrados en las etapas de equilibrio con una succión matricial de 100 kPa, son muy consistentes, presentando pequeños incrementos en la relación de agua, a excepción del ensayo A1 que no presenta cambios apreciables durante la aplicación de esta succión. En el final de la etapa de equilibrio el índice de poros fue de aproximadamente de 0.830 con variación máxima de ± 0.006 , la relación de agua de 0.330 con variación máxima de ± 0.006 (contenido de agua gravimétrico de 12.16 % con variación de $\pm 0.20\%$) y el grado de saturación de 40.1% con una variación de $\pm 0.1\%$. Aún con la discrepancia observada en el ensayo A1, los resultados en la relación de agua (e_w) al final de la etapa de equilibrio con succión matricial de 100 kPa son muy repetibles y consistentes. Esto proporciona la confianza en que tanto la técnica de preparación de la muestra y la fábrica de suelo obtenida como las técnicas de ensayo y de medida fueron repetibles.

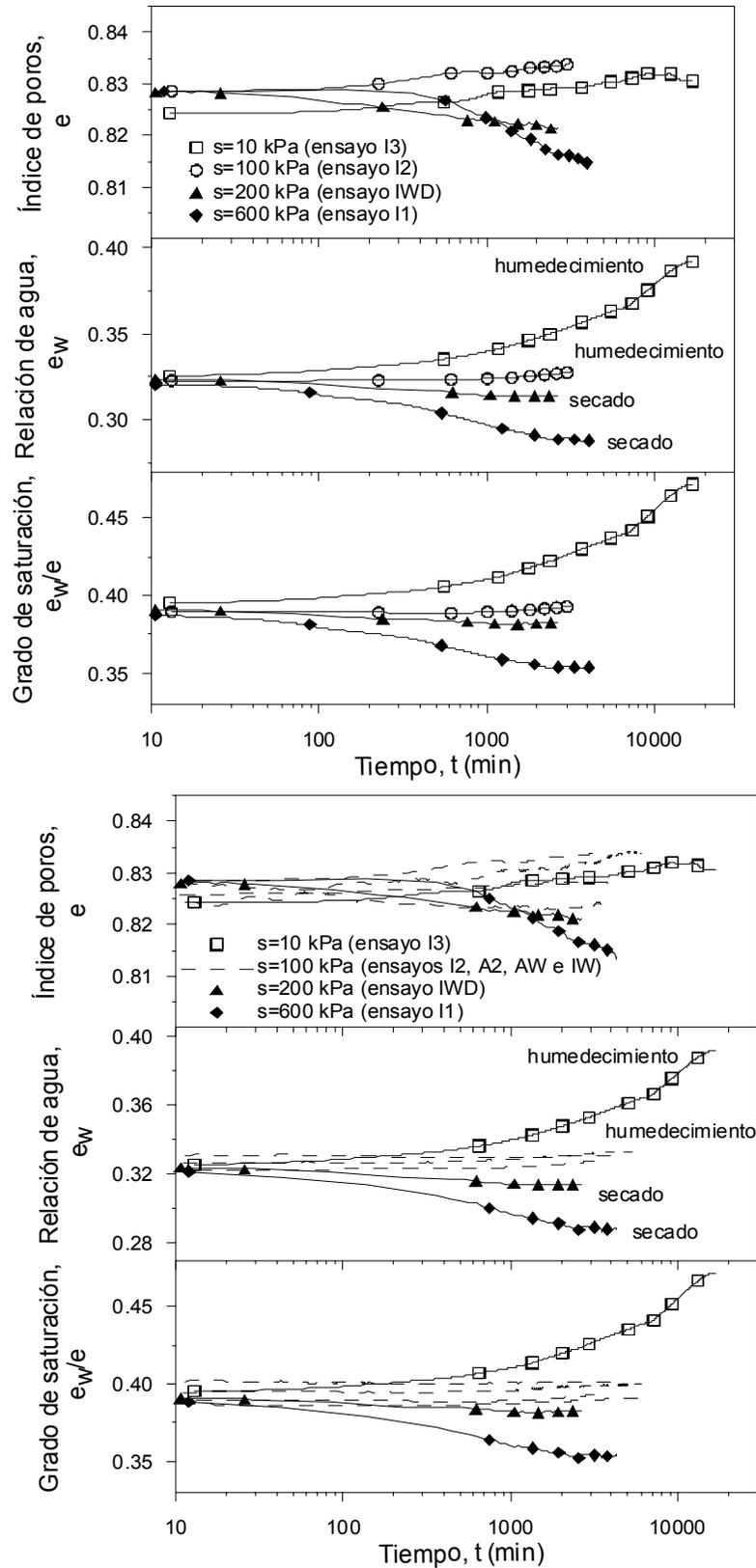


Figura 6.2 Evolución del índice de poros, relación de agua y grado de saturación durante las etapas de equilibrio.

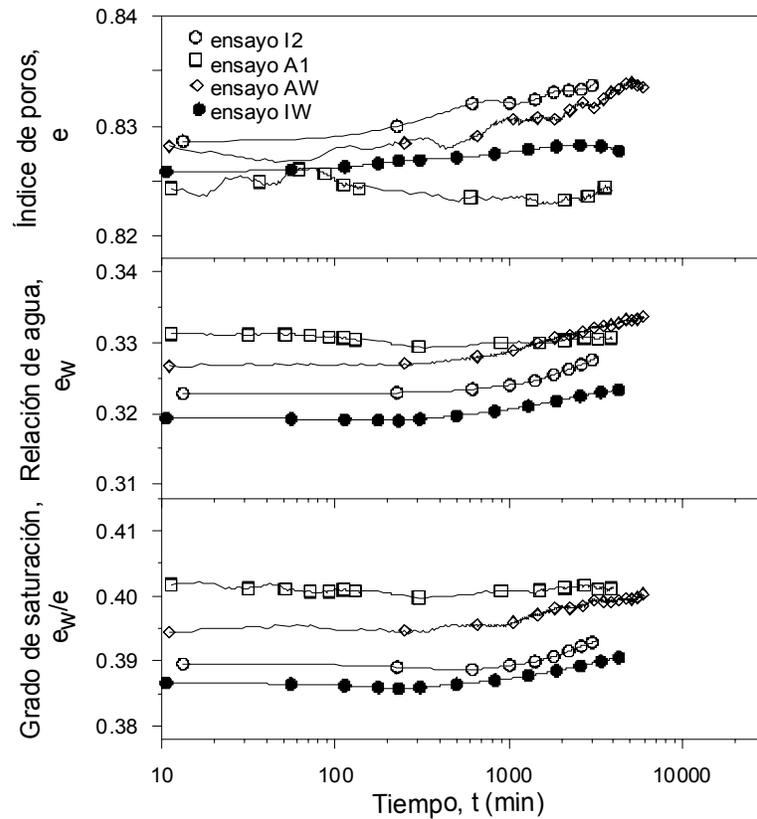


Figura 6.3 Etapas de equilibrio de la aplicación de succión matricial $s=100$ kPa, en los ensayos I2, A1, AW e IW. Gráfica ampliada de la evolución del índice de poros, relación de agua y grado de saturación.

En la Tabla 6.2 se presentan las condiciones iniciales y finales en la etapa de saturación realizada en los ensayos convencionales saturados (mediante la célula triaxial convencional con controladores GDS instrument Ltd). La etapa de saturación es análoga a la etapa de equilibrio efectuada en los ensayos sobre muestras parcialmente saturadas. En estas pruebas donde la succión aplicada fue cero ($s=0$), fue difícil estimar con precisión el volumen real de agua que entró en la muestra hasta saturarla debido a que una gran cantidad de agua fluyó a través de ella, saliendo por la línea de drenaje (por encima de la muestra) a presión atmosférica (u_{w2}). Sin embargo, es de esperar que el grado de saturación sea del 100% al final de la etapa de saturación. Los valores del coeficiente B de Skempton obtenidos (cerca de 0.92) garantizaron la correcta saturación de la muestra antes de efectuar la etapa de consolidación pero no garantizan totalmente que la saturación total de la muestra se alcanzara al finalizar la etapa de saturación por flujo de agua libre. Sin embargo, se ha supuesto que el grado de saturación fue del 100% al final de la saturación por flujo de agua libre. Por lo tanto, la cantidad de agua que entra a la muestra, para

alcanzar la saturación total, se ha estimado en base a esta suposición y con los datos de índice de poros al finalizar la saturación. La relación usada fue $e=wG_s$ (válida solamente para condiciones saturadas de la muestra), donde e es el índice de poros, w es la humedad gravimétrica y G_s es densidad específica de sólidos (igual a 2.71 para el suelo usado). El índice de poros al finalizar la saturación fue estimado a partir del índice de poros calculado al finalizar el ensayo restándole los cambios de volumen registrados en las etapas de consolidación y compresión triaxial.

En la Figura 6.4 se presentan los resultados finales de la etapa de equilibrio, de los ensayos I1, I2, I3 y IWD, graficados con la succión matricial, y los resultados finales de la etapa de saturación ($s=0$) de los ensayos realizados en la célula triaxial convencional. Adicionalmente, se han agregado los datos de la curva de retención de $s=10$ kPa a 0 kPa, en humedecimiento a partir del estado final de compactación, obtenida del ensayo edométrico con succión controlada EDO1 (presentado en el capítulo 4); y el valor del estado final de compactación en el espacio e_w-s y $e_w/e-s$. Para complementar el análisis de resultados relacionados con trayectorias de mojado y secado de la muestra, bajo pequeñas tensiones, se presentan también los resultados finales de los tramos B-C, C-D y D-E del ensayo IWD (Tabla 6.3 y Figura 6.4). La succión matricial se presenta en escala logarítmica para poder observar con mayor claridad los resultados obtenidos tanto en sus valores más grandes como en los más pequeños.

Tabla 6.3 Condiciones iniciales y finales en las etapas de cambio de mojado, después de la etapa de equilibrio (aplicación de 200 kPa) en el ensayos no saturados IWD.

Ensayo	condiciones iniciales de cada etapa					final de cada etapa				
	e	e_w ($w_0, \%$)	Sr (%)	$p-u_a$ kPa	$s=u_a-u_w$ kPa	e	e_w ($w, \%$)	Sr (%)	$s=u_a-u_w$ kPa	$\varepsilon_v (\%)*$
IWD	0.822	0.320 (11.8)	38.3	23	200	0.822	0.326 (12.0)	39.8	100	0.333
IWD	0.822	0.326 (12.0)	39.8	23	100	0.822	0.405 (14.9)	49.4	10	0.333
IWD	0.822	0.405 (14.9)	49.4	23	10	0.725	0.725 (26.8)	100	0	5.579

*deformación volumétrica estimada a partir de la condición inicial de la etapa de equilibrio (cambios volumétricos con base a e_0 , e_{0w} y Sr_0 en $s=270$ kPa.

La gráfica relación de agua- succión matricial ($e_w-\log s$) de la Figura 6.4 representa curvas de retención (en aproximadamente volumen constante, con excepción de los colapsos generados con $s=0$) obtenidas de trayectorias de secado y de mojado a partir de condiciones cercanas de final de compactación ($e_w = 0.324$, $w=12\%$). Al representar los valores de succión matricial aplicados se

utiliza la expresión $s+1$ (agregando un kPa a los valores), para evitar dificultades en la representación $s=0$ cuando se ha utilizado la escala logarítmica. Como se esperaba, la cantidad de agua (relación de agua ó contenido de agua) dentro de la muestra fue mayor a medida que la succión matricial es más baja. Sin embargo, una reducción de succión desde las condiciones de final de compactación ($w=12\%$) hasta una succión de $s=10$ kPa causa únicamente pequeños incrementos de contenido de agua, con una variación lineal con el logaritmo de la succión, antes sufrir un brusco aumento de contenido de agua cuando es aplicada la succión de $s=5$ kPa. La variación lineal se observa tanto en los ensayos triaxiales como en el ensayo EDO1 (presentado en el capítulo 4), donde se usó la técnica de traslación de ejes. Por lo tanto, puede decirse que, al aplicarse la trayectoria de mojado los cambios de humedad (y también del grado de saturación) ocurren principalmente en las succiones más bajas y los cambios son muy pequeños en las succiones más altas.

Similar comportamiento ha sido observado por diversos investigadores (usando medidas de cambio de humedad o grado de saturación) en suelos compactados a muy baja densidad, como por ejemplo Sivakumar et. al. (2006) (usando muestras con volumen específico inicial que varían entre $v=2.201$ y 1.95 , y grado de saturación entre 53.8% y 67.0%); Sun et al. (2004) (con muestras con índice de poros inicial de $e=1.2$ y grado de saturación de 50%); Delage et al. (1992), sobre un limo eolítico de baja plasticidad. El comportamiento anterior, también, se presenta en Rampino et al. (2000) en muestras compactadas de densidad mayor y más alto grado de saturación inicial (volumen específico inicial de $v=1.341$ y grado de saturación de 75%), el grado de saturación de las muestras tan solo cambió entre 75% y 78% para un rango de 100 a 800 kPa (sin presentarse colapsos).

El comportamiento anterior podría sugerirnos que en el mojado inicial, de las muestras ensayadas en esta investigación, la trayectoria siguió una “scanning curve” antes de alcanzar las curvas de mojado principal, debido a que presentan una típica característica del efecto de histéresis de las curvas de retención antes de sufrir un brusco aumento de contenido de agua cuando es aplicada la succión de $s=5$ kPa. Pero, también, podría ser debido a que los resultados de la trayectoria de mojado de $s=10$ kPa a 0 kPa, que muestran la variación brusca en la curva de retención, fueron obtenidos en el ensayo EDO1 usando la técnica de columna negativa de agua, lo que podría

revelar la existencia de algún problema para que el agua fluya al interior de la muestra durante trayectorias de mojado usando la técnica de traslación de ejes. Este problema podría deberse a la falta de continuidad del agua en los poros de la muestra o en el contacto entre la muestra y la piedra porosa. Sin embargo, en la trayectoria de mojado del ensayo EDO 2 (similar al efectuado en EDO1 pero usando una muestra con densidad más alta, la transición ocurre durante la aplicación de la traslación de ejes (de $s=50$ kPa a $s=20$ kPa), antes del cambio de técnica.

El tramo lineal de la curva de retención entre $s=10$ (mojado de la muestra) y 600 kPa (secado de la muestra), que se observa en el plano (e_w - $\log s$) tiene una pendiente $de_w/d(\ln s)$ cercana a -0.029 (usando la succión matricial en logaritmo natural). Por otra parte, análogamente entre $s=1$ y 10 kPa, esta pendiente pasa a ser del orden de -0.134. Sugiriendo, así, que la curva “scanning” se sigue entre 10 y 600 kPa. Por otra parte, la pendiente $\kappa_{ws} = \Delta e_w / \Delta s = -0.0001 \text{ kPa}^{-1}$ entre $s=100$ y 600 kPa sugiere la existencia de cambios muy significativos de succión ante pequeños cambios relación de agua (e_w) en puntos muy cercanos al estado final del proceso de compactación. Por lo tanto, se puede inferir que la pequeña dispersión de la relación de agua obtenida al final del proceso de compactación (de ± 0.006), cause una variación de la succión matricial de ± 60 kPa (con un rango total de 120 kPa). Este efecto podría ser una de las causas por la cual se observó el secado de la muestra durante la etapa de equilibrio con succión de 200 kPa cuando se esperaba la salida de agua (basado en la succión de 270 kPa medida al final del proceso de compactación, en una sola muestra).

En la Figura 6.4 también, se muestra una línea que divide la zona de succión gobernada por poros intra-agregados de la gobernada por poros inter-agregados, sugerida en capítulo 4 y obtenida con base a la curva de retención estimada de los datos de pruebas de Porosimetría por Intrusión de Mercurio PIM (descrita en el capítulo 4). La succión delimitante puede ser situada en unos 340 kPa. En las regiones correspondientes a las zonas de poros intra-agregados el contenido de agua no es afectado por efectos mecánicos (cambios del índice de poros o de densidad seca) y en las regiones de los poros inter-agregados (correspondientes a agua libre) el agua es sensible a las acciones mecánicas, Romero y Vaunat (2000). Con base a lo anterior, se observa que sólo en el ensayo I1, donde se aplicó una succión de 600 kPa, la muestra al final de la etapa de equilibrio se encuentra en la zona de succión gobernada por poros intra-agregados.

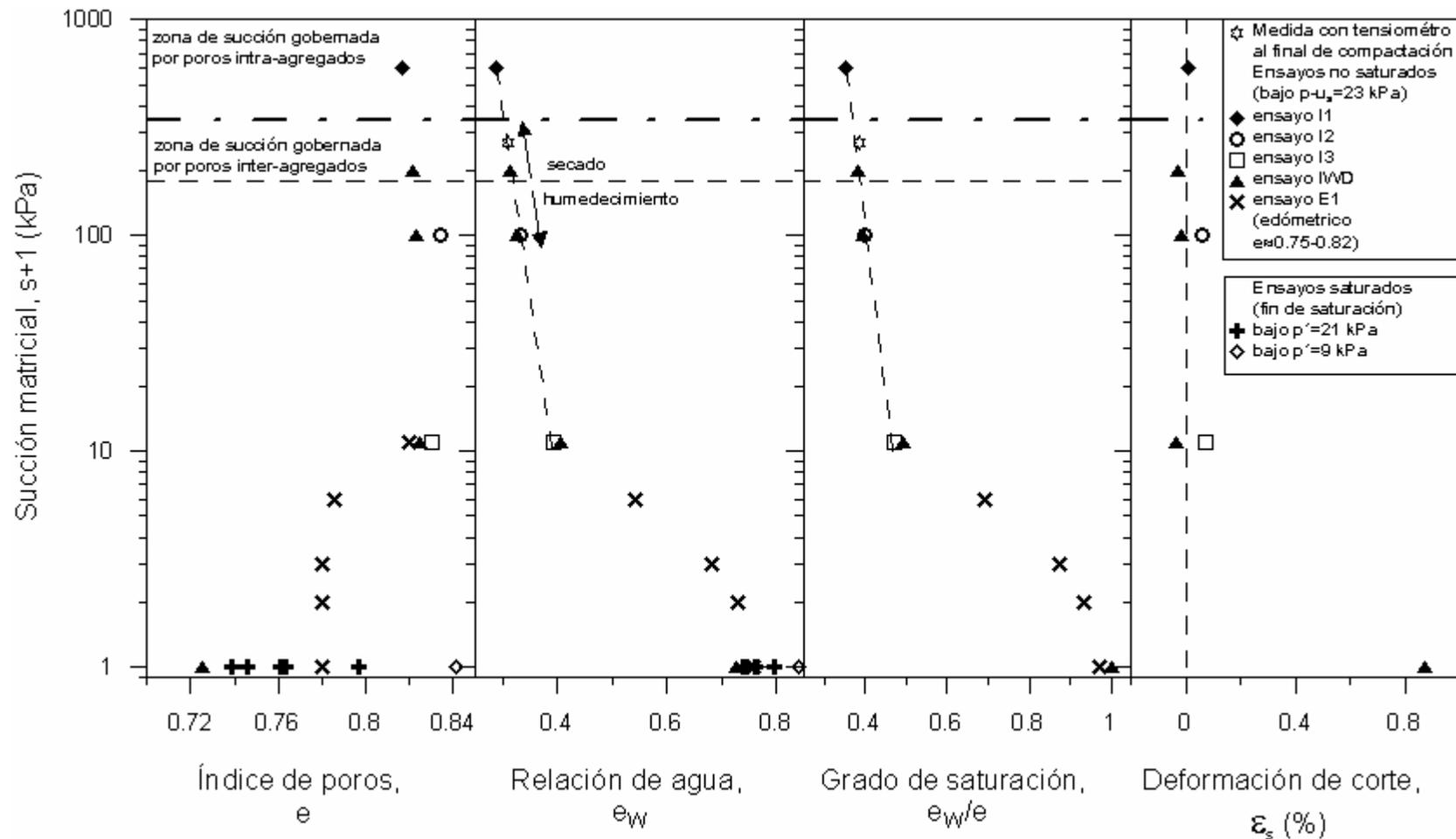


Figura 6.4 Valores finales de parámetros mecánicos e hidráulicos graficados con la succión matricial, en la etapa de equilibrio de los ensayos I1, I2, I3 y IWD. Curva de retención, de $s=10$ kPa a 0 kPa, en humedecimiento a partir del estado final de compactación obtenida del ensayo EDO1. Valor del estado final de compactación en el espacio e_w - $\log s$ y e_w/e - $\log s$. Y resultados de los ensayos saturados al final de la etapa de saturación.

6.2.3 Cambios de deformación volumétrica durante las trayectorias de secado y mojado.

La Figura 6.2 muestra la evolución con el tiempo de los cambios del índice de poros durante las etapas de equilibrio, realizados en succiones matriciales de 10, 100 y 600 kPa. En la Figura 6.3 se presentan los resultados amplificados de los ensayos I2, A1, AW e IW, con el fin de observar con mayor detalle los pequeños cambios registrados cuando la succión matricial aplicada fue de 100 kPa. Estas etapas fueron realizadas bajo una tensión media neta, $p-u_a$, de 23 kPa y tensión de corte, q , de 10 kPa. En la Tabla 6.1 se presentan las condiciones iniciales y finales del índice de poros en la etapa de equilibrio en los ensayos no saturados; y en la Tabla 6.2 se muestran las condiciones iniciales y finales del índice de poros en la etapa de saturación en los ensayos saturados. Los cambios de volumen son descritos en deformación volumétrica (ε_v) o en índice de poros (e), en ésta sección.

Se ha observado pequeños hinchamientos en las trayectorias de mojado (donde entró agua en la muestra) con succiones matriciales aplicadas de 10 y 100 kPa (Figura 6.2, Figura 6.3 y Figura 6.4). La magnitud de los hinchamientos son muy similares, aunque es ligeramente mayor para succión matricial de 10 kPa (con $s=10$ kPa de $\varepsilon_v=-0.338\%$, y con $s=100$ kPa el valor más alto fue de $\varepsilon_v=-0.330\%$). Sin embargo, se observaron pequeños colapsos (deformación irreversible de compresión) cuando se aplicó una succión matricial por debajo de 10 kPa (véase Figura 6.4 y Figura 6.6). Esta deformación de colapso resultó máxima en la trayectoria de mojado hasta 0 kPa, realizada en el ensayo IWD (véase tramo D-E en la Figura 6.1), donde se saturó la muestra mediante una carga hidráulica de agua de 70 cm, con la presión de aire igual a la atmosférica, sin usar el procedimiento de traslación de ejes. En la Figura 6.4, se presentan también las deformaciones de colapso observadas en la trayectoria de mojado del ensayo edométrico EDO1 (realizado para obtener la curva de retención de la muestra con similar densidad que la usada en los ensayos triaxiales, véase capítulo 4). En el caso de los ensayos saturados, las muestras experimentaron deformaciones de colapso durante las etapas de saturación bajo tensión media efectiva de 25 kPa, pero se experimentó un hinchamiento bajo una tensión media efectiva de 9 kPa ($\varepsilon_v=-0.546\%$ en el ensayo SI1, véase Tabla 6.2 y Figura 6.4).

El comportamiento observado durante la etapa de equilibrio (y la etapa de saturación) puede ser explicado por medio de la curva de fluencia LC (loading-collapse) propuesta por Alonso et al. (1990). La Figura 6.5 muestra un esquema la posición inicial de la curva de fluencia LC1 correspondiente al estado final de compactación de la muestra, las trayectorias de tensiones seguidas durante la etapa de equilibrio y el estado de tensiones final en la etapa de saturación. La LC1 es obtenida a partir de las tensiones media neta de fluencia a distintas succiones matriciales, $p_0(s)$, determinadas en trayectorias de tensión isotrópica bajo succión matricial controlada, cuyos resultados son presentados en la sección 6.3. Las trayectorias A-B1, A-B2, A-B3 y A-B4 se siguieron durante la etapa de equilibrio en los ensayos I1, I2, I3 e IWD respectivamente. El punto C4 corresponde al estado final de saturación de la muestra bajo $p'=20-25$ kPa, en el ensayo IWD (trayectoria B3-C4, desde succión matricial de 10 a 0 kPa), y en los ensayos saturados SI2, S3, SA, SM1 y SM2 (desde una succión cercana a 270 kPa a 0 kPa). También, se indica el punto B' correspondiente al estado final de saturación de la muestra cuando se realizó la saturación bajo $p'=9$ kPa. La reducción de succión matricial causa pequeñas deformaciones de hinchamiento (reversibles) cuando la trayectoria permanece dentro de la región elástica mientras que se desarrollan deformaciones de colapso cuando se alcanza la curva de fluencia. En la Figura 6.5 se sugiere que la curva de fluencia LC1, generada por el proceso de compactación, pasa entre los puntos B3 y C4. Por lo tanto, los puntos B2, B3 y B' están dentro de la región elástica debido a que no se producen colapsos en las etapas de equilibrio con 10 y 100 kPa, ni en la etapa de saturación bajo $p'=9$ kPa. El punto C4 se encuentra fuera de la región elástica inicial, debido a que la muestra experimenta deformaciones de colapso (irreversibles) cuando se alcanza una succión matricial de 0 kPa. Este colapso genera el movimiento de la curva de fluencia LC hasta C4 y un endurecimiento de la muestra. La forma de la curva de fluencia se describe con más detalle en el apartado 6.3.

En el ensayo IWD, tras la saturación bajo una tensión media neta, $p-u_a$, de 20 kPa (± 2 kPa) y tensión de corte, q , de 10 kPa (± 5 kPa) el colapso fue $\varepsilon_v=5.579$ %. En la trayectoria de mojado del ensayo edométrico EDO1, por debajo de $s=10$ kPa, se produjeron menores colapsos (con un valor máximo de $\varepsilon_v=2.255$ %), bajo una tensión vertical neta constante (σ_v-u_a) de 20 kPa (que considerando un coeficiente de empuje al reposo $K_0=0.49$, corresponde a una tensión media neta de $(p-u_a)$ de 13 kPa y a una tensión de corte, q , de 10 kPa). La obtención de colapsos más

pequeños en el ensayo edométrico EDO1 es consistente debido a su menor carga durante el humedecimiento. El valor del coeficiente de empuje al reposo, K_0 , se obtuvo en el ensayo de compactación estática realizada en un edómetro con medida de tensión lateral, descrito en detalle en el apartado 3.4.2. En los ensayos saturados, durante la etapa de saturación bajo tensión media efectiva de 25 kPa y tensión de corte de 5 kPa, se presentaron deformaciones colapsos entre $\varepsilon_v=3.291\%$ y 4.921% (con excepción del ensayo SMI donde se obtuvo, $\varepsilon_v=1.642\%$). La dispersión observada, podría ser debida, principalmente, a problemas de control en el desviador debido a baja sensibilidad de la célula de carga que origina cambios en el desviador de ± 5 kPa y en la tensión media efectiva (p') de aproximadamente ± 2 kPa. Aunque tales cambios son pequeños, pueden producir variaciones de volumen no despreciables, dado el bajo valor de la presión de confinamiento aplicada.

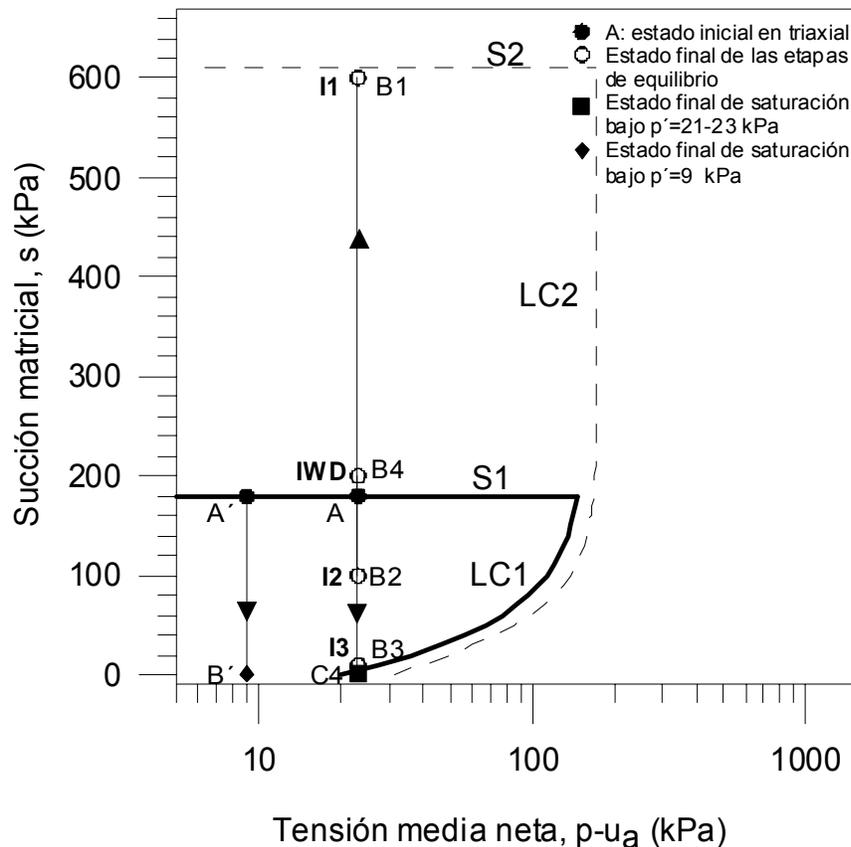


Figura 6.5 Esquema de curvas fluencia y trayectorias seguidas durante la etapas de equilibrio, y estado final de la etapas de saturación total de la muestra.

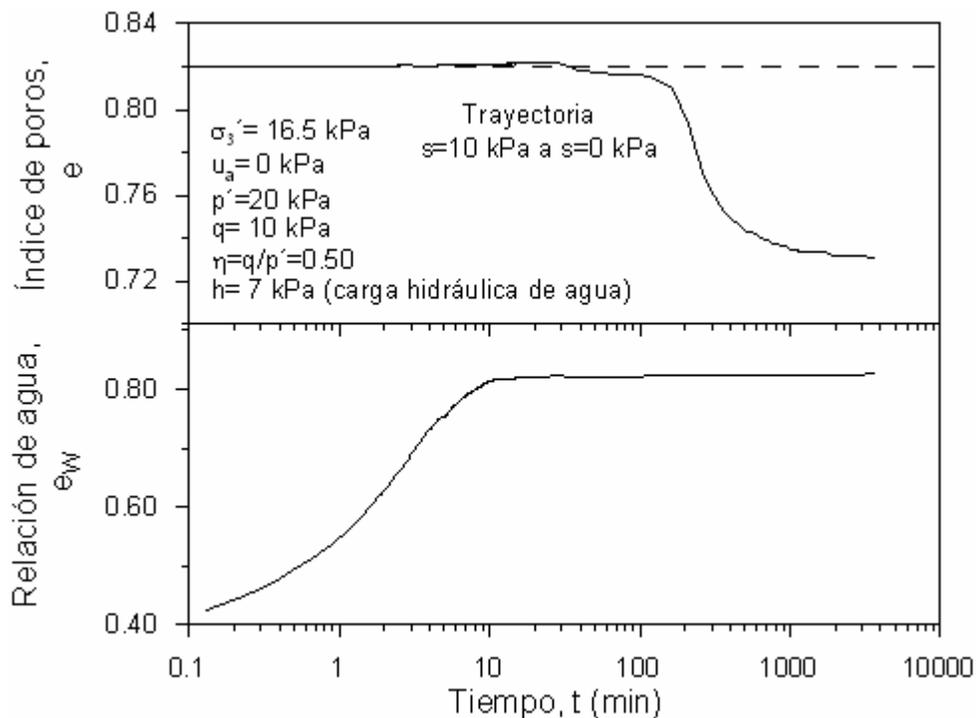


Figura 6.6 Evolución del índice de poros y relación de agua durante cambio de succión de 10 a 0 kPa, etapa D-E, en el ensayo IWD. La saturación se efectuó con una carga hidráulica de agua, de 70 cm.

En los ensayos realizados en la célula triaxial convencional, existe una dificultad para estimar con precisión los cambios volumétricos resultantes al final de la etapa de saturación por flujo de agua. En la etapa de saturación por flujo de agua, el cambio de volumen de agua medido mediante el controlador no corresponde al cambio de volumen de la muestra (al estar el suelo no saturado y por atravesar la muestra este flujo de agua). Por lo tanto, el índice de poros al final de la saturación por etapas se ha estimado a partir del índice de poros calculado al final del ensayo (con la relación $e = wG_s$), al cual se le restan los cambios de volumen medidos al final de las etapas de consolidación y de corte.

En la etapa D-E (cambio de succión de 10 kPa a 0) del ensayo IWD, se saturó la muestra mediante una carga hidráulica de agua de 70 cm y con la presión de aire igual a la atmosférica (sin usar el procedimiento de traslación de ejes). La evolución con el tiempo del índice de poros y relación de agua durante esta etapa se muestra en la Figura 6.6. En esta figura se observa que el tiempo en que se alcanza la saturación total la muestra no coincide con el tiempo en que se presenta el colapso. Esta anomalía podría ser generada por el hecho de que la entrada de agua en la muestra se realiza a través de una estrecha piedra porosa anular de alta permeabilidad que

rodea a la piedra porosa de alto valor de entrada de aire. Esta geometría puede conducir a que la saturación de la muestra no sea uniforme en una sección horizontal de la misma. Incluso puede darse el caso de que el agua empiece a salir por la piedra de la cara opuesta mucho antes de que la muestra esté totalmente saturada. Este hecho y la dificultad de separar el agua que se queda en la muestra y el agua que llena las conducciones hacen que la evolución del contenido de agua mostrado en la Figura 6.6, presente incertidumbres importantes. En cualquier caso, parece que a los 10 minutos la humedad ya es casi constante y la deformación casi no ha empezado.

Durante las trayectorias de secado para alcanzar las succiones matriciales de 200 y 600 kPa (véase puntos B4 y B1 en la Figura 6.5), el suelo experimentó contracciones (irreversibles) de $\varepsilon_v=0.333\%$ y 0.837% , respectivamente (véase la Figura 6.2). Las deformaciones de contracción por secado observadas fueron asociadas con el desplazamiento de la curva de fluencia SI (por incremento de succión), propuesta por Alonso et al. (1990). El endurecimiento de la muestra inducido por el proceso de secado, que incrementa su región elástica, también, se manifiesta por una nueva posición de la curva de fluencia, LC2 (véase la Figura 6.5). Las posiciones inicial SI1 y final SI2 de la curva de fluencia SI son mostrados en la Figura 6.5. Debido a que la curva LC2 no fue obtenida experimentalmente, para mostrar el cambio de posición propuesto, esta curva fue delineada, de forma aproximada, en la figura considerándola paralela a la curva LC1, cambiando su valor p_0^* (tensión de fluencia para la condición saturada), de tal manera que ajuste al valor la tensión media neta de fluencia determinada en trayectorias de tensión isotropa bajo una succión matricial de 600 kPa (el resultado es presentado en la sección 6.3).

6.2.4 Cambios de grado de saturación durante las trayectorias de secado y mojado.

La Figura 6.2 y la Figura 6.3 muestran la evolución con el tiempo de los cambios del grado de saturación durante las etapas de equilibrio. En la Tabla 6.1 se muestran los grados de saturación (S_r) obtenidos al final del proceso de compactación y al final de la etapa de equilibrio. En los ensayos I2 e I3 (Figura 6.2), durante la etapa de equilibrio con succiones matriciales de 100 kPa y 10 kPa la relación de agua aumenta (entra agua a la muestra) y la muestra sufre hinchamiento (se incrementa índice de poros), con un resultado final de incremento en el grado de saturación. El

incremento en el grado de saturación en los ensayos con succión matricial de 100 kPa es muy pequeño, desde el $39,3\pm 0,8\%$ al final de la compactación al $40,1\pm 0,1\%$ al final de la etapa (Tabla 6.1 y Figura 6.3). Al aplicarse una succión matricial de 10 kPa el grado de saturación se incrementa al 47.2 %. Los resultados son similares al cambio de la relación de agua, advirtiéndose que el efecto de cambios de agua sobre el grado de saturación predomina sobre los cambios de volumen.

En los ensayos con secado I1 e IWD, con succiones matriciales finales de 600 kPa y 200 kPa respectivamente, el secado está acompañado con una contracción, con un resultado final de reducción en el grado de saturación. Desde las condiciones de compactación (38.7 y 39.1% respectivamente), el grado de saturación pasa a 35.4% con una succión de 600 kPa y a 38.3% con una succión de 200 kPa. Como en el caso de las trayectorias de mojado, el efecto de cambios de agua sobre el grado de saturación predomina sobre el efecto de cambios de volumen.

La gráfica grado de saturación- succión matricial ($S_r - \log s$) de la Figura 6.4 representa curvas de retención (en aproximadamente volumen constante, con excepción de los colapsos generados con $s=0$) obtenidas de trayectorias de secado y de mojado a partir de condiciones cercanas de final de compactación ($S_r=39.3\%$). Como se esperaba, el grado de saturación de la muestra aumenta a medida que la succión matricial es más baja. Al igual que en la gráfica relación de agua-logaritmo de la succión matricial ($e_w - \log s$), se observa una relación lineal entre una succión de 10 y 600 kPa, antes sufrir un brusco incremento del grado de saturación cuando se aplica la succión de $s=5$ kPa. Los bajos incrementos en el grado de saturación al reducir la succión a 10 y 100 kPa sugieren que la entrada de agua en la muestra (con la distribución de poros bimodal, observada en la porosimetría presentada en el capítulo 4) produce la inundación de los poros inter-agregados (suponiendo que los poros intra-agregados estén ya saturados) más pequeños que no estaban saturados y una reducción moderada del número de meniscos de agua, pero no llega a inundar los más poros inter-agregados grandes, que representan un alto porcentaje de vacíos de la muestra, aun cuando la succión aplicada sea muy baja ($s=10$ kPa). Al aplicar succiones por debajo de 10 kPa el agua que entra a la muestra empieza a inundar los poros más grandes, incrementando de manera importante el grado de saturación, y reduciendo notablemente el número de meniscos de agua en los contactos inter-agregados.

El tramo lineal de la curva de retención, en trayectoria de mojado entre $s=10$ y 600 kPa, que es observada en el plano $(S_r - \log s)$ tiene una pendiente $dS_r / d(\ln s)$ cercana a -0.05 (usando la succión matricial en logaritmo natural). En el plano $(S_r - s)$ la misma curva de retención tiene una pendiente dS_r / ds cercana a $-0.00016 \text{ kPa}^{-1}$ entre 100 y 600 kPa, y cercana a -0.0011 kPa^{-1} entre 10 y 100 kPa. La pendiente dS_r / ds entre 100 y 600 kPa sugiere la existencia de cambios muy significativos de succión ante pequeños cambios del grado de saturación. Una consecuencia de lo anterior es que un pequeño cambio de volumen de la muestra en condiciones no drenadas de agua (como ocurre en la etapa de sobrepresión de aire) podría causar cambios importantes de succión. Por ejemplo, si durante la etapa de sobrepresión de aire se presentará un cambio en el índice de poros $\Delta e = 0.005$ ($\epsilon_v = 0.3\%$) se podría incrementar la succión matricial hasta 31 kPa. Esto podría causar alguna incertidumbre sobre la succión matricial que tiene la muestra al inicio de la etapa de equilibrio.

En la Figura 6.6-2 se pueden apreciar los resultados de los ensayos I1, I2, I3 y IWD en el espacio de relación de agua con el índice de poros $e_w - e$, que son acompañados con curvas de igual saturación ($S_r = e_w / e$). Para complementarlo se graficaron datos obtenidos de la curva de retención del ensayo EDO1, de $s=100$ kPa a 0 kPa, en humedecimiento. En la gráfica se observa que los cambios importantes en la reducción de índice de poros, al reducirse la succión en la muestra, se dan después de alcanzar un grado de saturación del 50% (que corresponde a succiones menores a 10 kPa). En el caso del ensayo edométrico EDO1, los cambios importantes en deformaciones de colapso se detienen cuando se alcanza un valor cercano a $S_r = 0.70$, y las deformaciones son pequeñas a pesar de incrementarse el grado de saturación. Por arriba de $S_r = 50\%$ los cambios, tanto en humedad como en volumen, son relativamente pequeños.

La trayectoria seguida por el ensayo IWD no parece concordar con la trayectoria de los ensayos I2 e I3. Lo anterior es debido a que, en primer lugar, el primer valor graficado del ensayo IWD corresponde a la succión de 200 kPa inicialmente impuesta, que produce el secado y contracción de la muestra, por lo cual se encuentra por debajo de los valores graficados de I2 e I3. En segundo lugar, durante la etapa de cambio de succión de 200 a 100 kPa en IWD se presentaron fallas eléctricas que generaron que se tuviera que realizar la descarga momentánea de la presiones

para evitar la falla del ensayo, que quizás generara pequeñas alteraciones de la muestra durante la recarga. Lo anterior, quizás, genere que se presentará una inconsistencia en esta trayectoria: al pasar de de 200 a 100 kPa en IWD, se observa una contracción de la muestra que no es consistente con los ensayos I2 e I3, donde se produce la entrada de agua e hinchamientos al imponer succiones de 100 kPa y 10 kPa respectivamente, ni es consistente con lo analizado anteriormente con base al modelo propuesto por Alonso et al. (1990) (ya que, según lo descrito, en esta trayectoria todavía se está en la zona de comportamiento elástico). Y como se observa en la Figura 6.6-2, los mayores hinchamientos se presentan al imponer la succión de 100 kPa.

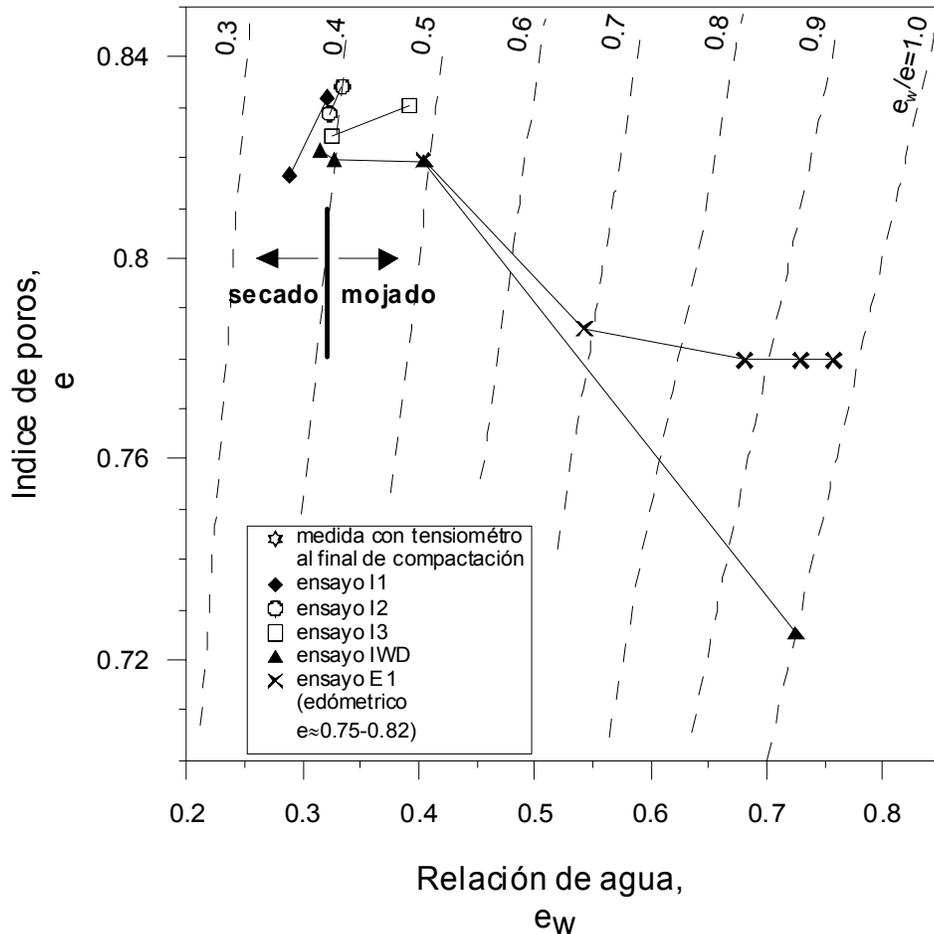


Figura 6.6-2 Resultados de la relación de agua, e_w , graficados con el índice de poros, e , obtenidos en la etapa de equilibrio de los ensayos I1, I2, I3 y IWD; y de la curva de retención del ensayo EDO1, de $s=100$ kPa a 0 kPa, en humedecimiento a partir del estado final de compactación.

6.2.5 Cambios de deformación de corte durante las trayectorias de secado y mojado.

En éste apartado se realiza una descripción de la relación entre las deformaciones volumétricas y de corte (y entre las deformaciones axial y radial) durante la etapa de equilibrio. Éste análisis fue motivado por las evidencias que sugieren la influencia de la historia de tensiones anisótropa generada en la compactación estática sobre el comportamiento mecánico del suelo, interpretados con base a un modelo elastoplástico y conceptos de estado crítico. Lawton et al. (1991) y Pereira y Fredlund (2000) presentaron datos que indican que suelos colapsables presentan anisotropía, en términos de deformación, en respuesta a cambios de succión matricial durante trayectorias de mojado. Adicionalmente, comparaciones entre el comportamiento de muestras compactadas bajo condiciones de tensión isotropa y anisótropa fueron presentados por Romero et al. (2003), Wheeler y Karube (1995). Romero et al. (2003) presentan las deformaciones experimentadas durante etapas de mojado sobre muestras obtenidas por compactación isotropa y por compactación estática unidimensional (anisótropa), donde son mostrados patrones de deformación acordes a su historia de compactación.

Las deformaciones radiales, presentadas en ésta sección, son obtenidas usando medidas locales de desplazamiento lateral a la mitad de la muestra (mediante sensores láser, tal como se describe en el capítulo 3). De esta manera se logran medidas con alta precisión en zonas de la muestra que son menos afectadas por las restricciones existentes en los bordes.

La Figura 6.7 muestra la evolución con el tiempo las deformaciones de la muestra durante las etapas de equilibrio en los ensayos I1, I2, I3 e IWD, que corresponden a una succión matricial aplicada de 600, 100, 10 y 200 respectivamente. Los resultados en los ensayos I2, A1, AW e IW, que corresponden a etapas de equilibrio bajo una succión matricial de 100 kPa, son consistentes (véase la

Figura 6.7) ; por lo cual fue usado únicamente el ensayo I2 para representarlos, con el fin de obtener gráficas más claras. Tal y como fue mencionado anteriormente, éstas etapas fueron realizadas bajo una tensión media neta, $p-u_a$, de 23 kPa y tensión de corte, q , de 10 kPa. Luego, las etapas de equilibrio realizadas, en esta tesis, siguen trayectorias de mojado (o secado, según

sea el caso) bajo condiciones de tensiones anisótropas debido a que la tensión axial neta aplicada ($\sigma_a - u_a = 30$ kPa) no es igual a la tensión radial neta ($\sigma_r - u_a = 20$ kPa). Consideraremos, por lo tanto, que se sigue una trayectoria de cambio de succión matricial (mojado o secado) bajo condiciones de relación de tensión de corte entre tensión media neta constante, de $\eta = q/(p - u_a) = 0.43$ ($K = (\sigma_r - u_a)/(\sigma_a - u_a) = 0.67$). Durante éstas etapas de equilibrio, realizadas en ésta investigación, no fue posible analizar adecuadamente el efecto de la compactación estática unidireccional ante los cambios de succión, debido a la dificultad para separarlo (en esta etapa) de la influencia del estado de tensiones aplicado, η . Sin embargo, es de gran importancia conocer la historia completa de deformaciones, incluyendo la relación entre deformaciones de corte y volumétrica, para estudiar el efecto de la historia de tensiones experimentado durante la compactación y en la etapa de equilibrio sobre las etapas posteriores (consolidación, corte triaxial, etc.), en particular en las muestras que experimentaron deformaciones importantes de colapso (succión matricial, $s=0$).

En la gráfica de deformación volumétrica de la Figura 6.7 fueron observados pequeños hinchamientos en las trayectorias de mojado, con succiones matriciales de 10 y 100 kPa (ensayo I3 e I2 respectivamente), siendo ligeramente mayor para succión matricial de 10 kPa. En ambos casos las trayectorias de mojado permanecen dentro de la región elástica. En estas trayectorias se presentaron tanto hinchamientos radiales como axiales, con la expansión radial de magnitud mayor que la axial, y con una relación deformación axial entre deformación radial (ϵ_a/ϵ_r) menor a 0.5 al final de la etapa. Las deformaciones de corte (ϵ_s) experimentadas bajo éstas succiones matriciales de 10 y 100 kPa son de 0.069 y 0.060%, respectivamente. En la Figura 6.7 y Figura 6.8 se observa que la magnitud de los hinchamientos axiales son, aproximadamente, iguales mientras que el hinchamiento radial es mayor para la succión matricial de 10 kPa. La relación entre la deformación de corte y la deformación volumétrica, presentada en Figura 6.8, siguen caminos semejantes en ambas trayectorias de mojado (obtenidas de la evolución de las deformaciones con el tiempo), alcanzando una mayor extensión la etapa con menor succión matricial. En ambos casos la relación de deformaciones (ϵ_s/ϵ_v) final presenta los siguientes valores: en $s=10$ kPa $\epsilon_s/\epsilon_v = 0.20$ y en $s=100$ kPa $\epsilon_s/\epsilon_v = 0.18$. En la Figura 6.8 estas deformaciones son representadas a diferentes escalas, para lograr una mayor claridad.

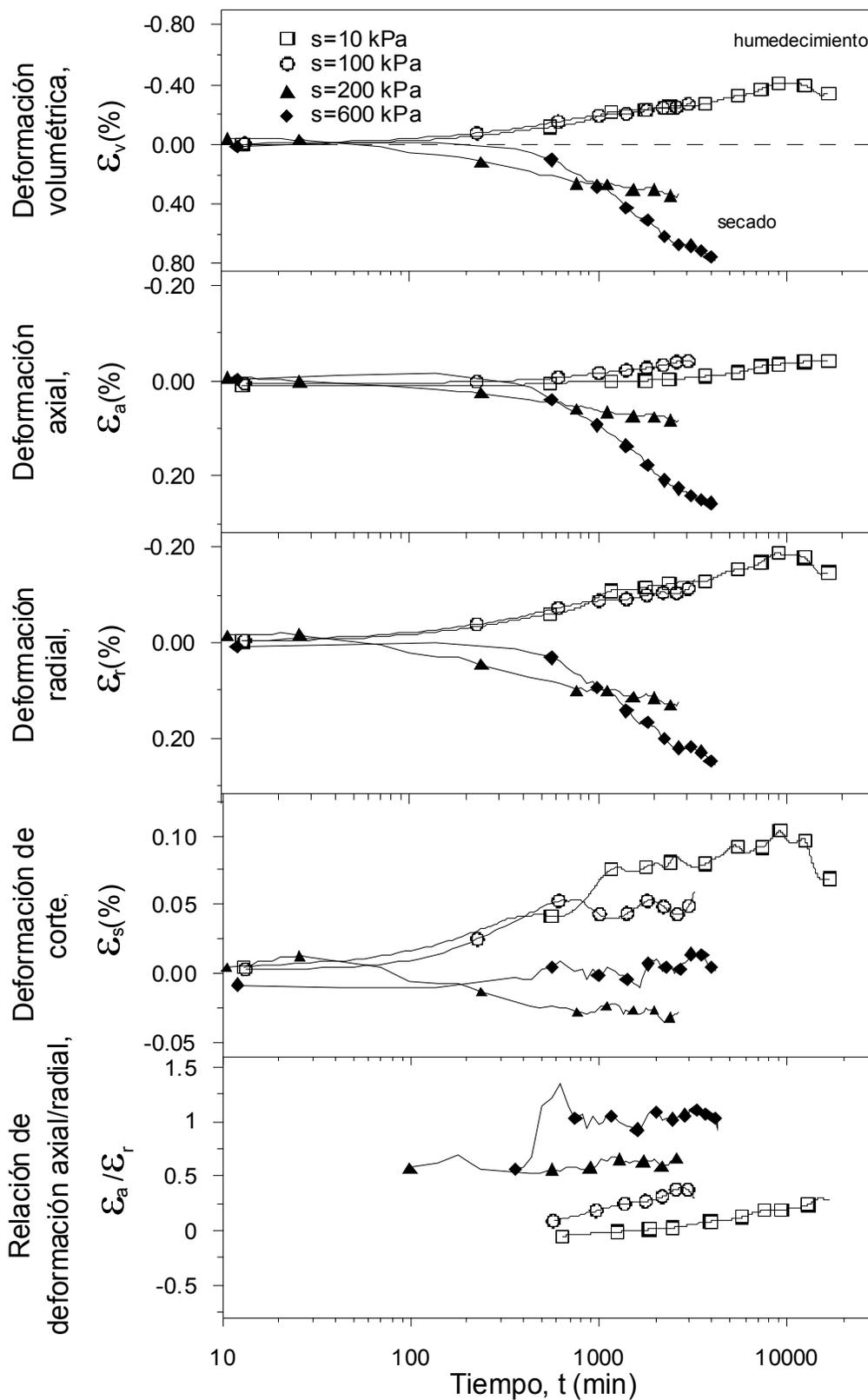


Figura 6.7 Evolución de las deformaciones del suelo durante las etapas de equilibrio en los ensayos I1, I2, I3 e IWD, que corresponden a una succión aplicada de 600, 100, 10 y 200 respectivamente.

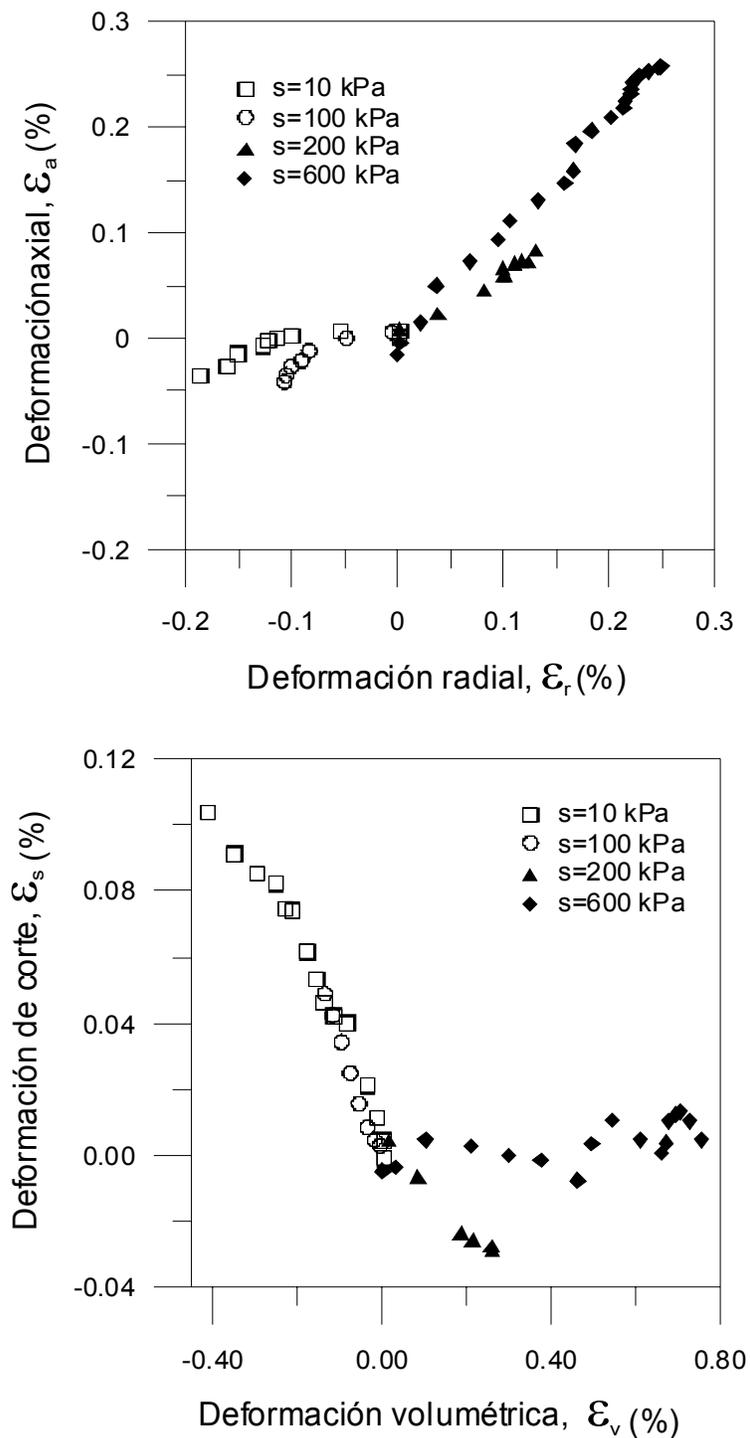


Figura 6.8 Gráficas de deformación lateral-deformación axial y deformación volumétrica- deformación de corte obtenidas durante la etapa de equilibrio en los ensayos I1, I2, I3 e IWD, que corresponden a una succión aplicada de 600, 100, 10 y 200 respectivamente.

Se observó contracción de la muestra en las trayectorias de secado, bajo succión matricial de 200 y 600 kPa en los ensayos IWD e II respectivamente (gráfica de deformación volumétrica de la Figura 6.7), con una mayor contracción volumétrica experimentada bajo una succión matricial de 600 kPa que la observada bajo 200 kPa. En ambos casos se presentaron contracciones radiales y axiales. La relación deformación axial entre deformación radial (ϵ_a/ϵ_r) al final de la etapa es de 0.61 para succión matricial de 200 kPa y 1.06 para 600 kPa (Figura 6.7 y Figura 6.8). Las deformaciones de corte (ϵ_s) experimentadas bajo éstas succiones matriciales de 200 y 600 kPa son de -0.034 y 0.010%, respectivamente, y la relación final entre la deformación de corte y la deformación volumétrica en éstas trayectorias de secado es muy pequeña, con $\epsilon_s/\epsilon_v = -0.10$ en $s=200$ kPa y con $\epsilon_s/\epsilon_v = 0.01$ en $s=600$ kPa (Figura 6.7 y Figura 6.8).

La deformaciones de contracción por secado experimentadas desplazan la posición de la curva de fluencia SI (propuesta por Alonso et al., 1990), incrementando la región elástica, pero el estado de tensiones (con $p-u_a = 23$ kPa y $q = 10$ kPa constantes) no toca la superficie de fluencia $f(p-u_a, q, s)=0$, presentada en el plano $(p-u_a, q)$ para cada s , durante las trayectorias de tensiones de incremento se succión ejecutadas. Aunque las deformaciones generadas son bastante isótropas, con deformaciones de corte pequeñas con respecto a las deformaciones volumétricas (sobre todo en $s=600$ kPa), es difícil concluir algo con los ensayos realizados debido a que no es posible separar el efecto del estado de tensiones anisótropo y del secado de la muestra sobre su comportamiento mecánico. En la Figura 6.8 también es mostrado el comportamiento señalado arriba, observándose una mayor igualdad entre las deformaciones axial y radial cuando se produce contracción de la muestra (en $s=200$ y 600 kPa) que cuando existe hinchamiento (en $s=10$ y 100 kPa). En el mismo sentido, se observan menores deformaciones de corte en las trayectorias de secado.

La muestra presenta deformación de colapso durante su saturación, siguiendo la trayectoria de mojado de 10 a 0 kPa, en el ensayo IWD (véase tramo D-E en la Figura 6.1). Durante esta trayectoria de tensiones se genera el movimiento de la curva de fluencia LC1 hasta alcanzar la succión matricial de 0 kPa (véase la trayectoria B3-C4 de la Figura 6.5) y se producen deformaciones de colapso irreversibles. El punto C4 corresponde al estado final de saturación de la muestra bajo $p' = 19-21$ kPa. La saturación de la muestra es realizada bajo condiciones de

tensiones anisótropas con una relación de tensión de corte entre tensión media neta de $\eta = q/(p - u_a) = 0.50$ ($K = (\sigma_r - u_a)/(\sigma_a - u_a) = 0.62$).

La Figura 6.9 muestra la evolución con el tiempo las deformaciones de la muestra durante el cambio de succión de 10 a 0 kPa en la etapa D-E del ensayo IWD. Las deformaciones axiales predominan sobre las deformaciones radiales con una relación (ϵ_a/ϵ_r) de aproximadamente 2, al final de la etapa (véase también la Figura 6.10). Durante ésta etapa primero se produce un muy pequeño hinchamiento de la muestra, para presentarse después de 30 minutos deformaciones axiales de colapso sin cambio en las deformaciones radiales, y posteriormente, después de 175 minutos, ocurre un mayor colapso en el sentido axial acompañado con deformaciones radiales de colapso. La deformación de corte (ϵ_s) final experimentada en ésta etapa fue de 0.82% y una deformación volumétrica (ϵ_v) de 5.023%.

En la Figura 6.9 (en gráfica Tiempo- $\delta\epsilon_s/\delta\epsilon_v$) y Figura 6.10 se observa que la relación entre la deformación axial y la deformación radial, así como la relación entre la deformación de corte y la deformación volumétrica, siguen caminos que pueden dividirse en tres etapas, debido a que las deformaciones de colapso radiales inician con retraso y se estabilizan antes que las deformaciones axiales. En la primera etapa ocurre una relación de incremento de la deformación de corte entre incremento de la deformación volumétrica de $\delta\epsilon_s/\delta\epsilon_v = 0.67$ (presentando cambios poco significativos en la deformación radial), en la segunda $\delta\epsilon_s/\delta\epsilon_v$ muy cercano a cero (presentando cambios muy grandes en la deformación volumétrica) y finaliza con un relación de $\delta\epsilon_s/\delta\epsilon_v = 0.37$. Al final de la saturación de la muestra, considerando los valores totales de deformación (y no incrementos), la relación de la deformación de corte entre la deformación volumétrica (ϵ_s/ϵ_v) fue de 0.17.

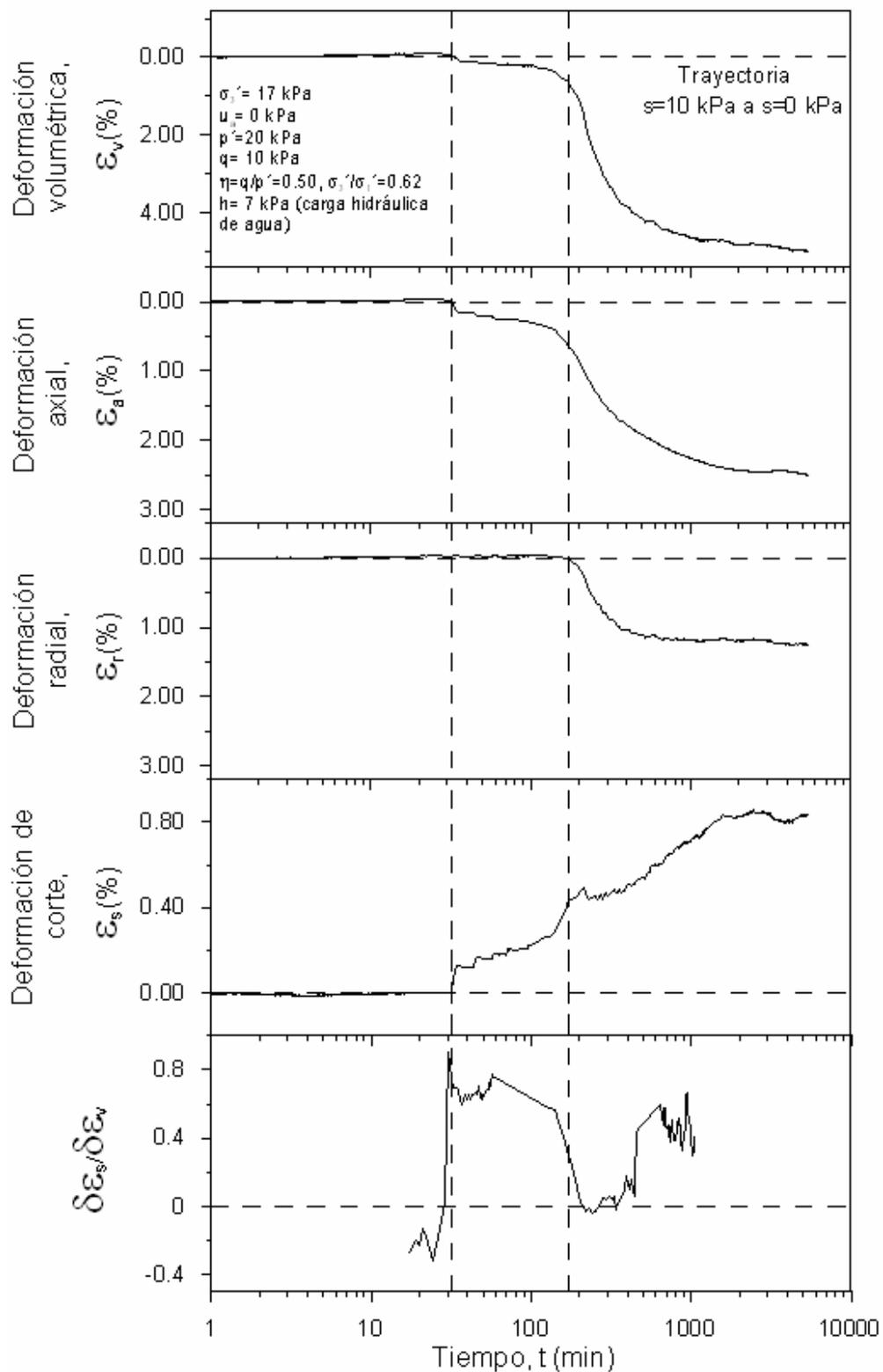


Figura 6.9 Evolución de las deformaciones del suelo durante cambio de succión de 10 a 0 kPa, etapa D-E, en el ensayo IWD.

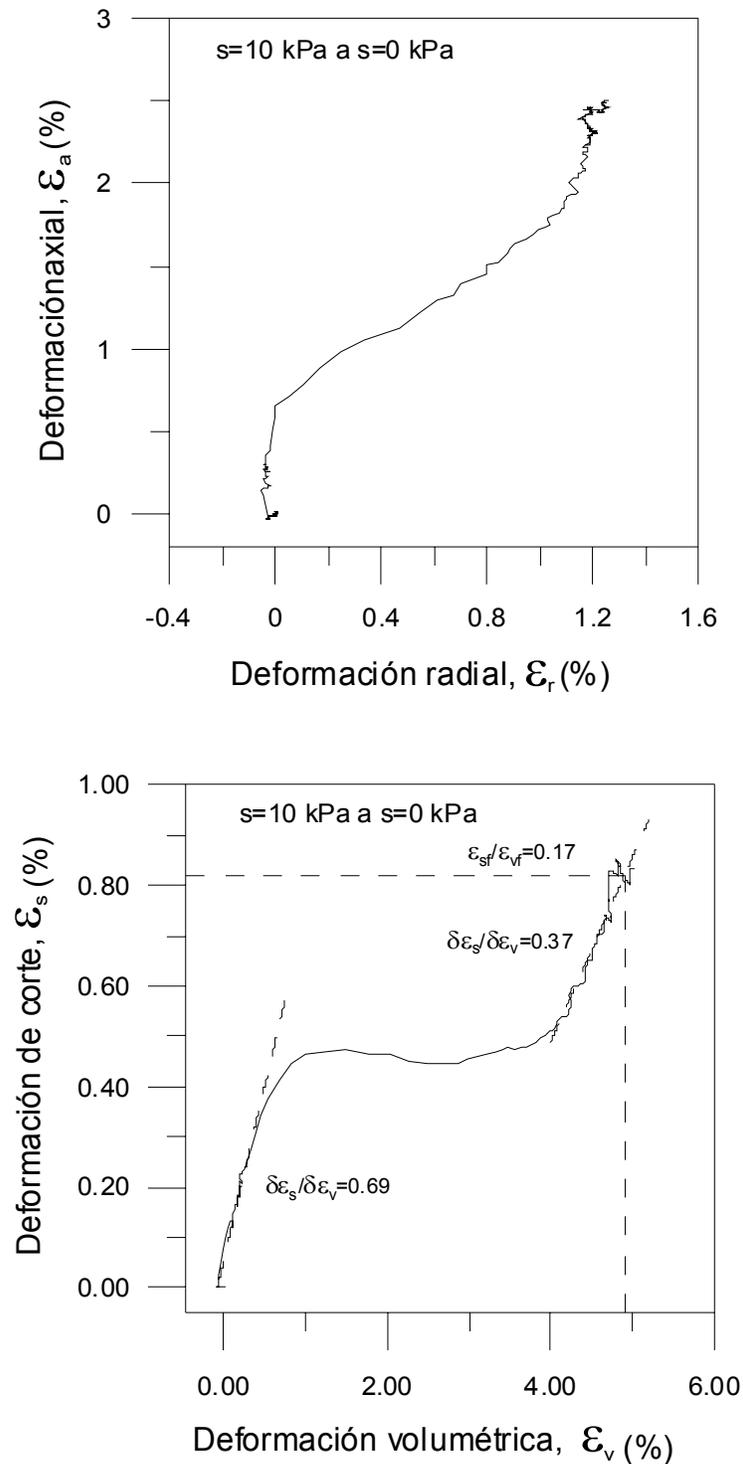


Figura 6.10 Gráficas de deformación lateral-deformación axial y deformación volumétrica- deformación de corte obtenidas durante la etapa de saturación, trayectoria D-E, del ensayo IWD. Corresponden a un cambio de succión de 10 a 0 kPa.

6.3. Consolidación isótropa con succión matricial constante.

6.3.1 Consolidación isótropa mediante rampa de incrementos de presiones bajo condiciones saturadas de la muestra.

Los resultados presentados en este apartado se obtuvieron en trayectorias de consolidación isótropa, bajo condiciones saturadas, en los ensayos SI1, SI2 y SM2 (véase Tabla 5.4, la Figura 5.17 y la Figura 5.20). Estos resultados se analizan en el contexto de modelos constitutivos elasto-plásticos. La presión intersticial de agua se mantuvo en 300 kPa. La trayectoria de consolidación isótropa en el ensayo SI1 inició con tensión media efectiva inicial (p') de 5 kPa y en los ensayos SI2 y SM2 inició con p' de 10 kPa. Las muestras se consolidaron ejecutando una rampa de incrementos de presiones bajo condiciones isótropas hasta alcanzar una tensión media efectiva máxima, predefinida. Durante su ejecución se garantizó un incremento de presión intersticial de agua (u_w) menor de 10 kPa.

La Figura 6.11 muestra la variación de índice de poros y deformaciones de la muestra con la tensión media efectiva p' durante la consolidación cuasi-continua (con p' en escala logarítmica). Las presiones de preconsolidación pueden ser identificadas con claridad, en todos los ensayos, por los marcados cambios de pendiente observados de la curva continua de índice de poros con el logaritmo de la tensión media efectiva (e -log p'). En estos ensayos, realizados sobre muestras saturadas, el volumen de agua que fluye saliendo de la muestra (medido en el equipo triaxial) es considerado igual al cambio de volumen de la muestra.

La curva de consolidación isótropa del ensayo SI1 presenta un patrón de comportamiento diferente, al de los ensayos SI2 y SM2, durante su tramo inicial. Los ensayos SI2 y SM2 presentan valores de índice de poros inicial más bajos y presiones de preconsolidación mayores que los mostrados por el ensayo SI1, sin embargo todas las curvas de compresión isótropa, en el plano e -log p' , convergen cuando las curvas de los ensayos SI2 y SM2 alcanzan sus presiones de preconsolidación.

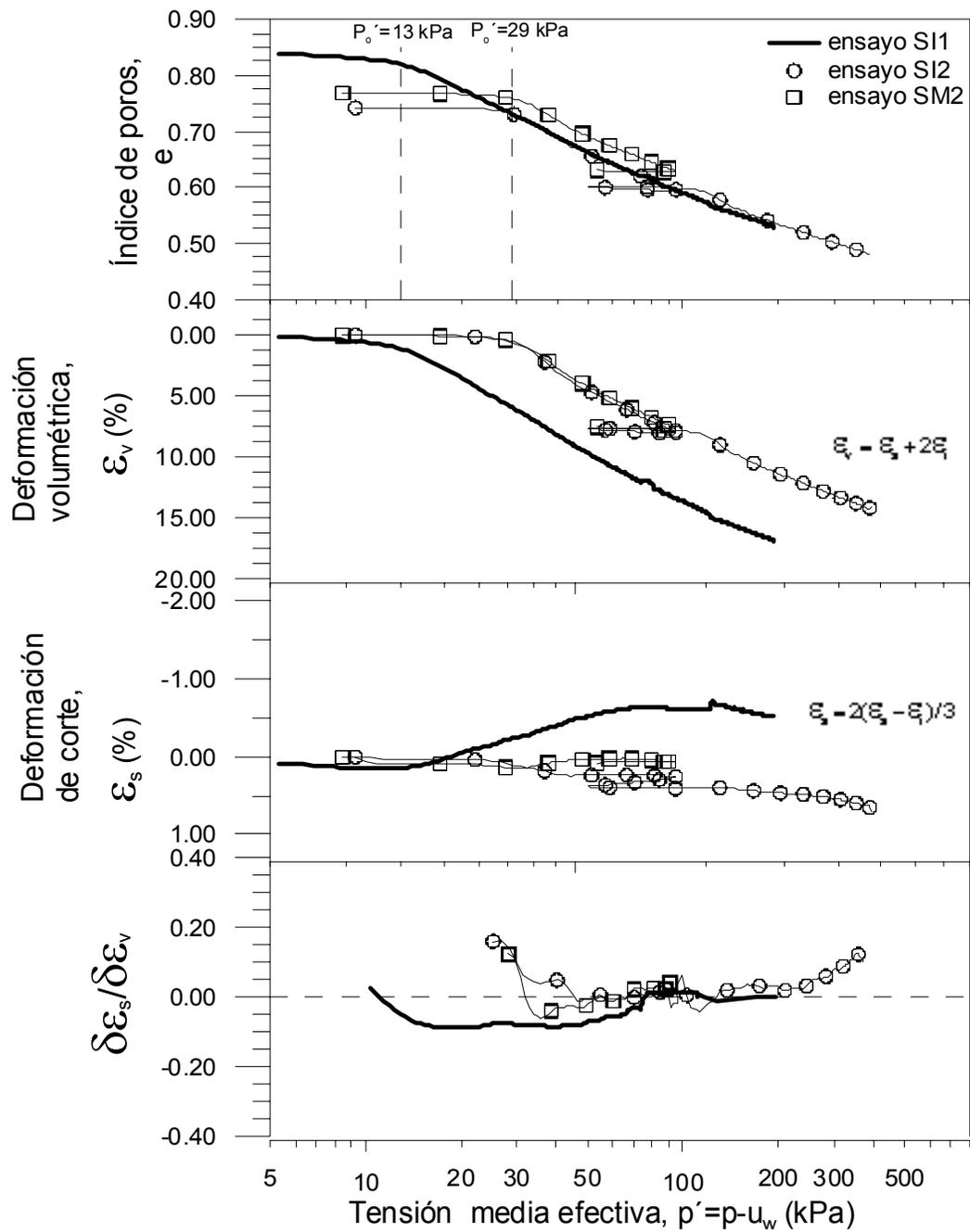


Figura 6.11 Variación de índice de poros y deformaciones del suelo durante las trayectorias de consolidación mediante rampa de incremento de presiones, bajo condiciones saturadas de la muestra.

El comportamiento distinto es explicado por historias de tensión diferentes aplicados a la muestra compactada durante la etapa de saturación (descritos en los apartados 5.4.2 y 6.2.3) usando el modelo propuesto por Alonso et al. (1990). Para el caso del ensayo SI1 la etapa de saturación por flujo de agua fue realizada bajo una tensión media efectiva promedio de $p'=9$ kPa, generándose tan solo un ligero hinchamiento de la muestra. Con base a este comportamiento, y a que la trayectoria de mojado seguida en la saturación no movió la curva LC1 (obtenida por medio de los ensayos de consolidación isótropa bajo succión controlada mostrados en el apartado 6.3.2; véase Figura 6.5) se sugiere que el estado de tensiones permaneció dentro de la región elástica. Al cerrar la salida de agua, la tensión media efectiva fue reducida a $p'=5$ kPa. Por lo tanto, la presión de preconsolidación determinada en este ensayo representará la tensión de fluencia, bajo una succión matricial de cero, del suelo generado al final de la compactación (con variación de la succión matricial pero sin cambio en fábrica de agregados durante la saturación). La presión de preconsolidación para el ensayo SI1 fue de $p_0'=13$ kPa, que es mayor a $p'=9$ kPa aplicada en promedio durante su saturación, lo que es consistente con lo señalado arriba.

Mientras que en el caso de los ensayos SI2 y SM2 la muestra experimentó importantes deformaciones volumétricas de colapso por mojado (de hasta 4.9% en SI2) durante la etapa de saturación por flujo de agua, realizado bajo una tensión media efectiva promedio de $p'=25$ kPa. En este caso, la trayectoria de mojado mueve la curva LC1, generando deformaciones volumétricas irreversibles, hasta alcanzar la succión matricial de cero con $p'=25$ kPa. Esto origina que la presión de preconsolidación en $s=0$ sea, ahora, igual a la tensión de tensión media efectiva aplicada en la saturación. Al cerrarse la salida de agua la tensión media efectiva fue reducida a $p'=10$ kPa. La presión de preconsolidación para los ensayos SI2 y SM2 fueron de $p_0'=29$ kPa y $p_0'=31$ kPa respectivamente, son muy aproximados a las presiones medias efectivas promedio aplicadas durante su saturación ($p'=25$ kPa), lo que sugiere que la historia de tensiones estimada para la etapa de saturación de las muestras fue bastante precisa.

La evidencia experimental presentada por Maswoswe (1985), donde las muestras colapsadas por mojado alcanzan la curva de compresión $e-\log \sigma_v$ de la muestra saturada en ensayos edométricos, puede ser relacionada con la convergencia de las curvas de compresión isótropa después alcanzarse las presiones de preconsolidación (tensiones de fluencia) en los ensayos SI2 y SM2.

Después de colapsar las muestras SI2 y SM2 y alcanzar la curva de compresión noval e -log p' de la muestra saturada (determinada en el ensayo SI1), se produjo una descarga de tensión media efectiva, de $p'=25$ kPa a 10 kPa al finalizar la saturación por flujo de agua y aplicar la presión de cola sobre ambos extremos de la muestra triaxial. Posteriormente al iniciar la consolidación isótropa se realizó una trayectoria de recarga hasta alcanzar la tensión de fluencia, inducida por mojado, y seguir, aproximadamente, la curva de compresión noval e -log p' de la muestra saturada.

Por lo tanto, estos ensayos de consolidación isótropa fueron realizados con muestras sujetas a dos diferentes historias de tensión durante la etapa de saturación: a) el ensayo SI1, que corresponde a una muestra que no ha sufrido deformaciones importantes durante la saturación y por lo tanto, la posee la misma fábrica de suelo que al final de la compactación pero con una succión matricial igual a cero; y b) los ensayos SI2 y SM2, donde un endurecimiento de las muestras inducido por deformaciones volumétricas de colapso por mojado ocurrió durante su saturación, lo que generó que sean más densas y tengan una zona elástica más amplia.

Los valores de las presiones de preconsolidación fueron calculadas usando el método de Casagrande. Por otra parte, la pequeña variación en la presión de preconsolidación encontrada en los ensayos SI2 y SM2 sugiere que el proceso de compactación produce muestras muy repetibles.

Para cada ensayo de consolidación isótropa, en diferentes valores de succión matricial, la línea de compresión normal (rama de compresión noval) puede ser representada por una ecuación lineal:

$$v = N(s) - \lambda(s) \ln\left(\frac{p'}{p_a}\right) \quad (6.1)$$

La pendiente de la línea de compresión normal $\lambda(s)$ y la compresibilidad en el rango elástico $\kappa(s)$ para la condiciones saturadas $\lambda(0)$ y $\nu(0)$, para los distintos ensayos se presenta en Tabla 6.4.

Tabla 6.4 Condiciones iniciales y finales en la etapa de equilibrio en los ensayos no saturados.

Ensayo	s (kPa)	P_0^*	$\nu(0)$	$\lambda(0)$
SI1	0	13	-0.013	-0.106
SI2	0	29	-0.003	-0.109
SM2	0	31	-0.003	-0.102

Puede decirse que las pendientes de la línea de compresión normal $\lambda(0)$ son iguales para las muestras colapsadas y la no colapsada durante la saturación. La línea de compresibilidad en el rango elástico $\nu(0)$ es muy corta en el ensayo SI1 (muestra no colapsada), iniciando con $p'=5$ kPa y finalizando antes de la tensión de fluencia $p_0^*=13$ kPa, lo que podría influir en la existencia del valor muy alto de su pendiente. Por lo tanto, no se puede aseverar que las muestras colapsables y no colapsables tengan muy diferentes pendientes en sus líneas de compresibilidad en el rango elástico.

A continuación se proporciona información sobre la evolución de las deformaciones de corte, y su relación con las deformaciones volumétricas, en las trayectorias de consolidación isótropa sobre muestras colapsadas y no colapsadas durante la saturación. También se evalúa el flujo plástico por medio de la dirección del incremento de deformación plástica ($\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$). Donde $\delta\varepsilon_s$ y $\delta\varepsilon_v$ son los incrementos de las deformaciones plásticas volumétricas y de corte, respectivamente. Para determinar las deformaciones plásticas deberá restarse las deformaciones elásticas de las totales. Existen varios métodos para realizarlo: estimar las deformaciones elásticas usando los módulos elásticos volumétrico y de corte (para suelos isótropos); utilizando un método semigráfico considerando los diagramas $p'-\varepsilon_v$ y $q-\varepsilon_s$ (Graham et al., 1983); considerando despreciables las deformaciones elásticas, que generalmente son mucho más pequeñas que las deformaciones plásticas (Cui y Delage, 1996). Debido a que en esta tesis se realizaron trayectorias que siguen diversas relaciones entre tensiones de corte y tensiones media; a la posible naturaleza anisótropa del suelo en estudio; y por su simplicidad se utilizó el método de considerar despreciable las deformaciones elásticas.

La Figura 6.11 muestra la variación de las deformaciones de corte (ε_s) y $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ (relación entre incrementos de deformación de corte y deformación volumétrica) de la muestra con la tensión media efectiva p' , durante la consolidación cuasi-continua (con p' en escala logarítmica). Las deformaciones de corte, ε_s , generadas durante la trayectoria de consolidación isótropa, siguen tendencias distintas para las muestras colapsadas (ensayos SI2 y SM2) y no colapsadas (ensayo SI1).

En el caso de las muestras no colapsadas (con pequeños cambios volumétricos de hinchamiento durante la saturación), en el tramo inicial de la consolidación presenta cambios graduales en las deformaciones de corte tan pronto alcanza la presión de preconsolidación (tensión de fluencia), de 13 kPa (con $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ de -0.82), hasta adquirir un deformación de corte cercana a -0.65% en p' cercana a 70 kPa y permanecer constante (con muy pequeñas variaciones) hasta el final de la trayectoria ($p'=200$ kPa). Relacionado con lo anterior, en la Figura 6.12 puede observarse que en el tramo inicial de la trayectoria la deformación radial es mayor que la deformación axial, mostrándose por lo tanto una mayor rigidez axial, lo que sugiere la existencia de anisotropía transversal en la muestra. Pero en el segundo tramo (después de $p'=70$ kPa) el comportamiento mecánico de la muestra puede ser considerado isótropo, con cambios despreciables en la deformación de corte, la relación $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ muy cercana a cero (igual a 0.004) y la deformación radial muy cercana a la deformación axial.

A diferencia de la muestra no colapsada, el comportamiento mecánico de las muestras colapsadas puede ser considerado isótropo tan pronto es alcanzada la presión de preconsolidación ($p_0' \approx 30$ kPa), en especial en el ensayo SM2 (véase la Figura 6.11, la Figura 6.12 y la Figura 6.13). En este ensayo la muestra presenta una relación $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ muy cercana a cero (igual a 0.010) en $p_0' \approx 30$ kPa y la deformación radial muy cercana a la deformación axial.

La diferencia en el patrón de comportamiento puede ser explicado mediante los conceptos de elastoplasticidad en suelos con anisotropía transversal (por ejemplo Wheeler et al., 2003), en conjunto con conceptos de deformaciones permanentes (colapso) inducidas por mojado (por ejemplo Alonso et al., 1990). La compactación estática de la muestra fue realizada bajo condiciones de deformación lateral nula, presentando al final una relación de tensión lateral neta entre la tensión axial neta de $K_0=(\sigma_r-u_a)/(\sigma_a-u_a)=0.48$ (ó $\eta= q/p-u_a=0.80$). La deformación anisótropa sufrida por la muestra durante la compactación crea una estructura anisótropa transversal, donde se asume que presenta una mayor rigidez y resistencia en la dirección axial. Cui y Delage (1996) presentaron datos sobre un limo compactado unidimensional, que muestra curvas de fluencia a succión constante, que están inclinadas con el eje mayor coincidiendo con la línea K_0 (coeficiente de empuje en reposo), comportamiento que es similar a los esquemas asumidos para los suelos de depósitos naturales (donde la superficie de fluencia es asumida

aproximadamente elíptica y rotada cercanamente simétrica sobre K_{θ}). Evidencias de lo anterior, en suelos naturales, fue presentada por Graham et al. (1983). Adicionalmente, varios modelos propuestos sugieren que la inclinación de la curva de fluencia es causada por deformaciones plásticas (Wheeler et al., 2003).

Puede asumirse, por lo tanto, que al final de la compactación estática la muestra presenta una superficie de fluencia inclinada. Durante la saturación de la muestra en el ensayo SI1, debido a que ocurrieron deformaciones de hinchamiento reversibles despreciables, manteniéndose el estado de tensiones dentro de la región elástica delimitada por la curva de fluencia LC (loading-collapse) propuesta por Alonso et al. (1990), puede suponerse (por ahora, sin considerar algún efecto directo del cambio en la succión matricial) que no ha habido cambio de fábrica y que la superficie de fluencia no fue rotada. Durante la trayectoria de tensión isotropa es inducida la expansión y rotación de la superficie de fluencia hacia una orientación más isotropa. Lo anterior es congruente con el comportamiento anisótropo transversal observado inicialmente (con una mayor rigidez axial) y un comportamiento cercanamente isotropo al final de la trayectoria.

Por otra parte, durante la saturación en los ensayos SI2 y SM2 se alcanza la curva de fluencia LC, presentando la muestra deformaciones volumétricas de colapso (irreversibles), por lo cual puede suponerse que la superficie de fluencia fue expandida y rotada hacia una orientación más isotropa. Por lo tanto, es de esperarse un comportamiento inicial más cercanamente isotropo en las muestras colapsadas que en la muestra no colapsada, tal como es observado en la Figura 6.11, Figura 6.12 y Figura 6.13. Finalmente hay que señalar que el comportamiento cercanamente isotropo se presenta en la muestra colapsada tan pronto es alcanzada la presión de preconsolidación ($p' \approx 30$ kPa), mientras que en la muestra no colapsada es presentada en p' cercana a 70 kPa. Esto puede deberse a que la muestra colapsada ya ha sufrido a lo largo de su historia deformaciones irreversibles importantes.

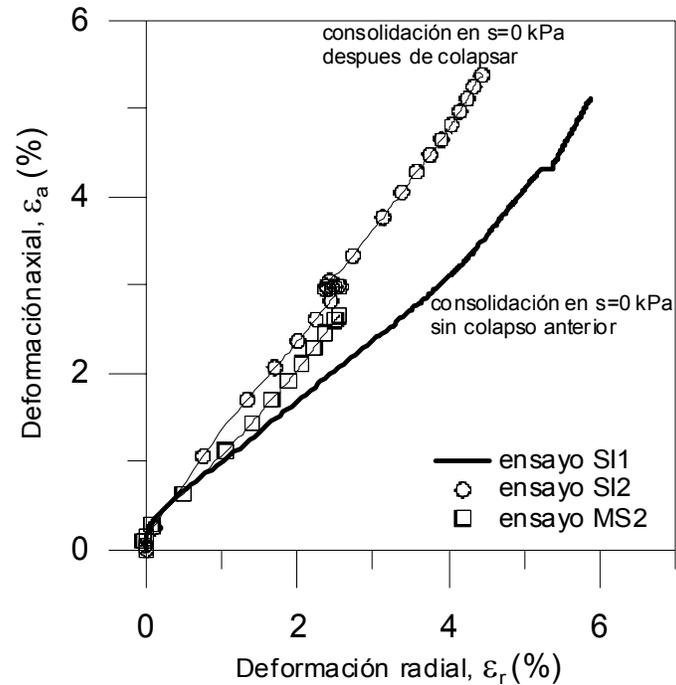


Figura 6.12 Relación de la deformación axial con la deformación radial durante las trayectorias de consolidación mediante rampa de incremento de presiones, bajo condiciones saturadas de la muestra.

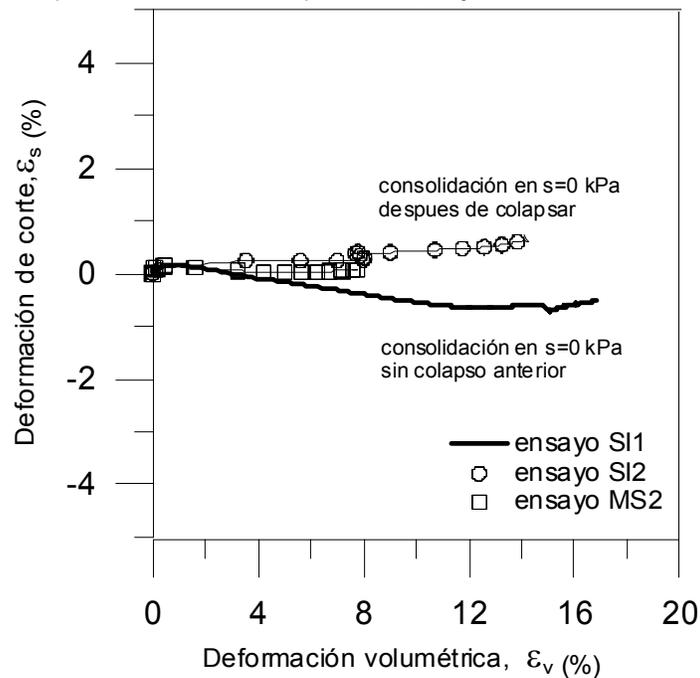


Figura 6.13 Relación de la deformación de corte con la deformación de volumétrica durante las trayectorias de consolidación mediante rampa de incremento de presiones, bajo condiciones saturadas de la muestra.

6.3.2 Consolidación isótropa con control de succión.

6.3.2.1 Descripción de trayectorias de consolidación isótropa bajo succión controlada.

En los ensayos I1, I2, I3 e IW, después de finalizar la etapa de equilibrio, se siguieron trayectorias de compresión isótropa mediante incrementos de tensión media neta cuasi-continuos $\Delta(p - u^a)$ a una velocidad predefinida (manteniendo la tensión de corte constante) y bajo condiciones de succión matricial ($s = u^a - u^w$) constante. Las trayectorias seguidas corresponden a las etapas compresión isótropa, tramo B-C, en la Figura 6.14 y están descritas en la Tabla 5.2. Estas trayectorias fueron efectuadas ejecutando una rampa de incrementos de la tensión media neta hasta alcanzar estados vírgenes de tensión, bajo tres diferentes succiones matriciales: 600 kPa en el ensayo I1 (tramo B1-C1); 100 kPa en los ensayos I2 e IW (tramo B2-C2); y 10 kPa en el ensayo I3 (tramo B3-C3). La trayectoria de tensiones seguida durante la etapa de equilibrio (A-B en la Figura 6.14), para alcanzar las condiciones de inicio de los ensayos de compresión isótropa, corresponden a trayectorias de mojado (ensayos I2, I3 y IW) y secado (ensayo I1). Los resultados son analizados en el contexto de modelos constitutivos elasto-plásticos. Los ensayos son útiles para determinar la tensión de fluencia en diferentes succiones y apreciar con claridad la respuesta post-fluencia debido al cambio en la superficie LC (del modelo presentado por Alonso, et al., 1990).

Para complementar los resultados de los ensayos de consolidación isótropa bajo condiciones de succión matricial ($s = u_a - u_w$) constante, en este apartado se presentan los resultados de la trayectoria de consolidación isótropa bajo condiciones saturadas del ensayo SII realizados en un triaxial convencional. La succión matricial durante el ensayo fue considerada igual a cero ($s = u_a - u_w = 0$), con una presión de aire dentro de la muestra igual a cero ($u_a = 0$). En este ensayo la consolidación isótropa fue realizada sobre una muestra que presentó deformaciones volumétricas y de corte despreciables durante su saturación (generándose tan solo un ligero hinchamiento), con lo cual es útil para determinar la tensión de fluencia bajo condiciones de succión matricial igual a cero. Información adicional de procedimiento del ensayo se ha presentado en el Capítulo 5.

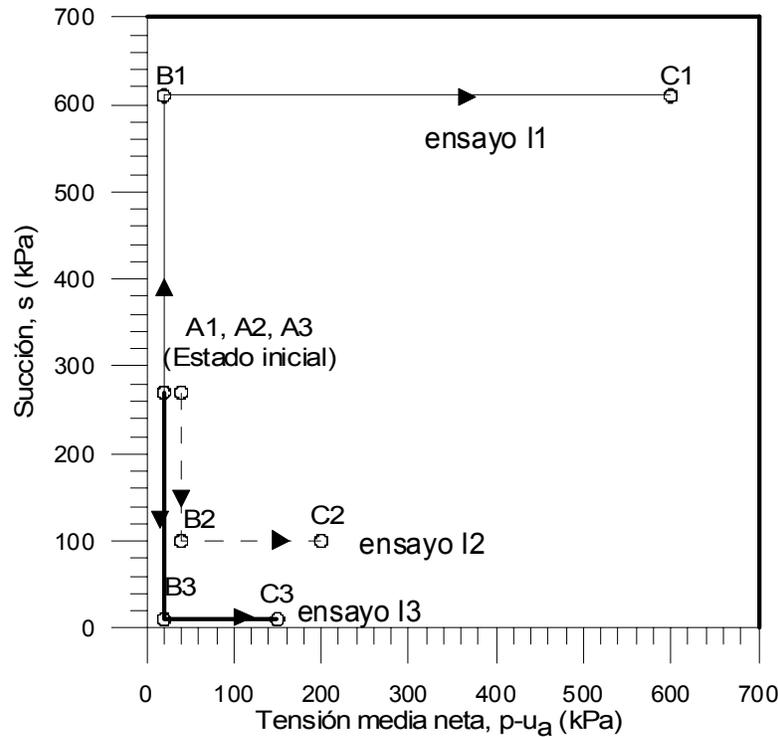


Figura 6.14 Trayectorias compresión isotrópica bajo condiciones de succión controlada (B-C) para los ensayos I1, I2 e I3.

6.3.2.2 Compresibilidad del suelo a distintas succiones.

La Figura 6.15 muestra la variación de índice de poros, relación de agua y grado de saturación de la muestra con la tensión media neta, $p-u_a$, durante la rampa de consolidación cuasi-continua (con $p-u_a$ en escala logarítmica). En el caso del ensayo SI1 (con succión cero, $s=0$) la variación de índice de poros y deformaciones de la muestra son graficados con la tensión media efectiva, p' , en escala logarítmica.

En los ensayos I2 e IW se siguieron trayectorias de consolidación isotrópica bajo una succión matricial de 100 kPa (después de seguir etapas de equilibrio similares). Al final de la etapa de consolidación, la diferencia en las medidas obtenidas entre ambos ensayos fue de: 0.013 en el cambio de índice de poros (δe) y 0.0002 en el cambio de relación de agua (δe_w) (son muy pequeñas las medidas registradas de cambio de humedad durante estos ensayos). Debido a la consistencia observada en estos resultados, y para obtener gráficas más claras en las figuras presentadas en esta sección solo se muestran los cambios registrados en el ensayo I2.

En este estudio, las deformaciones volumétricas de los especímenes no saturados se obtienen de dos diferentes formas: a) Medidas locales y continuas: combinando las deformaciones locales axial y radial (con medida de desplazamiento lateral obtenida solamente en el punto central del espécimen, en dos lados opuestos); y b) Medidas globales, realizadas en puntos prefijados del estado de tensiones: medidas de cambio de volumen estimadas a partir de los perfiles del espécimen obtenidos usando los sensores láser (contando con medidas de desplazamiento lateral a lo largo del espécimen sobre dos lados opuestos). Con la medida global se obtienen menores cambios de volumen que con la “medida local”, pero el acuerdo entre ambas medidas es satisfactorio, para esta etapa, por ejemplo se presenta una diferencia de 0.37% en ε_v de 5.4% (la diferencia es más pequeña cuanto menor sea ε_v). En la Figura 6.16 se observa una buena concordancia entre las medidas local y global de la deformación volumétrica obtenidas durante la trayectoria de consolidación isótropa, realizada en el ensayo I2, bajo condiciones succión matricial de $s=100$. Usando solamente la medida del desplazamiento lateral observado en el punto medio de los perfiles del espécimen, para estimar la deformación volumétrica, la diferencia con respecto a las “medidas continuas locales” es bastante menor, con un valor máximo de 0.11% en ε_v de 11.6%. Por lo tanto, el error entre las dos medidas es atribuido esencialmente a la deformación radial no homogénea a lo largo del espécimen, inducido por las restricciones existentes en los bordes. En este estudio se usará la “medida local” debido a que no es afectada por las restricciones en los bordes y son registradas continuamente durante el desarrollo de la trayectoria.

En los ensayos saturados únicamente se realizan medidas globales de los cambios volumétricos, cuantificando la salida del agua de la muestra. Sin embargo, se estima posible comparar sus resultados con los ensayos no saturados, debido a la buena concordancia entre la medida local y la global observada en los ensayos de consolidación isótropa bajo condiciones saturadas.

En cada una de las curvas mostradas en la Figura 6.15 y la Figura 6.16 se presenta una pequeña caída vertical que corresponde al período de estabilización realizado después de finalizar la trayectoria de consolidación isótropa, y es debida a la falta de disipación total de la presión de poro y homogenización de la succión durante la rampa de consolidación. El período de

estabilización se realiza con el fin de asegurar condiciones estables en el espécimen antes de realizar la etapa posterior del ensayo. El procedimiento seguido y duración del período de estabilización es descrito en el Capítulo 5. En el ensayo I2 se realizó una rampa de descarga y recarga, que fue acortada (resultando una pequeña descarga) debido a la necesidad de acelerar la terminación del ensayo antes de que llevaran a cabo operaciones de mantenimiento de las instalaciones eléctricas del laboratorio.

La evolución presentada por el índice de poros muestra claramente la existencia de una zona pseudoelástica (asociada con procesos reversibles) y una zona post-fluencia en todos los ensayos. En este estudio experimental los resultados son analizados con base a modelos elastoplásticos, por lo que es necesario determinar la tensión de fluencia que defina el límite entre ambas zonas. La tensión media neta de fluencia p_0 puede ser identificada con claridad en los ensayos SI1 e I3 (bajo succión de 0 y 10 kPa respectivamente) por el marcado cambio de pendiente de la curva continua de índice de poros contra el logaritmo de la tensión neta media, pero el cambio se da en forma progresiva en los ensayos I1 e I2 (bajo succión de 600 y 100 kPa respectivamente) conduciendo a una suave transición de la zona pseudoelástica a un comportamiento elasto-plástico. En estos últimos casos la determinación de la tensión de fluencia es más difícil.

Debido que en este estudio se realizaron variadas trayectorias de tensión (isótropa y anisótropa) y al cambio de pendiente progresivo observado en algunos ensayos, se usaron diversos criterios para determinar las tensiones de fluencia p_0 : a) Método de Casagrande en el espacio ε_v -log $p-u_a$; b) Por medio de la intersección de la extrapolación lineal de la recta κ en la zona elástica y la recta $\lambda(s)$ en la zona plástica, en el espacio ε_v -log $p-u_a$ (Cui, 1993; y Barrera, 2002) y c) la intersección de la extrapolación lineal de la recta en la zona elástica y la línea en la zona plástica, en el espacio W - log $p-u_a$, donde W es el trabajo desarrollado (similar a Graham. et al., 1983; pero usando el incremento de trabajo desarrollado sobre un suelo no saturado y graficándolo con log $p-u_a$ en el eje de las abscisas).

El incremento de trabajo desarrollado por unidad de volumen inicial sobre un suelo saturado ensayado en un triaxial es $\delta W = p' \delta \varepsilon_v + q \delta \varepsilon_s$, donde p' es la tensión media efectiva y q es la

tensión de corte (desviador). Por otra parte, el incremento de trabajo desarrollado sobre un suelo no saturado por unidad de volumen inicial debido a la aplicación de un tensión media neta bajo condiciones de tensión isotrópica y de una succión matricial (u_a-u_w) (considerando las fases sólida y líquida incomprensibles, y despreciando el trabajo positivo requerido para comprimir la fase de gaseosa al asumir que se usará la técnica de traslación de ejes con presión de aire constante bajo condiciones $\delta u_a=0$, como es el caso de este trabajo experimental) está expresado por:

$$\delta W = (p-u_a)\delta\varepsilon_v - (u_a-u_w)\delta e_w / (1+e) \quad (\text{Romero y Vaunat, 2000}). \quad (6.2)$$

Por lo tanto, el incremento de trabajo desarrollado sobre un suelo no saturado por unidad de volumen inicial, ensayado en un equipo triaxial es:

$$\delta W = (p-u_a)\delta\varepsilon_v + q\delta\varepsilon_s - (u_a-u_w)\delta e_w / (1+e) \quad (6.3)$$

En la Figura 6.17 se presentan las graficas del trabajo desarrollado por unidad de volumen de la muestra W (igual a $\Sigma\delta W$ ó $\int(\delta W)$) con la tensión media neta, $p-u_a$, durante las trayectorias de consolidación isotrópica bajo succión controlada de 10, 100 y 600 kPa.

En la Tabla 6.5 se muestran los valores de la tensión de fluencia en cada succión, determinados usando los criterios mencionados anteriormente. No son muy diferentes los valores de p_0 determinados por distintos criterios, presentando la mayor diferencia el ensayo I1 ($s=600$ kPa) donde el cambio de pendiente es más suave. En especial, los valores obtenidos son muy parecidos, en los ensayos SI1 ($s=0$ kPa) e I3 ($s=10$ kPa) donde existen cambios de pendiente más bruscos.

Tabla 6.5 Tensión de fluencia en $s=0, 10, 100$ y 600 kPa; utilizando diversos criterios.

Ensayo	Succión matricial	Tensión de fluencia, p_0		
		Método Casagrande $\log(p-u_a)-\varepsilon_v$	Intersección de líneas en el espacio, $(p-u_a)-\varepsilon_v$	Intersección de líneas en el espacio, $(p-u_a)-W$
SI1	0	13	14	---
I3	10	52	51	50
I2	100	110	106	112
I1	600	195	172	210
IW	100	105	92	107

La Figura 6.18 muestra valores de tensión de fluencia contra la succión matricial. Los valores considerados fueron los determinados por medio del Método de Casagrande (extraídos de la Tabla 6.5). En la figura se observa, tal como era esperado, que el valor de la tensión de fluencia es mayor cuando la succión matricial es más alta, acorde con el modelo elastoplástico de Alonso et al. (1990). Las tensiones de fluencia en succión matricial de 100 kPa, determinados en los ensayos I2 e IW, muestran una pequeña diferencia de 5 kPa, lo que sugiere nuevamente que el proceso de compactación genera muestras muy repetibles.

El comportamiento post-fluencia observado por la variable e puede ser asociado con el movimiento de la curva de fluencia LC (loading-collapse). La Figura 6.18 muestra una curva de fluencia LC que ajusta bien los valores de tensión de fluencia determinados a distintas succiones. Esta curva de fluencia LC fue obtenida con el modelo formulado por Alonso et al. (1990), usando los parámetros que se presentan en la Tabla 6.6. La forma de ésta curva concuerda con evidencias experimentales presentadas por otros autores (Cui y Delage, 1996; Rampino et al., 1999; Barrera, 2002; Mancuso et al., 2002; Sivakumar et al., 2006).

Tabla 6.6 Parámetros del modelo utilizados en la obtención de la Curva LC.

$\lambda(0)$	p_0^* (kPa)	β (1/MPa)	r	p_c (kPa)
-0.21	20	20.1	0.82	2×10^{-3}

Se determinó una sola curva de fluencia correspondiente al estado final de compactación de la muestra. Las trayectorias de consolidación isótropa, con excepción del ensayo I1, se realizaron sobre muestras que no presentaron importantes cambios volumétricos de hinchamiento y permanecieron dentro de la región elástica durante la etapa de equilibrio (mojado). En estos casos la LC correspondiente al final de la compactación no es movida por las trayectorias de equilibrio (Mancuso et al., 2002). Podría decirse que estas trayectorias de consolidación isótropa se efectuaron sobre muestras que poseen, con escasa diferencia, el mismo arreglo de partículas (fábrica) al inicio de la trayectoria, y por lo tanto los cambios en la tensión de fluencia en cada ensayo solo podría ser atribuido a la succión matricial aplicada (y contenido de agua).

Por otra parte, la tensión de fluencia para una succión matricial de 600 kPa, obtenida en el ensayo I1, podría formar parte de una diferente curva LC, por lo cual se encuentra ligeramente desplazada hacia la derecha de la curva LC correspondiente al final de la compactación. Esto puede ser explicado mediante el modelo formulado por Alonso et al. (1990). En este ensayo I1, durante la etapa de equilibrio (al aplicar una succión matricial de 600 kPa el suelo experimentó una contracción (irreversible), por secado, de $\varepsilon_v=0.837\%$, que genera el endurecimiento de la muestra. En este caso, el suelo podría haber sufrido deformaciones plásticas irreversibles por incremento de succión, asociadas con el desplazamiento de la curva de fluencia SI (Alonso et al., 1990). Esto podría causar el correspondiente desplazamiento de la curva de fluencia LC desde su posición al final de la compactación a una nueva.

Puede observarse un cambio brusco en el valor de la tensión de fluencia entre las succiones de 0 y 10 kPa (de $p_0=16$ kPa a 52 kPa). Esto podría ser debido al efecto del grado de saturación, S_r , sobre la compresibilidad de muestra, al poseer un $S_r=100\%$ en $s=0$ kPa y un $S_r=47.2\%$ en $s=10$ kPa, aunque no se tienen suficientes valores para aseverarlo. En este caso, la muestra en $s=10$ kPa tiene todavía un gran número de poros inter-agregados no saturados, y por lo tanto podría presentar un gran cantidad de meniscos de agua que serían totalmente eliminados cuando la muestra alcanza la saturación total. La eliminación de meniscos en los contactos de los agregados reduce las tensiones inter-agregados y la resistencia al corte entre contactos. Gallipoli et al (2003) presenta un modelo elasto-plástico donde incorpora el efecto del grado de saturación.

La curva LC modelada para el estado final de la compactación sugiere que la succión matricial tiene poca influencia sobre valores de tensión de fluencia, p_0 , en altos valores de succión. Aunque se requieren más ensayos para aseverar esto, lo anterior es consistente con el argumento de que el agua en altas succiones es tomada primariamente por los poros intra-agregados presentes en las partículas individuales. Para la muestra ensayada, al inicio de las trayectorias de consolidación, la zona de succión gobernada por poros intra-agregados puede ser delimitada de la gobernada por poros inter-agregados en una succión de 340 kPa (sugerida en capítulo 4 con base a la curva de retención estimada de los datos de pruebas de Porosimetría por Intrusión de Mercurio PIM). Esto es consistente con la curva LC determinada, donde se hace totalmente vertical a partir de aproximadamente 300 kPa.

Para cada curva de consolidación isótropa en distinta succión matricial (véase Figura 6.16 y Figura 6.17) se presenta una línea de compresión normal (rama de compresión noval) que puede ser expresado por la ecuación lineal 6.1 mostrada en el apartado 6.3.1. La pendiente de la línea de compresión normal $\lambda(s)$ y la compresibilidad en el rango elástico $\kappa(s)$ para los distintos ensayos se presenta en Tabla 6.7

Tabla 6.7 Pendientes de la línea de compresión normal $\lambda(s)$ y de compresibilidad en el rango elástico $\kappa(s)$ para los distintos ensayos.

Ensayo	s (kPa)	κ (s)	$\kappa(s)$
SI1	0	-0.013	-0.11
I3	10	-0.004	-0.18
I2	100	-0.003	-0.15
IW	100	-0.004	-0.16
I1	600	-0.003	-0.14
SI2*	0	-0.003	-0.11

*Ensayo con colapso volumétrico durante la etapa de saturación.

Puede observarse que las pendientes de la línea de compresión normal $\lambda(s)$ determinadas son función de la succión matricial, disminuyendo la pendiente a medida que la succión es incrementada (en succiones arriba de 10 kPa), pero inexplicablemente la pendiente $\lambda(s)$ cae drásticamente al reducirse la succión a cero (en las muestras saturadas). Adicionalmente, la pendiente $\lambda(s)$ en $s=10$ kPa puede tender a cruzar a la línea $\lambda(s)$ en $s=0$. Lo anterior es inconsistente con el modelo propuesto por Alonso et al. (1990) y con los resultados de Mancuso et al. (2002) y Rampino et al. (1999); pero es consistente con los resultados encontrados por Sivakumar (1993). Aunque las deformaciones volumétricas de las muestras saturadas son obtenidas con medidas globales en el equipo triaxial convencional, a diferencia de las medidas locales usadas en muestras parcialmente saturadas, el error originado sobre la pendiente $\lambda(s)$ en succión cero no se considera suficientemente grande para revertir la tendencia descrita arriba.

En la Figura 6.16, que muestra resultados del ensayo I2, se observa que no existe una gran diferencia entre la pendiente $\lambda(s)$ determinada usando medidas locales y la $\lambda(s)$ estimada usando medidas globales (con perfiles de la muestra obtenidos de sensores láser). Por ejemplo, en la consolidación isótropa en 100 kPa (ensayo I2, mostrado en la Figura 6.16), la pendiente $\lambda(s)$ con medidas locales es de -0.15 mientras que $\lambda(s)$ con medidas globales es de -0.16.

Las pendientes de compresibilidad en el rango elástico $\kappa(s)$ para los distintos ensayos no presentan cambios notables, a excepción del ensayo SI1 (muestra ensayada a succión cero, y no colapsada durante la saturación). Como se menciona anteriormente, en el ensayo SI1 la línea de compresibilidad en el rango elástico es muy corta lo que podría influir en la determinación del valor muy alto de la pendiente. Sin embargo, para las muestras ensayadas en succión cero pero que colapsaron durante la saturación, las pendientes $\kappa(0)$ tienen valores semejantes a los de los ensayos no saturados (como en el ensayo SI2, mostrado en la Tabla 6.7). Lo anterior sugiere que la pendiente $\kappa(s)$ no se ve afectada de forma apreciable por la succión matricial.

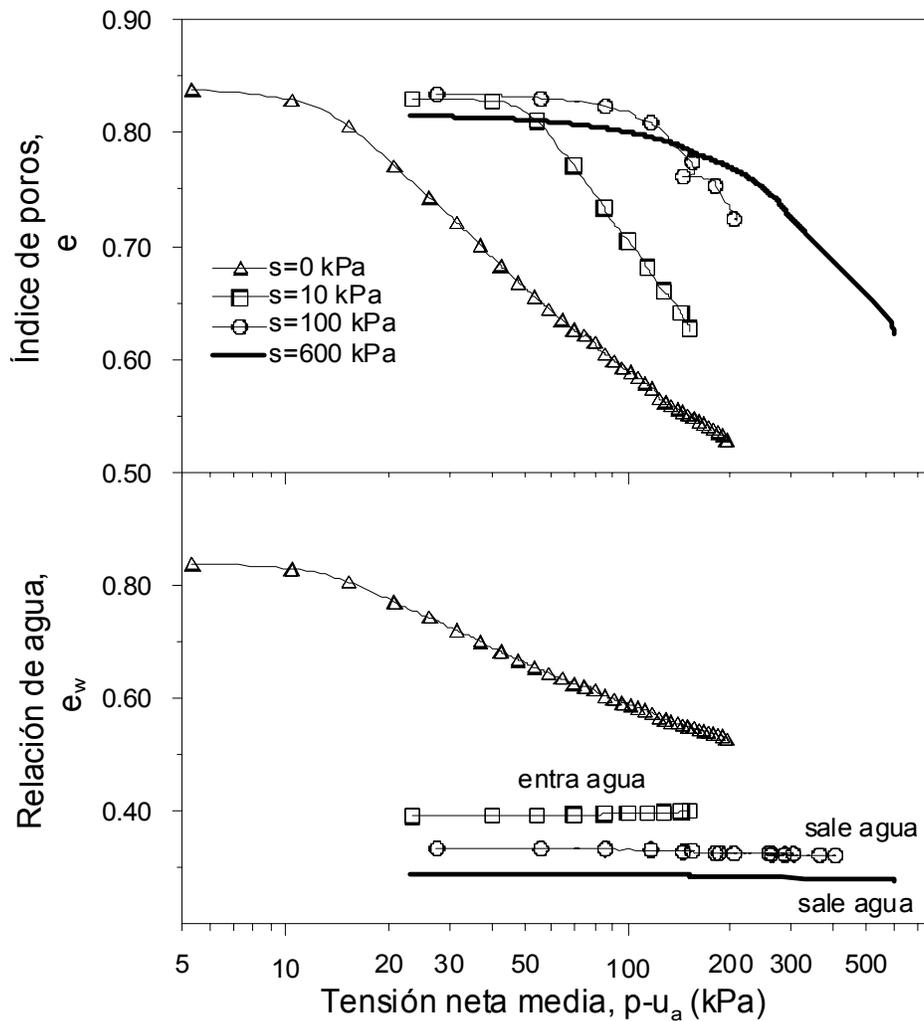


Figura 6.15 Variación del índice de poros y relación de agua del suelo durante las trayectorias de consolidación isotrópica, bajo condiciones saturadas ($s=0$) y no saturadas ($s= 10, 100$ y 600 kPa) de la muestra.

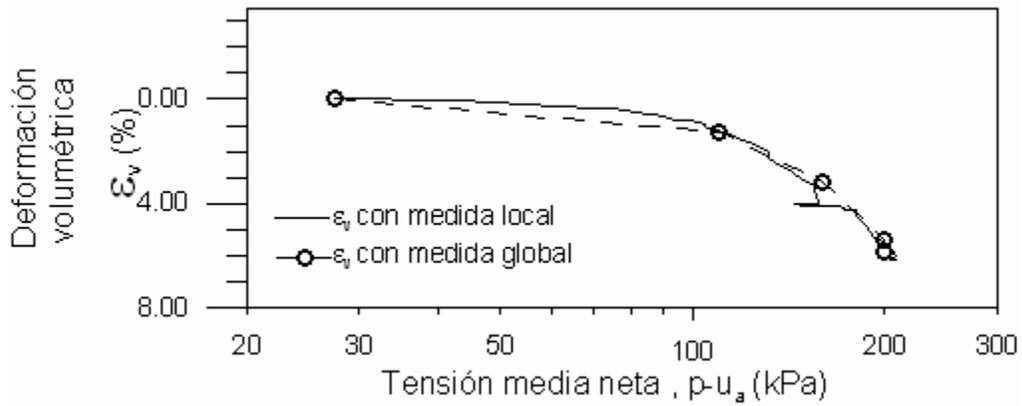


Figura 6.16 Deformación volumétrica de la muestra obtenida con medidas local y global, durante la trayectoria de consolidación isotrópica bajo condiciones succión matricial de $s=100$ (ensayo I2).

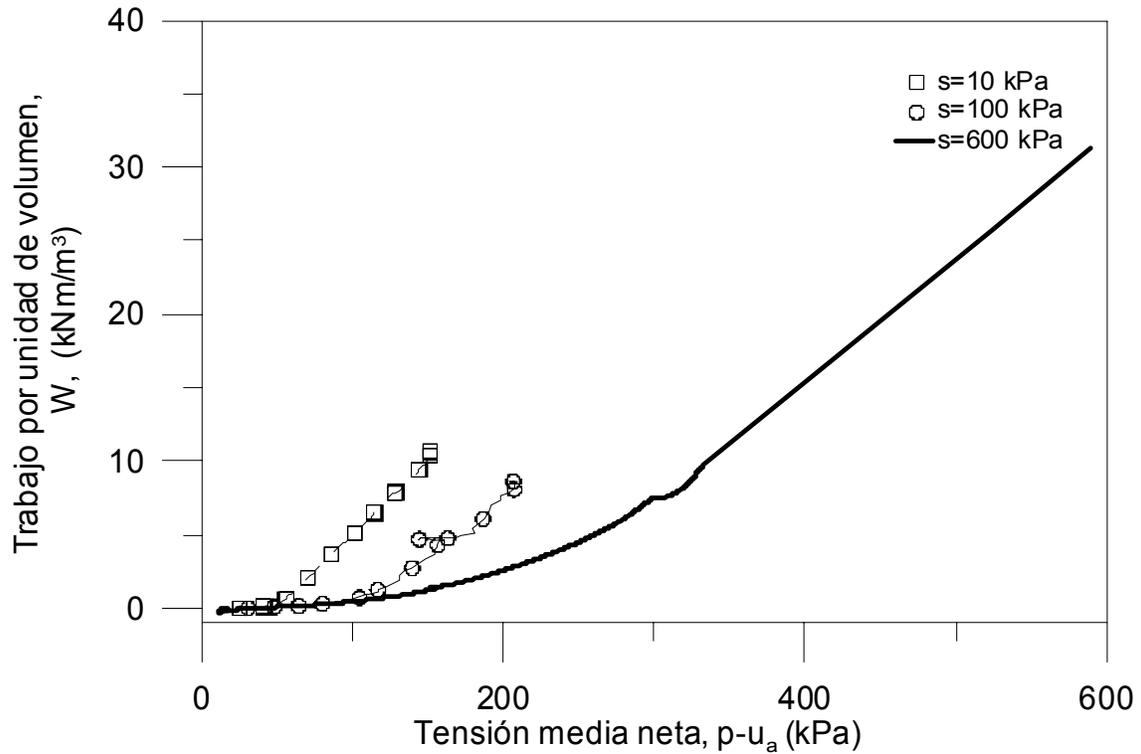


Figura 6.17 Trabajo desarrollado por unidad de volumen de la muestra durante las trayectorias de consolidación isotrópica bajo succión controlada de 10, 100 y 600 kPa.

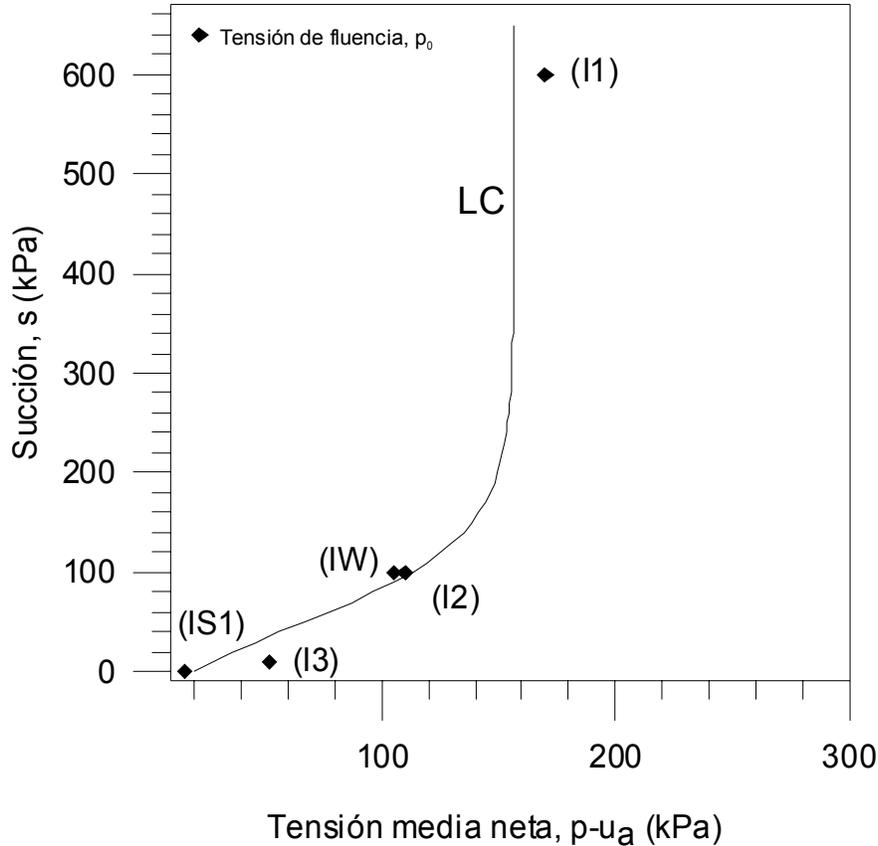


Figura 6.18 Curva fluencia LC producido por la compactación inicial.

6.3.2.3 Cambios de deformación de corte.

La Figura 6.19 la muestran la variación las deformaciones (axial ϵ_a , radial ϵ_r , volumétrica ϵ_v y de corte ϵ_s) y la relación entre incrementos de deformación plástica de corte y deformación volumétrica ($\delta\epsilon_s/\delta\epsilon_v$) de la muestra con la tensión media neta ($p-u_a$) en escala logarítmica, durante la consolidación cuasi-continua bajo succión controlada.

En esta figura se observa que en todas las trayectorias las deformaciones radiales son mayores que las axiales, apartándose de un comportamiento isótropo bajo la aplicación de compresión isótropa. De acuerdo a lo anterior, las deformaciones de corte, ϵ_s , generadas en las trayectorias son siempre de signo negativo ($\epsilon_s=2(\epsilon_a -\epsilon_r)/3$). Estas deformaciones de corte son pequeñas en el rango elástico y se ven incrementadas después de sobrepasar la tensión de fluencia específica para cada succión. En un material isótropo es de esperar que el incremento de la deformación de corte ($\delta\epsilon_s=2(\delta\epsilon_a-\delta\epsilon_r)/3$) sea igual a cero (con $\delta\epsilon_a=\delta\epsilon_r$). Sin embargo, al considerar la relación

entre incrementos de deformación de corte y deformación volumétrica ($\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$), originados en una compresión isotrópica, como un parámetro para conocer el grado de anisotropía de un suelo, se observa que tienden a estabilizarse alrededor de un valor que llega a ser menor a -0.10. En el caso del ensayo I1 ($s=600$ kPa) se estabiliza en un valor muy cercano a cero, sugiriendo que se alcanza un estado de deformación cercanamente isotrópico.

Es posible observar la influencia de la succión sobre la anisotropía de la muestra compactada analizando el comportamiento mecánico de los ensayos I2 ($s=100$ kPa), I3 ($s=10$ kPa) y SI1 ($s=0$ kPa). Estas trayectorias de consolidación isotrópica se realizaron sobre muestras que no presentaron importantes cambios volumétricos de hinchamiento y permanecieron dentro de la región elástica durante la etapa de equilibrio, y por lo tanto son muestras que mantienen un arreglo de partículas (fábrica) muy cercano al estado final de la compactación pero poseen diferente succión y contenido de agua. En la Figura 6.20, Figura 6.21 y Figura 6.22 se observan las relaciones $\varepsilon_a-\varepsilon_r$, $\varepsilon_s-\varepsilon_v$ y la evolución $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ con $(p-u_a)$. Los resultados obtenidos sugieren que un comportamiento más cercano al isotrópico (ε_a más cercano a ε_r , y ε_s más pequeño con respecto a ε_v) a medida que la succión decrece.

Sin embargo, los valores de la relación $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ observados sobre tensión de fluencia en los ensayos con succión de 0 kPa y 10 kPa (ensayos SI1 e I3 respectivamente) son muy cercanos (-0.082 y -0.114 respectivamente). En los ensayos I2 e IW, con una succión de 100 kPa, se presenta una mayor diferencia con respecto a los ensayos con succión de 0 kPa y 10 kPa, con valores de $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ es de -0.206 y -0.214 (véase la Tabla 6.8), lo que sugiere una ligeramente mayor anisotropía transversal en la muestra. En estos últimos ensayos con $s=100$ kPa, en la zona de fluencia, la relación $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ cambia y aumenta rápidamente.

Tabla 6.8 Relación $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ sobre la tensión de fluencia y la final de la trayectoria.

Ensayo	s (kPa)	En la Tensión de fluencia		Al final de la trayectoria	
		$p-u_a$	$\delta\varepsilon_a/\delta\varepsilon_r$	$p-u_a$	$\delta\varepsilon_a/\delta\varepsilon_r$
SI1	0	13	-0.082	200	0.004
I3	10	52	-.114	150	-.076
I2	100	110	-.206	200	-.121
IW	100	105	-.214	200	-.116
I1*	600	195	-0.095	600	-.003

*En el ensayo I1 la muestra experimentó una contracción volumétrica por secado durante la etapa de equilibrio.

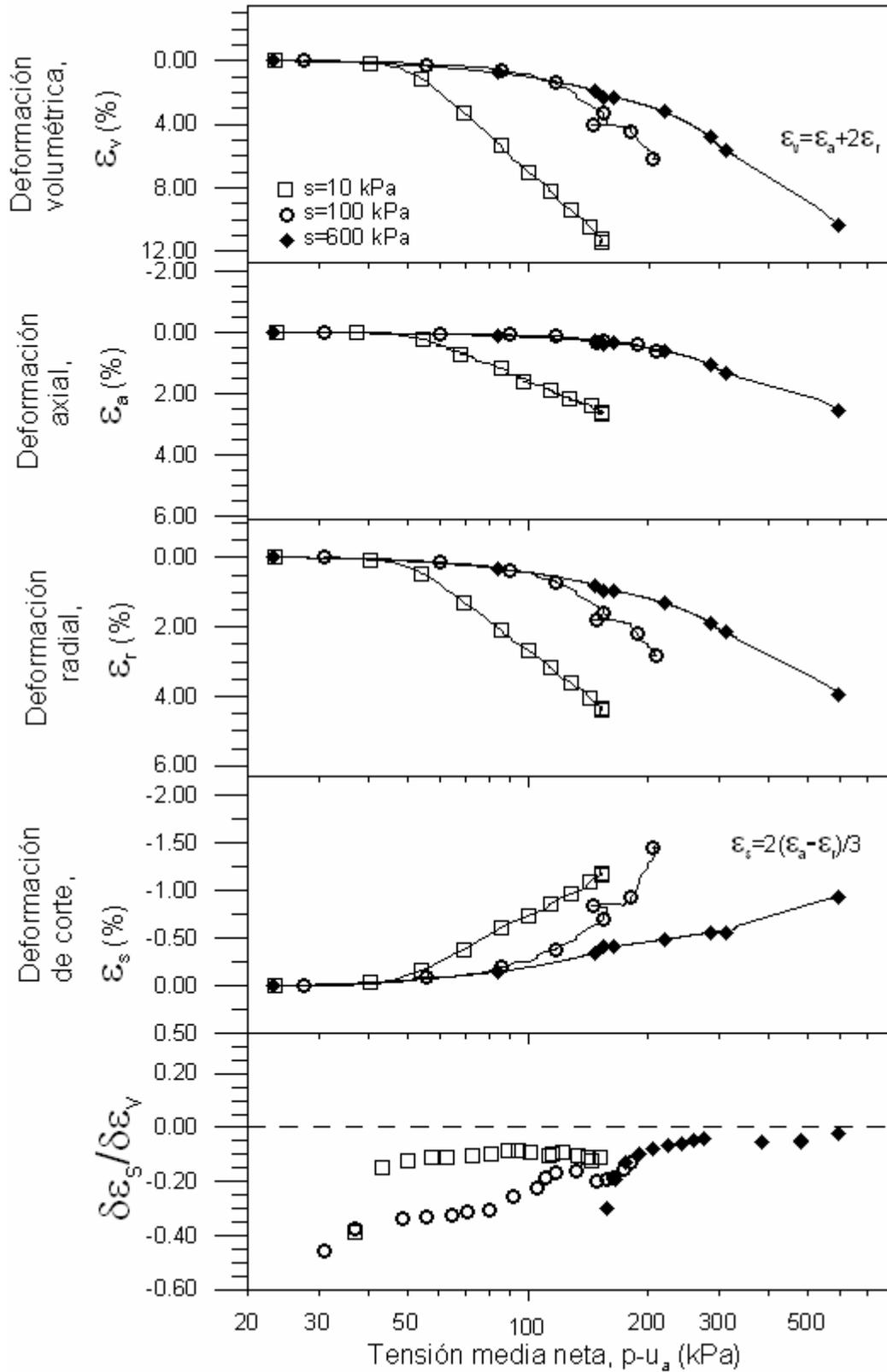


Figura 6.19 Variación de las deformaciones del suelo durante las trayectorias de consolidación isotrópica, bajo condiciones no saturadas ($s= 10, 100$ y 600 kPa).

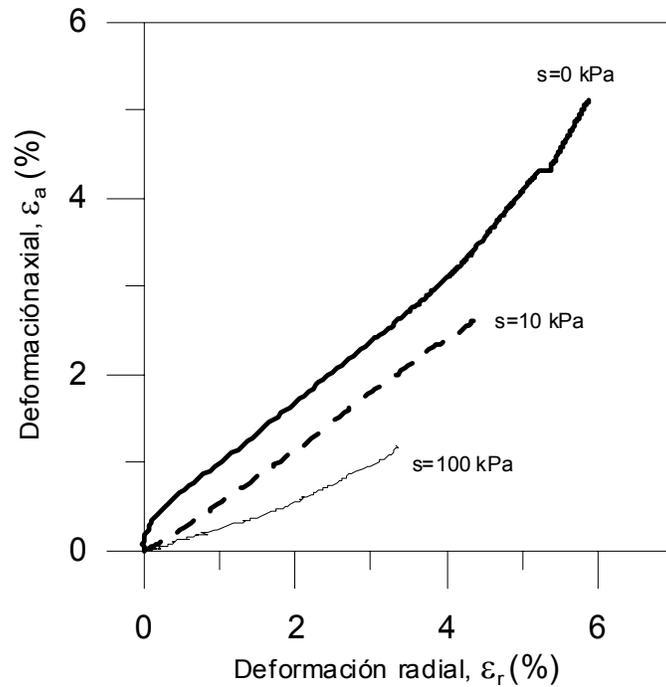


Figura 6.20 Relación de la deformación axial con la deformación radial durante las trayectorias de consolidación mediante rampa de incremento de presiones, bajo condiciones parcialmente saturadas de la muestra.

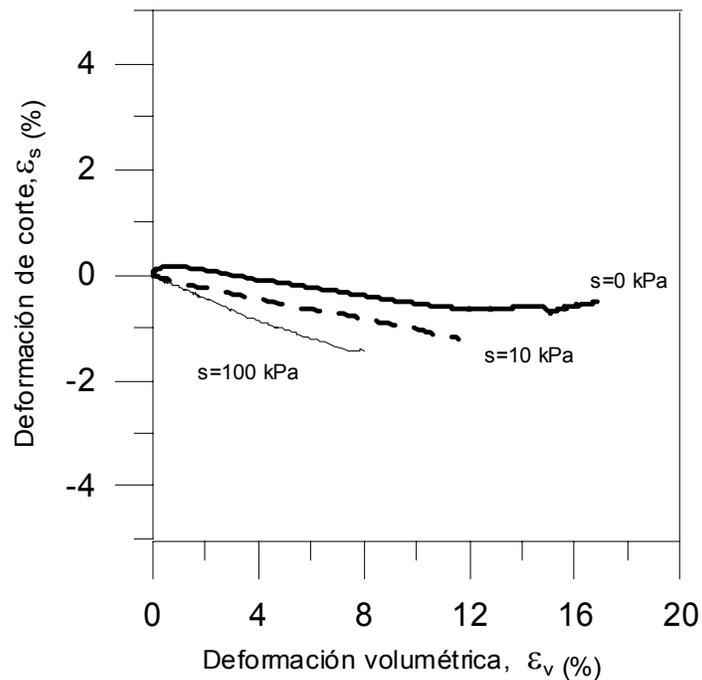


Figura 6.21 Relación de la deformación de corte con la deformación de volumétrica durante las trayectorias de consolidación mediante rampa de incremento de presiones, bajo condiciones parcialmente saturadas de la muestra.

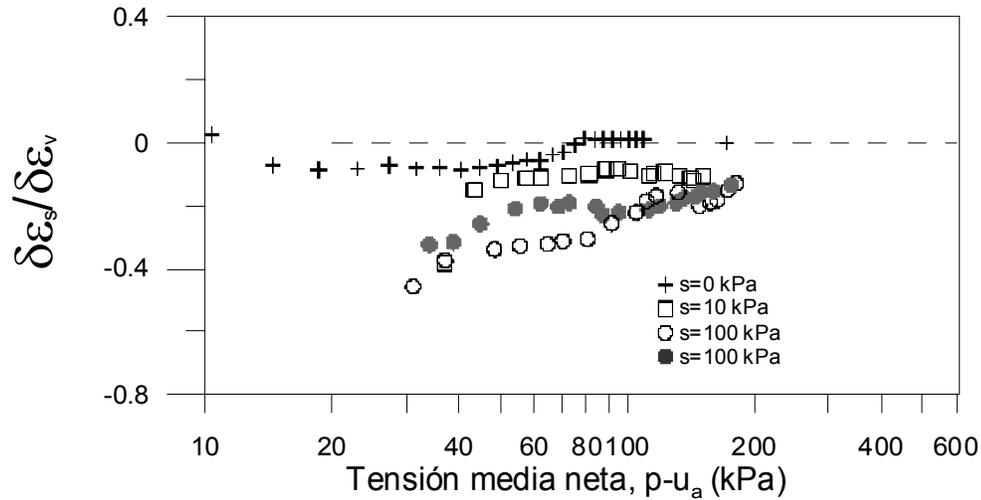


Figura 6.22 Evolución de la relación del incremento de la deformación de corte con el incremento de la deformación de volumétrica durante las trayectorias de consolidación bajo condiciones saturadas y parcialmente saturadas de la muestra.

La relación $\delta\epsilon_s/\delta\epsilon_v$ para 0 kPa y 10 kPa tienden hacia cero a medida que se incrementa ($p-u_a$), y estabilizan sobre valores muy pequeños de $\delta\epsilon_s/\delta\epsilon_v$ (al final de la trayectoria son de -0.004 y -0.076 respectivamente), sugiriendo que alcanzan un comportamiento cercanamente isótropo. Los ensayos con succión de 100 kPa no alcanzan a estabilizarse, finalizando en -0.121 y -0.116. Este patrón de comportamiento puede ser explicado mediante los conceptos de elastoplasticidad en suelos con anisotropía transversal (por ejemplo Wheeler et al., 2003), y donde una trayectoria de incremento de tensión isotropa induce la expansión y rotación de la superficie de fluencia hacia una orientación más isotropa.

En la grafica Figura 6.22 se observa que la relación $\delta\epsilon_s/\delta\epsilon_v$ en el rango elástico en los ensayos con succión de 100 kPa no coinciden pero si lo hacen en la zona elasto-plástica, debido posiblemente a que las imprecisiones originadas al medir pequeñas deformaciones en la zona elástica se ven incrementadas al estimar división entre pequeños incrementos.

6.3.2.4 Cambios de grado de saturación durante las trayectorias de consolidación isotropa.

La Figura 6.23 muestra la evolución con el tiempo de diferentes variables volumétricas del suelos durante las trayectorias de consolidación isotropa ejecutadas bajo succiones matriciales de 600,

100 y 10 kPa (no incluyendo la trayectoria realizada bajo succión matricial igual a cero). Con el fin de observar con mayor claridad los cambios en la relación de agua (e_w) y grado de saturación (e/e_w o S_r), se presentan los resultados amplificados con respecto a los mostrados en la Figura 6.15.

En las trayectorias de consolidación isótropa bajo succiones de 100 y 600 kPa fueron identificados, para todas las variables volumétricas, una tensión de fluencia (p_0) común en los planos $e:\ln(p-u_a)$, $e_w:\ln(p-u_a)$ y $e/e_w:\ln(p-u_a)$. Como en el caso de la variable e , las tensiones de fluencia asociadas con los cambios de e_w y e/e_w (S_r), también, son mayores al incrementarse la succión matricial. En estas trayectorias, el grado de saturación tiende a incrementarse sobre el rango post-fluencia del estado de tensiones, como consecuencia de una mayor eficiencia de la tensión media neta para deformar el esqueleto del suelo (reducción del volumen de los macroporos) que para expulsar agua de los macroporos (véase la Tabla 6.9). Los cambios de grado de saturación detectados no fueron significativos en el rango elástico de las trayectorias de tensiones. Estos resultados experimentales siguieron similares tendencias a las reportadas por Rampino et al. (1999, 2000).

La misma Figura 6.23 y la Tabla 6.9 muestran una clara tendencia de incremento de la relación de agua, e_w , durante la consolidación isótropa en $s = 10$ kPa. En este caso, el aumento importante en el grado de saturación fue asociado con dos mecanismos: la deformación del esqueleto del suelo debido su alta compresibilidad post-fluencia (reducción de los macroporos) y a la entrada de agua en los macroporos. El segundo mecanismo fue consecuencia de una reducción importante del volumen y tamaño de los macroporos, sobre el suelo de muy baja densidad, al aplicarse la tensión isótropa. Esta nueva geometría de poros tuvo mayor capacidad de retención de agua, debido al más alto valor de oclusión de aire en la rama de mojado de la curva de retención, inducido por la reducción del índice de poros (véase el capítulo 4). Sivakumar (1993) presentó resultados de ensayos que muestran también la entrada de agua durante una rampa de consolidación isótropa.

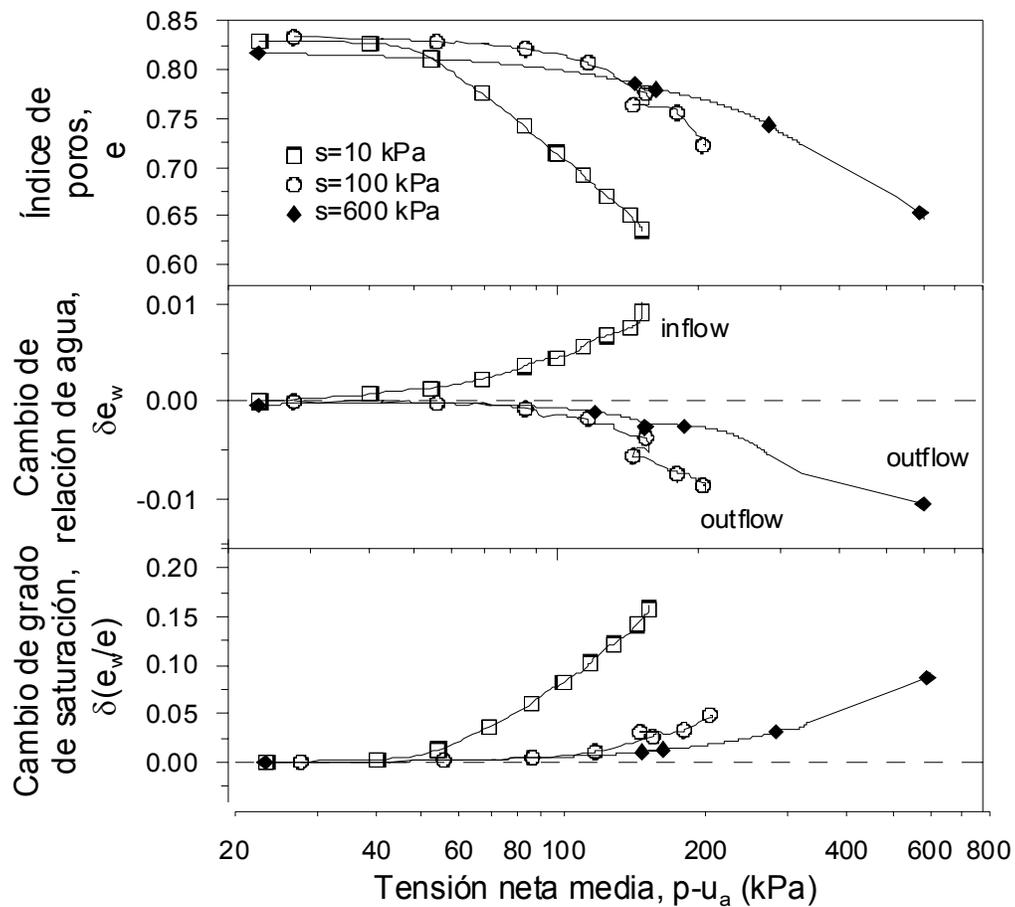


Figura 6.23 Gráfica ampliada de la variación del índice de poros, cambio de relación de agua y cambio del grado de saturación de la muestra, durante las trayectorias de consolidación isotrópica bajo succión controlada de 10, 100 y 600 kPa.

Tabla 6.9 Condiciones iniciales y finales en la etapa de consolidación isotrópica en los ensayos no saturados.

Ensayo	Final de etapa de equilibrio					Final de etapa de consolidación isotrópica				
	e_0	e_{0w} ($w_0, \%$)	Sr_0 (%)	$p-u_a$ kPa	u_a-u_w kPa	e	e_w ($w, \%$)	Sr (%)	$p-u_a$ kPa	u_a-u_w kPa
I1	0.816	0.288 (10.6)	35.4	23	600	0.647	0.278 (10.3)	44.7	600	600
I2	0.834	0.324 (12.0)	40.0	23	100	0.721	0.320 (11.8)	44.2	200	100
I3	0.830	0.392 (14.5)	47.2	23	10	0.629	0.405 (14.9)	65.2	150	10

El comportamiento hidromecánico acoplado, resultante en los ensayos, puede ser interpretados usando el modelo de curvas de retención limitantes (bounding retention curves) propuesto por Vaunat et al. (2000), el cual separa un dominio de estados posibles de los no posibles en el plano relación de agua (o contenido de agua): succión, y explican los cambios de humedad observados al aplicar la consolidación isótropa.

La respuesta hidráulica fue graficada en el plano $e_w: \log(s)$ en la Figura 6.24. En esta figura las curvas de retención principales de mojado y secado para el estado final de compactación ($e_f=0.75-0.82$) son las indicadas por MC_{D1} (curva principal para reducción de succión) y MC_{I1} (curva principal para incremento de succión), siguiendo la misma nomenclatura que en el modelo hidro-mecánico propuesto por Vaunat et al. (2000). Estas curvas principales de mojado y secado (bounding wetting and drying curves), en índice de poros constante, encierran la región de curvas de retención internas “scanning curves” y separan los estados posibles (dentro de la región) de los imposibles para un suelo específico, a una determinada densidad. Cuando el suelo experimenta una reducción en el volumen de los macroporos, generado por acciones mecánicas, la forma de esas curvas cambian (MC_{D1} a MC_{D2} y MC_{I1} a MC_{I2} , como se muestra en la Figura 6.24), incrementando sus valores de entrada de aire en secado y su valor de oclusión de aire en mojado, y la reducción de la capacidad de almacenamiento de agua (relación de agua) en el estado saturado (Romero y Vaunat, 2000; Karube y Kawai, 2001). Debido a esto, se considera que la curva de retención en el rango de bajas succiones, como una función de la relación de agua, es altamente dependiente del índice de poros.

En la Figura 6.24 las curvas principales de secado son graficadas usando el modelo de Van Genuchten (1980) (las ecuaciones han sido presentadas en el capítulo 4), para dos diferentes densidades del suelo. Estas curvas se aproximan a datos experimentales de curvas de retención (en aproximadamente volumen constante) obtenidas a partir de los ensayos EDO1 y el ensayo EDO2 presentados en el capítulo 4. Los resultados corresponden a curvas de retención para índice de poros de, aproximadamente, $e \approx 0.75-0.82$ (de EDO1), que representa la condición de final de compactación, y $e \approx 0.54-0.57$ que representa un estado más denso de la muestra. Sin embargo, las curvas principales de mojado, para ambos casos, son graficadas de manera esquemática (ajustando la curva a los datos experimentales disponibles), ya que no se tiene un

buen acuerdo entre las curvas experimentales y el modelo de Van Genuchten (1980), y a la falta de más datos. La comparación entre las curvas de las dos densidades (descrita en el capítulo 4) muestra algunos signos de su dependencia de los índices de poros. Estas diferencias han sido señaladas por Romero y Vaunat (2000) y Kawai et al. (2000). Pero, adicionalmente, presenta una intersección sobre las curvas de mojado principal. La estimación teórica se realizó suponiendo que el camino entre la succión al final de la compactación y las primeras succiones aplicadas sigue una curva scanning (con base a la forma clásica de las curvas de retención), mientras que la siguiente trayectoria de mojado podría ser la curva principal. Otro inconveniente, para obtener las curvas principales con mayor precisión, es la falta de datos en succiones altas. Para atenuar lo anterior, se usan algunos datos experimentales obtenidos en succiones altas por Barrera (2002), usando la técnica psicrométrica.

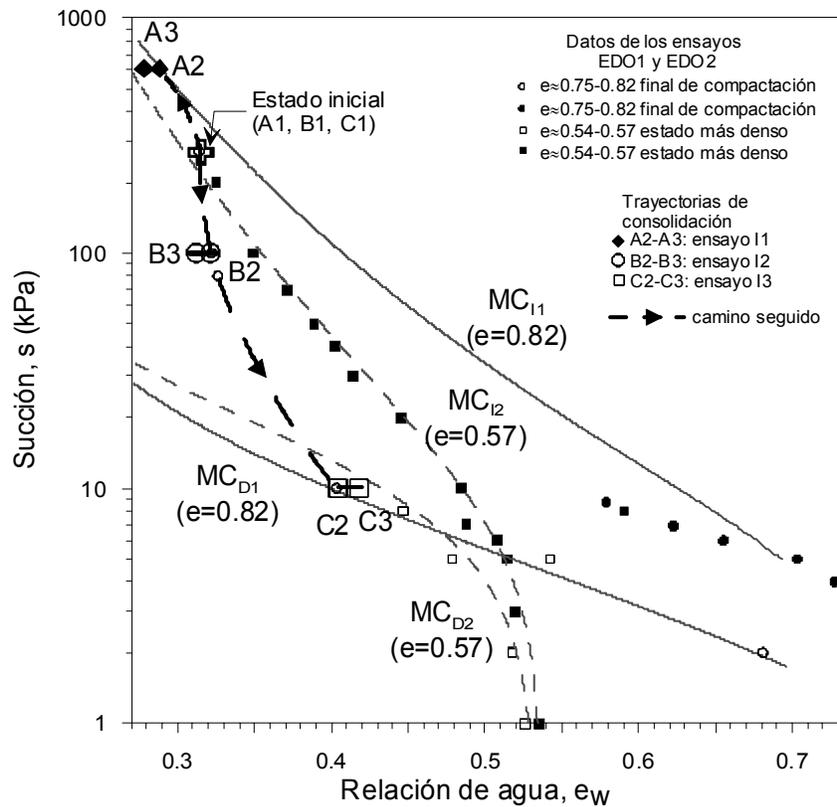


Figura 6.24 Trayectoria seguida en el plano $e_w:\log(s)$. Curvas principales de mojado y secado.

En el primer ensayo en succión alta, de 600 kPa (A1-A2-A3 en la Figura 6.24), el suelo experimenta una reducción de volumen de macroporos en la etapa de equilibrio (contracción A1-A2). Durante el incremento de succión, el estado de la muestra se movió inicialmente sobre una “curva scanning” hasta que la curva MC_{11} fue alcanzada, y después el estado del suelo siguió su movimiento permaneciendo sobre la curva límite (principal de secado). En la trayectoria de consolidación isótropa siguiente (A2-A3), la deformación volumétrica experimentada por el suelo (de $e=0.816$ a 0.647), genera el movimiento de la curva de secado principal desde MC_{11} a (aproximadamente) MC_{12} . Debido a la restricción de que sobre el lado derecho de MC_{12} es una “región imposible”, el estado del suelo no puede permanecer fijo y es empujado hacia la izquierda (trayectoria A2-A3) por el movimiento de la curva de secado principal, causando una pequeña reducción en la relación de agua en succión constante.

En el segundo ensayo en succión media (B1-B2-B3 en la Figura 6.24), los cambios en las curvas de secado y mojado fueron despreciables durante la etapa de equilibrio (B1-B2), debido a que la deformación volumétrica de hinchamiento experimentada por el suelo fue muy pequeña. El estado del suelo durante ésta trayectoria de mojado permaneció dentro de la zona posible, siguiendo una “curva scanning” con un pequeño incremento de la relación de agua. Vaunat et al. (2000) asumió una respuesta reversible dentro de la zona de scanning. Durante la trayectoria de compresión isótropa siguiente B2-B3, el índice de poros disminuyó de $e = 0.834$ a 0.721 , generando un ligero movimiento de las curvas principales. Sin embargo, el estado del suelo permaneció dentro de la zona de scanning entre ambas curvas principales. Dentro de ésta zona, Romero y Vaunat (2000) y Vaunat et al. (2000) asumieron, también, una respuesta reversible de los cambios de la relación de agua en las trayectorias de carga/descarga. La rigidez hidráulica elástica contra cambios de tensión neta propuesta por estos autores predice una reducción de la relación de agua durante la consolidación, la cual fue observada en la trayectoria B2-B3.

En el tercer ensayo realizado en una succión muy baja (C1-C2-C3 en la Figura 6.24), los cambios en MC_{D1} y MC_{11} fueron también despreciables durante la etapa de equilibrio (C1-C2), debido a que el hinchamiento experimentado por el suelo fue pequeño. Tal como resultó en el ensayo previo, el suelo inicialmente siguió una trayectoria elástica sobre una “curva scanning” finalizando en el estado C2, el cual estaba probablemente cerca de la curva de mojado principal

MC_{D1}. Durante la trayectoria de consolidación C2-C3, se desarrollaron deformaciones volumétricas plásticas (de $e=0.830$ a 0.629), las cuales generaron el movimiento de las curvas de mojado principal desde MC_{D1} a (aproximadamente) MC_{D2}. En este caso, es particularmente importante el incremento del valor de aire-oclusión del suelo, debido a la reducción en el diámetro de poro, generado en el proceso de consolidación. Puede observarse que la nueva posición de MC_{D2} intersecta la curva MC_{D1} inicial en $s < 10$ kPa. En la consolidación isótropa, fue asumido que el estado del suelo permanece sobre la curva de mojado principal (bounding wetting curve) y sigue su movimiento. Por lo tanto, debido a la restricción de que sobre el lado izquierdo de MC_{D2} es una “región imposible”, el estado del suelo es empujado hacia la derecha (trayectoria C2-C3) por el movimiento de la curva de mojado principal, causando un incremento en la relación de agua en succión constante.

La Figura 6.24b presenta los resultados de las etapas de equilibrio y consolidación isótropa con succión constante, de los ensayos I1, I2 e I3, representados en los planos $\log(p-u_a)-\log(s)$, $\log(p-u_a)-e$, $\log(s)-e_w$ y $e-e_w$. El punto inicial de la etapa de equilibrio es señalado con la letra A, y la trayectorias seguidas en las etapas de equilibrio y consolidación isótropa son representadas por los tramos A-B y B-C respectivamente. En la figura se observa que en la etapa de equilibrio predominan los cambios de humedad sobre los cambios de índice de poros, y por lo contrario en la etapa de consolidación se presentan grandes cambios en índice de poros con muy pequeñas modificaciones de humedad, incrementándose de manera importante el grado de saturación de las muestras, en especial en el ensayo I1 (con $s=10$ kPa) donde la consolidación con $s=10$ kPa generó una gran reducción del índice de poros acompañada de incremento de humedad.

En esta misma figura se presentan, en los planos $\log(p-u_a)-e$ y $e-e_w$, puntos de fluencia, observados en la consolidación isótropa, con respecto al índice de poros, e (tensiones de fluencia mencionados anteriormente), y con respecto a la relación de agua, e_w . Este último valor se obtuvo en el plano $\log(p-u_a)-e_w$ usando cruce de las líneas existentes antes y después del cambio brusco en la curva. En todos los casos, ambos puntos de fluencia, con respecto a e y e_w , son bastante cercanos, aunque los valores con respecto a e_w se presentan con valores ligeramente menores de índice de poros (y con valores ligeramente mayores de $p-u_a$). Lo anterior sugiere un comportamiento acoplado entre los cambios irrecuperables (en la zona elastoplástica) de e con la salida o entrada de agua de la muestra (aunque de pequeña magnitud), aún cuando el estado del

suelo permaneció dentro de la zona de sacaning entre ambas curvas de retención principales. El posible retraso en la ocurrencia de punto de fluencia con e_w se podría deber al recorrido del flujo de agua desde la parte central de la muestra, donde se generan los mayores cambios, hacia los bordes, donde se efectúan las medidas de cambio de humedad.

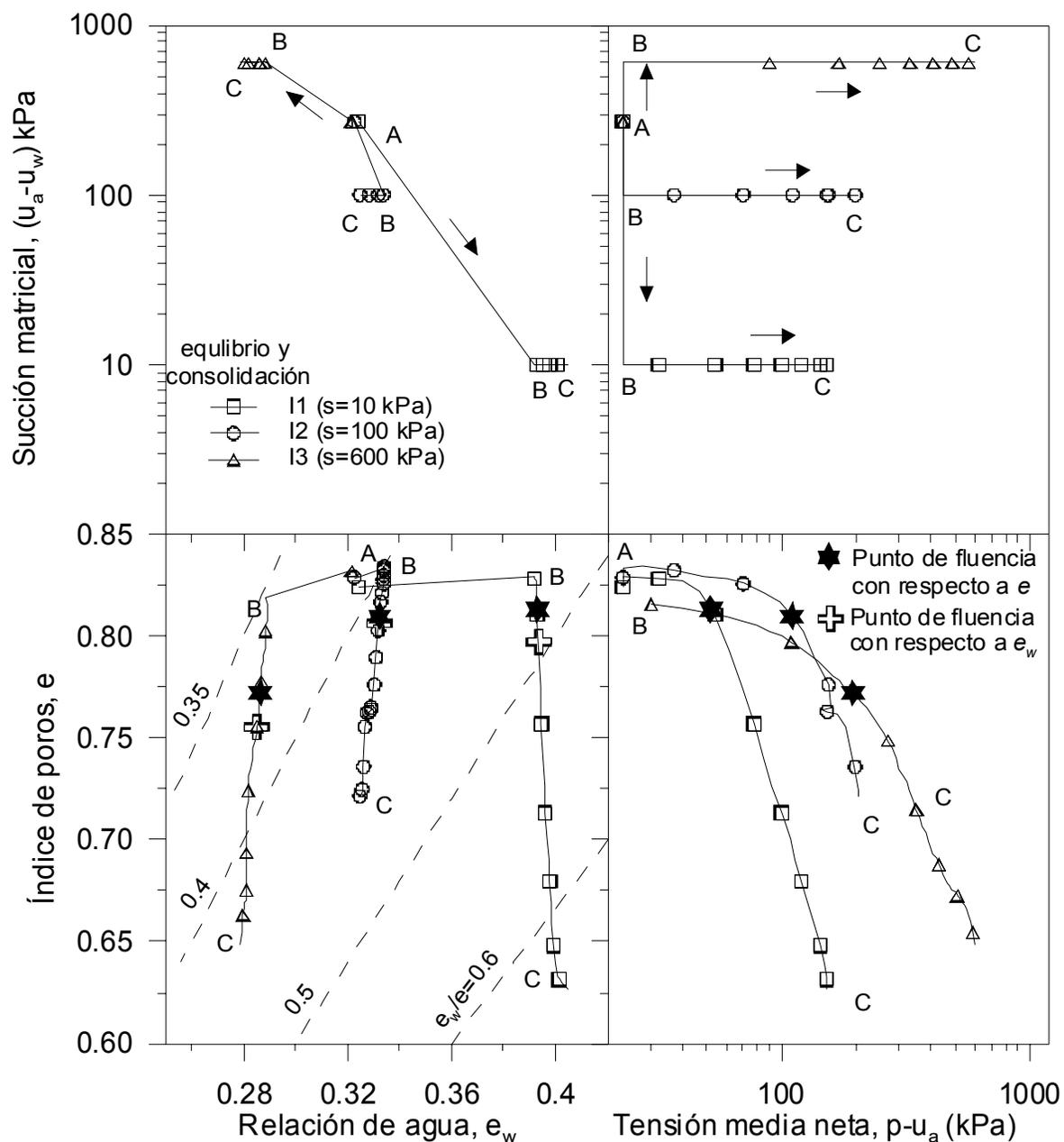


Figura 6.24b Resultados de las etapas de equilibrio y consolidación isotrópica con succión constante, representados en los planos $\log(p - u_a) - \log(s)$, $\log(p - u_a) - e$, $\log(s) - e_w$ y $e - e_w$.

6.4. Consolidación anisótropa bajo succión matricial constante.

6.4.1 Consolidación bajo condiciones saturadas.

6.4.1.1 Descripción de trayectorias.

En un triaxial convencional se realizaron tres ensayos en condiciones saturadas: SA, SM1 y SM2. En los ensayos SA y SM1, después de finalizar la etapa de saturación, se siguieron trayectorias de compresión anisótropa bajo una condición de $\eta = q/p' = 0.86$ (o $K = \sigma_r'/\sigma_a' = 0.45$) y $\eta = q/p' = 0.36$ (o $K = \sigma_r'/\sigma_a' = 0.70$), respectivamente (véase la Tabla 5.4, la Figura 6.25 y la Figura 6.26). La trayectoria de tensiones en el ensayo SA se realizó desde $p' = 10$ kPa hasta alcanzar la tensión media máxima de 263 kPa (referirse al punto B de la Figura 6.25, en el plano (p', q)). En el ensayo SM1 se cargó la muestra hasta alcanzar la tensión media de 200 kPa (referirse al punto B de la Figura 6.26). En estos ensayos la consolidación fue realizada sobre muestras que presentaron deformaciones volumétricas de colapso y de corte durante su saturación.

En el ensayo SM1 (véase la Figura 6.26 y Tabla 5.4), después se siguieron trayectorias de descarga y consolidación adicionales, que serán descritas posteriormente. Para complementar el estudio del efecto de la historia de tensiones sobre el comportamiento mecánico del suelo saturado se realizó el ensayo SM2. En este ensayo se realizan trayectorias de consolidación, descarga y recarga que se muestran en la Figura 6.27.

Para complementar los resultados de los ensayos de consolidación anisótropa, bajo condiciones saturadas, en este apartado se muestran los resultados de la trayectoria de consolidación isótropa del ensayo SI2 realizados en un triaxial convencional. Información adicional de procedimiento del ensayo se ha presentado en el Capítulo 5.

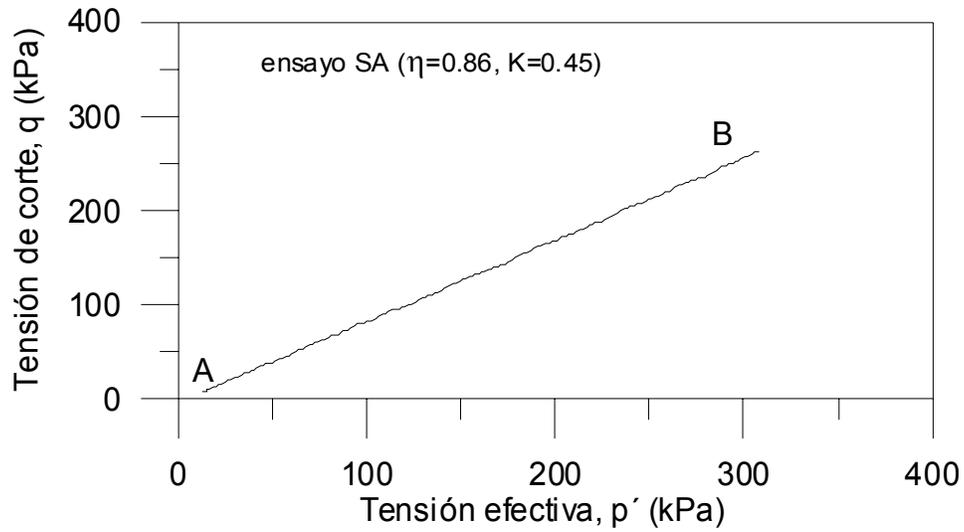


Figura 6.25 Etapa de compresión anisotrópica, en el espacio ($p'-q$), para el ensayo SA.

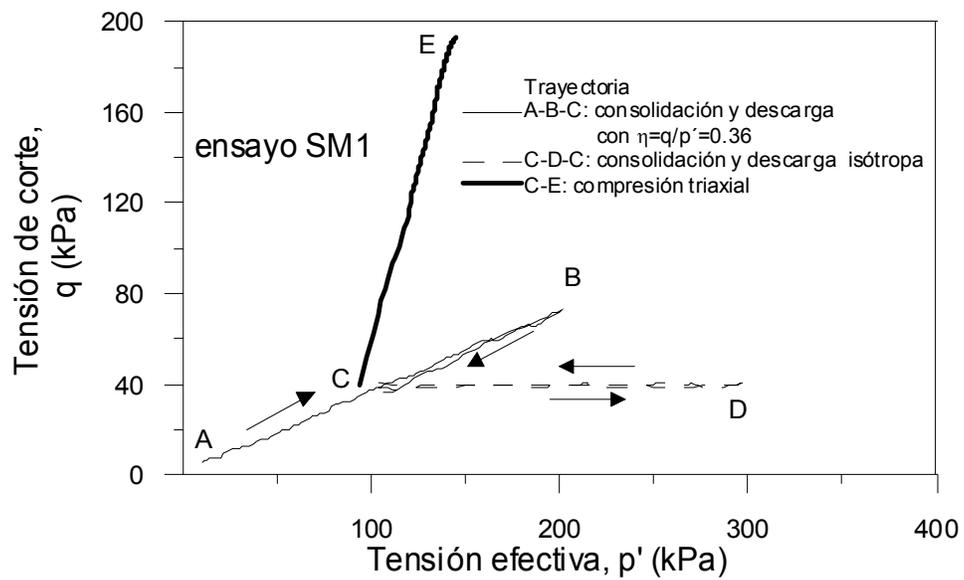


Figura 6.26 Etapas de compresión isotrópica y anisotrópica, y etapa de corte, en el espacio ($p'-q$), para el ensayo SM1.

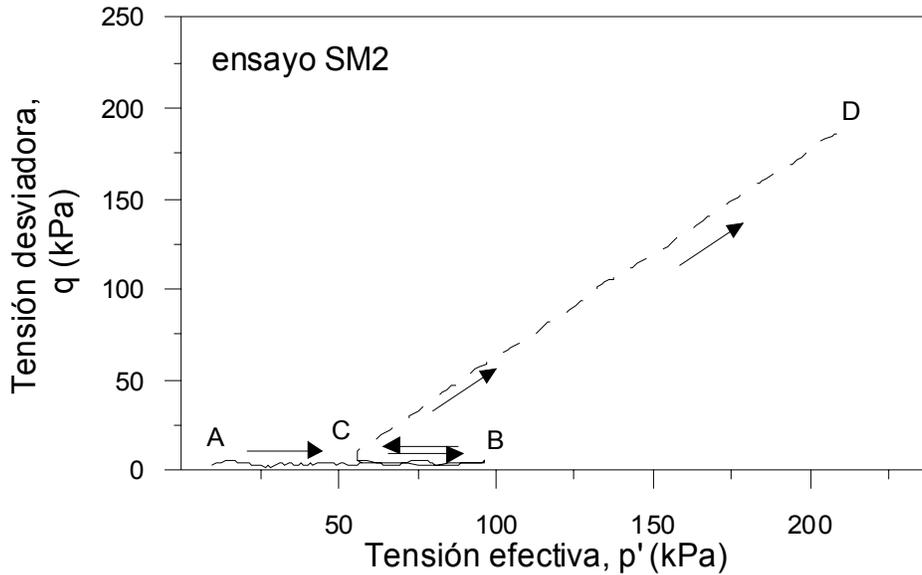


Figura. 6.27 Etapas de compresión isotrópica y anisótropa, y etapa de corte, en el espacio (p' - q), para el ensayo SM2.

6.4.1.2 Características tensión-deformación y tensiones de fluencia.

Los resultados presentados en este apartado (Figura 6.28 y la Figura 5.20) fueron obtenidos de las trayectorias de consolidación anisótropa, bajo condiciones saturadas, de los ensayos SA y SM1. Para complementar el análisis, en este apartado también se presentan los resultados obtenidos de la trayectoria de consolidación isotrópica, bajo condiciones saturadas, del ensayo SI2. Las curvas presentadas corresponden a registros de los resultados obtenidos durante la ejecución de las rampas cuasi-continuas de incremento de presiones. Estas curvas continuas son acompañadas con símbolos espaciados para distinguir los ensayos, pero ellos no corresponden a resultados de escalones de carga espaciados. Estos resultados son analizados en el contexto de modelos constitutivos elasto-plásticos. La trayectoria de consolidación se inició con una tensión media efectiva inicial (p') de 10 kPa. Durante su ejecución se garantizó un incremento de presión intersticial de agua (u_w) menor de 10 kPa.

La Figura 6.28 muestra la variación del índice de poros y deformaciones de la muestra con la tensión media efectiva p' durante la consolidación anisótropa cuasi-continua (con p' en escala logarítmica). La tensión de fluencia (presión de preconsolidación) puede ser identificada con claridad, en todos los ensayos, por los marcados cambios existentes en la pendiente de la curva

continua de índice de poros con el logaritmo de la tensión media efectiva. Puede observarse que la tensión de fluencia puede identificarse, también, en el espacio $p'-\varepsilon_v$ y $p'-\varepsilon_s$ en todos los ensayos, a excepción de la curva en el espacio $p'-\varepsilon_s$ en los ensayos SM1 y SI2 (donde no se observa un cambio brusco en su pendiente). Por lo anterior, se sugiere la existencia de una zona elástica (asociada con procesos reversibles) y una zona post-fluencia en todos los ensayos, delimitada claramente por la tensión de fluencia.

Debido a que en las trayectorias de tensión se realizan cambios simultáneos de la tensión media efectiva, p' , y la tensión de corte, q , se usaron diversos criterios para determinar las tensiones de fluencia p_0 : a) Método de Casagrande en el espacio $e-\log p-u_a$; b) Por medio de la intersección de la extrapolación lineal de la recta κ en la zona elástica y la recta $\lambda(s)$ en la zona plástica, en el espacio $\varepsilon_v-\ln p-u_a$ (Cui, 1993; y Barrera, 2002), c) Localizando el cambio brusco de pendiente, mediante intersección de la extrapolación lineal de las rectas que lo delimitan, en el espacio $\log p-u_a-W$ y $\log q-W$, donde W es el trabajo desarrollado (similar a Cui, 1993; pero usando graficándolo en escala logarítmica en el eje de las abscisas). Debido a que en las trayectorias la relación η es menor o muy cercana al $\eta_0=0.77$ (correspondiente al K_0) registrado durante el proceso de compactación (véase capítulo 4), no se consideró oportuno usar el espacio ε_s-q para determinar las tensiones de fluencia.

Como se describió anteriormente, el incremento de trabajo desarrollado por unidad de volumen inicial sobre un suelo saturado ensayado en un triaxial es $\delta W = p' \delta \varepsilon_v + q \delta \varepsilon_s$. En la Figura 6.29 y Figura 6.30 se presentan las gráficas $\log p-u_a-W$ y $q-W$ de las trayectorias analizadas, donde no se observa un cambio brusco en las pendientes pero puede notarse un cambio de pendiente que es notorio en bajas tensiones. En la gráfica ampliada de $\log p-u_a-W$, Figura 6.29b, puede observarse con mayor detalle el cambio brusco en las pendientes de las curvas.

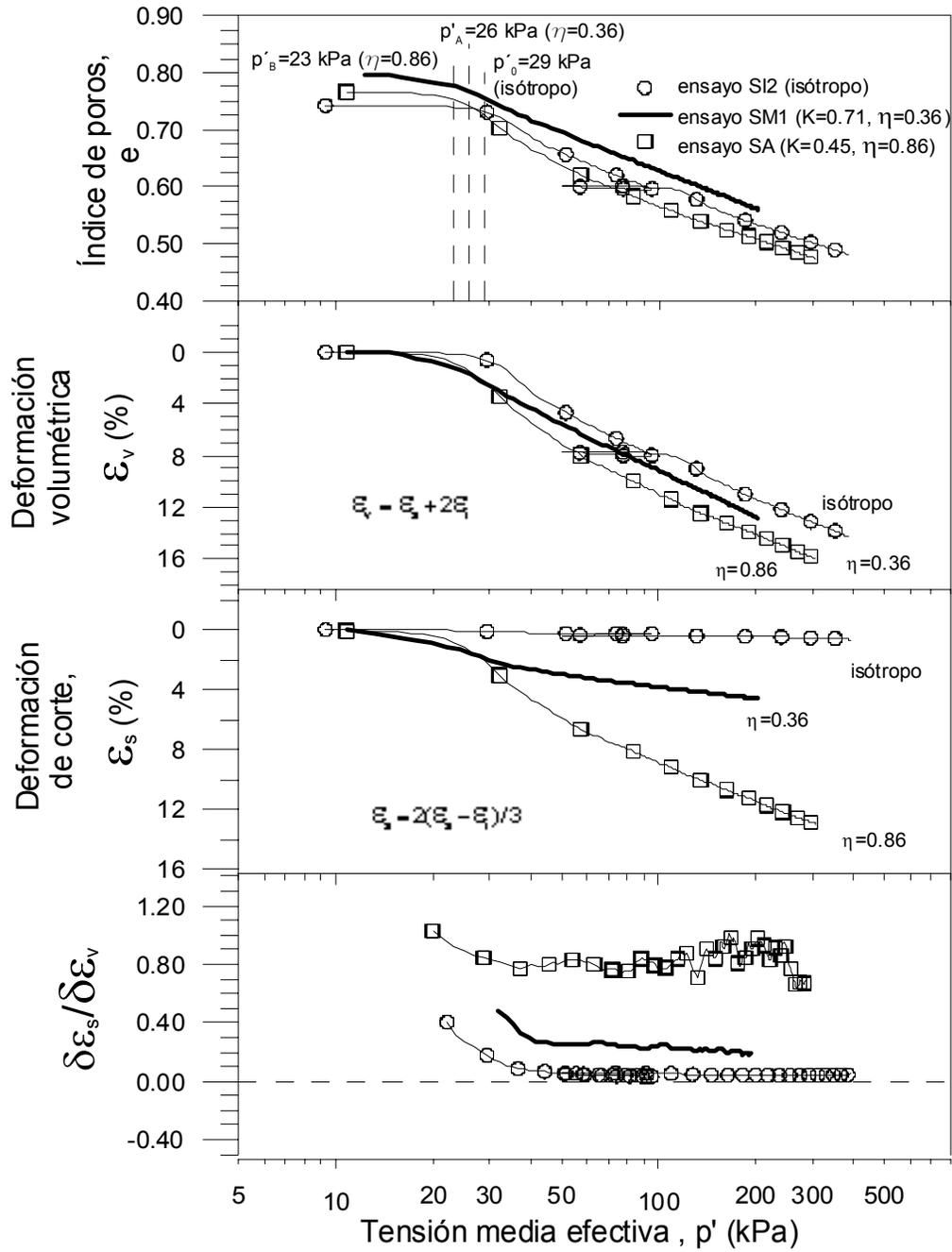
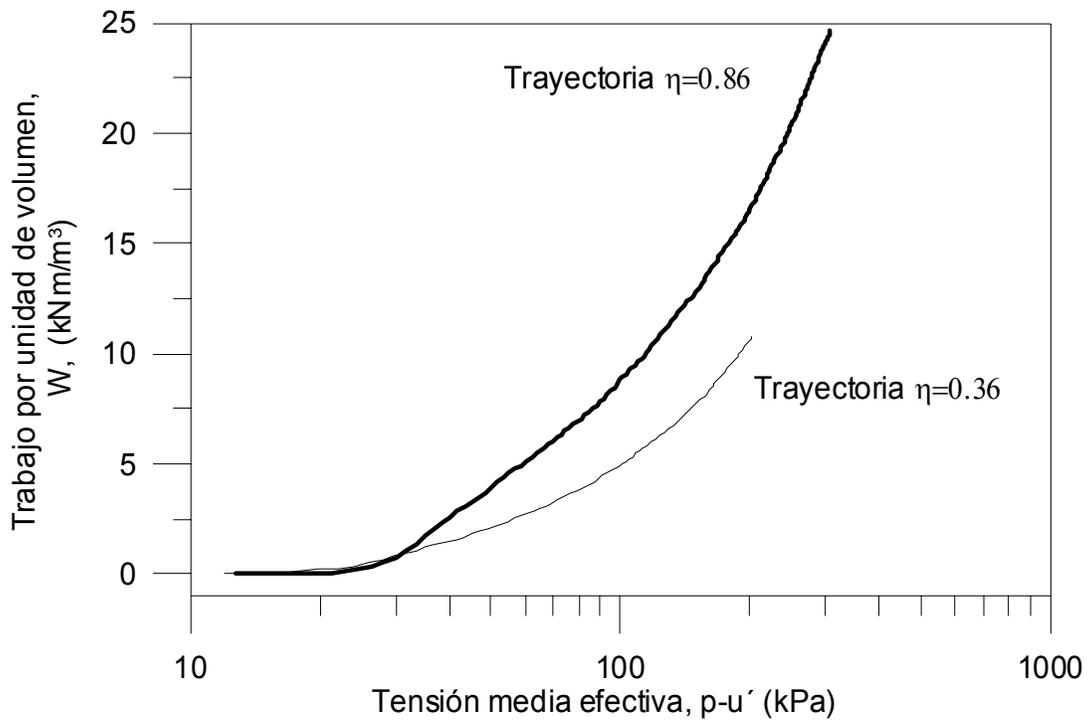
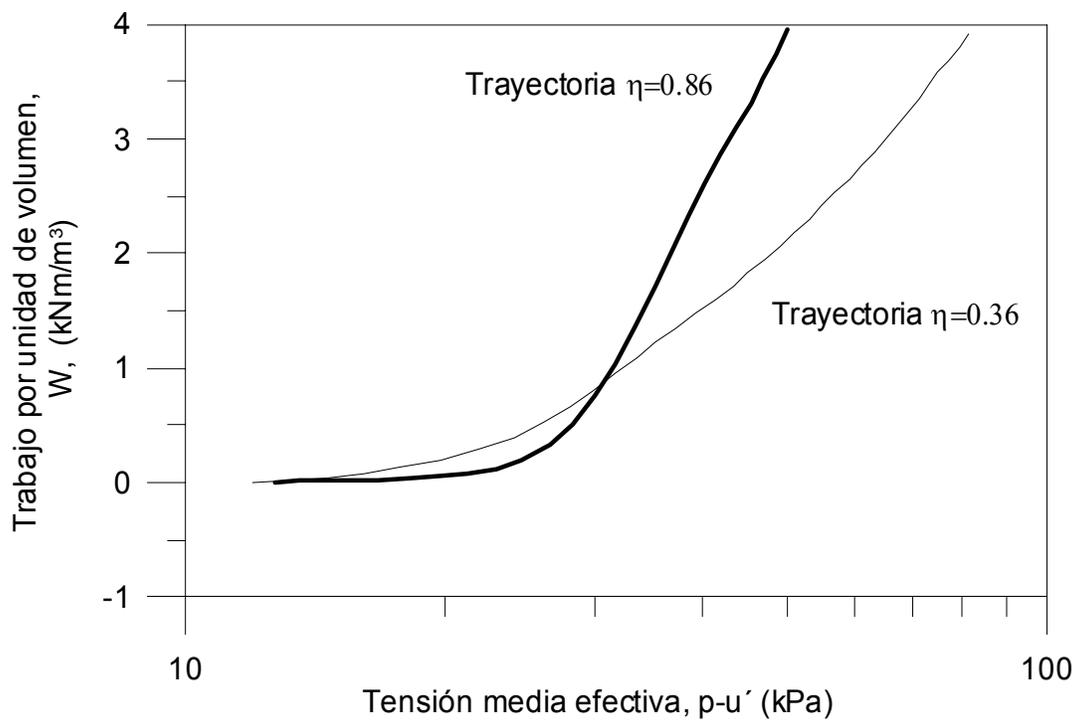


Figura 6.28 Variación de índice de poros y deformaciones del suelo durante las trayectorias de consolidación anisótropa, mediante rampa cuasicontinua de incremento de presiones, bajo condiciones saturadas de la muestra.



(a)



(b)

Figura 6.29 a) Trabajo desarrollado por unidad de volumen de la muestra saturada (W) con la tensión media efectiva (p'), durante las trayectorias de consolidación anisótropa; b) Gráfica p' - W ampliada.

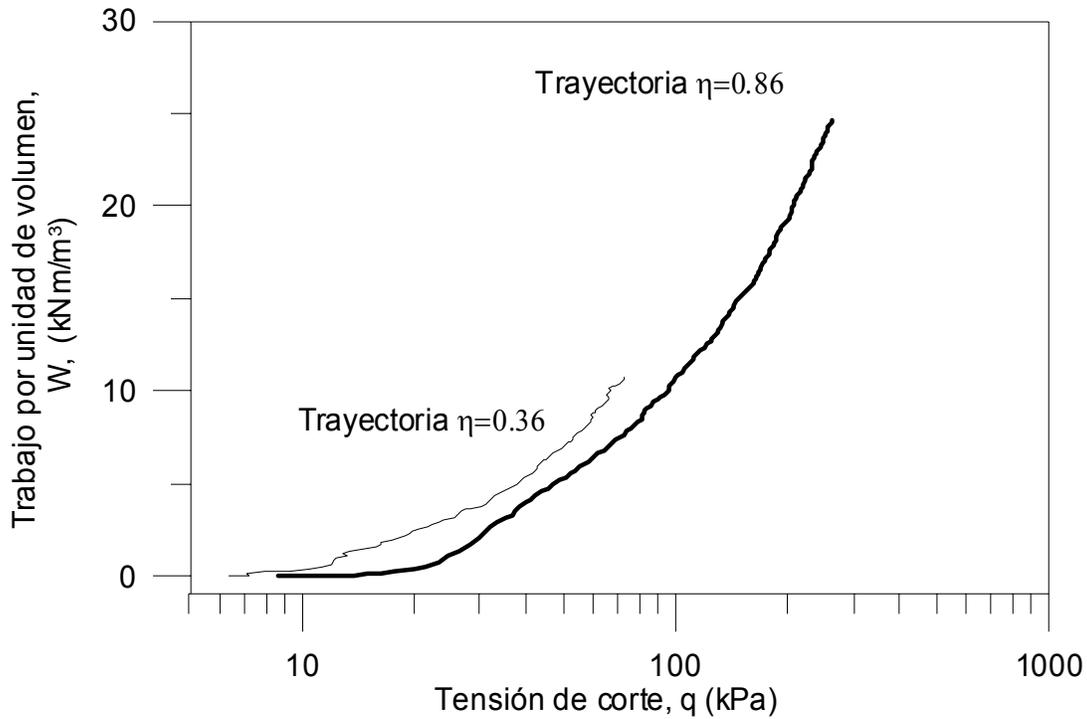


Figura 6.30 Trabajo desarrollado por unidad de volumen de la muestra saturada con la tensión de corte, durante las trayectorias de consolidación anisótropa.

En la Tabla 6.10 se muestran los valores de la tensión de fluencia determinados usando los criterios mencionados anteriormente. No son muy diferentes los valores determinados por distintos criterios, presentando valores más altos los determinados en el espacio $\log p-u_a-W$ y $q-W$.

Tabla 6.10 Tensión de fluencia en $s=0$, para trayectorias en condiciones saturadas; utilizando diversos criterios.

Ensayo	Trayectoria $\eta = q/p'$ ($K = \sigma_r'/\sigma_a'$)	Tensión de fluencia							
		M. Casagrande $\log(p-u_a)-\epsilon_v$		$(p-u_a)-\epsilon_v$		$(p-u_a)-W$		$q-W$	
		p'	q	p'	q	p'	q	p'	q
SI2	Isótropa (1.00)	29	0	29	0	---	---	---	---
SM2	Isótropa (1.00)	31	0	31	0	---	---	---	---
SA	0.86 (0.45)	23	17	23	17	27	19	25	22
SM1	0.36 (0.70)	26	9	26	9	30	11	28	10

En todos los casos, se observa que la tensión de media fluencia, p' , es menor a medida que la relación η aumenta. Esto es consistente con el comportamiento esperado para un suelo con comportamiento mecánico isótropo. En la Figura 6.31 se presentan en el espacio p' - q las tensiones de fluencia, determinadas mediante el método de Casagrande, para las distintas trayectorias en estudio. Estos datos son acompañados con una curva de fluencia obtenida mediante el Modelo Cam-Clay modificado, la cual es consistente con los valores de tensión de fluencia determinados. La ecuación para la curva de fluencia es dada por:

$$f = q^2 - M^2[p'(p'_0 - p')] = 0 \quad (6.4)$$

Donde M es el valor de q/p' correspondiente al estado crítico y, p'_0 es la tensión de fluencia sobre la línea de compresión normal (que define el tamaño de la curva de fluencia).

Se seleccionó el valor de M igual a 1.2, que corresponde al valor obtenido de ensayos de corte triaxial drenado sobre muestras saturadas. Los resultados de estos ensayos de corte son presentados en el capítulo 7 de esta tesis. El valor de p'_0 seleccionado es de 30 kPa (ver apartado 6.3.2).

Lo anterior sugiere que el suelo se comporta como un material isótropo durante la consolidación, después de colapsar en la etapa de saturación. Es decir, la anisotropía que aparentemente presenta el suelo al final de la compactación (sugerida por el comportamiento mecánico en consolidación isótropa de las muestras no colapsadas) es borrada después de colapsar al saturar la muestra.

Para conocer el efecto de la trayectoria de tensiones de consolidación sobre la evolución de la superficie de fluencia se realizaron otras etapas de consolidación en los ensayos SM1 y SM2. Las trayectorias son mostradas en la Figura 6.26 y Figura 6.27 (y Tabla 5.4), y los resultados en la Figura 6.32 y Figura 6.33. En el ensayo SM2 la muestra se consolidó bajo condición isótropa hasta alcanzar la tensión media de 100 kPa (referirse al punto B de la Figura 6.27), fijando así una nueva p'_0 , para después descargar bajo condición isótropa hasta alcanzar la tensión media de 50 kPa (referirse al punto C). Posteriormente se realiza otra trayectoria carga bajo una condición anisótropa siguiendo los puntos de tensión: $p'=50$ kPa, $q=0$, al $p'=209$ kPa, $q=187$ kPa (referirse

al tramo de carga C-D). De esta manera se cruza la superficie de fluencia, fijada con $p'_o=100$ kPa, en un nuevo punto de fluencia. El punto de fluencia determinado, con el método de Casagrande, en el tramo C-D fue de $p'=85$ kPa y $q=47$ kPa (véase la Figura 6.32). En el ensayo SM1 (véase la Figura 6.26 y Tabla 5.4), después de la trayectoria de consolidación de $\eta = q/p' = 0.36$ (o $K = \sigma'_r/\sigma'_a = 0.70$) hasta alcanzar una $p'=200$ kPa, se siguió una trayectoria de descarga anisótropa bajo la misma condición de η hasta $p'=100$ kPa (referirse al punto C). Posteriormente, la muestra se consolidó bajo condición isótropa hasta alcanzar la tensión media de 300 kPa (referirse al punto D). De esta manera se alcanzó un nuevo punto de la curva de fluencia fijada en $p'=200$ kPa y $q=73$ kPa. El nuevo punto de fluencia determinado es $p'=225$ kPa y $q=36$ kPa (véase la Figura 6.33).

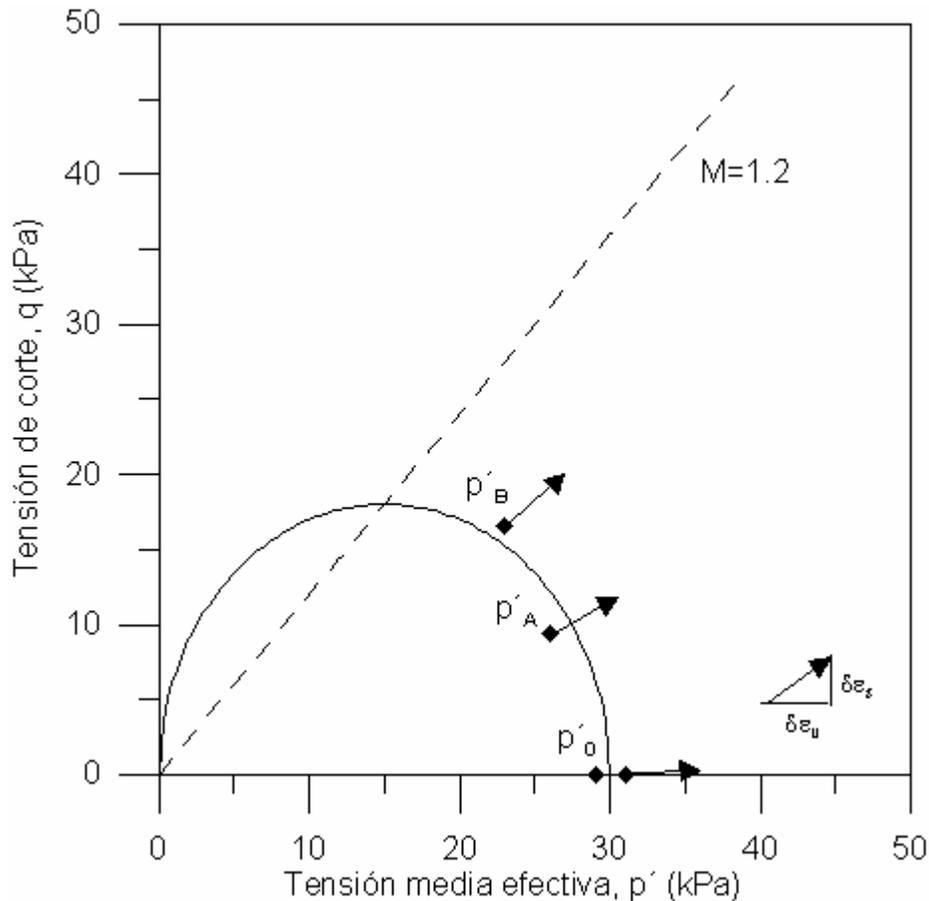


Figura 6.31 Tensiones de fluencia de la muestra saturada (con deformaciones de colapso en la saturación) obtenidos en los ensayos, y la superficie de fluencia teórica estimada.

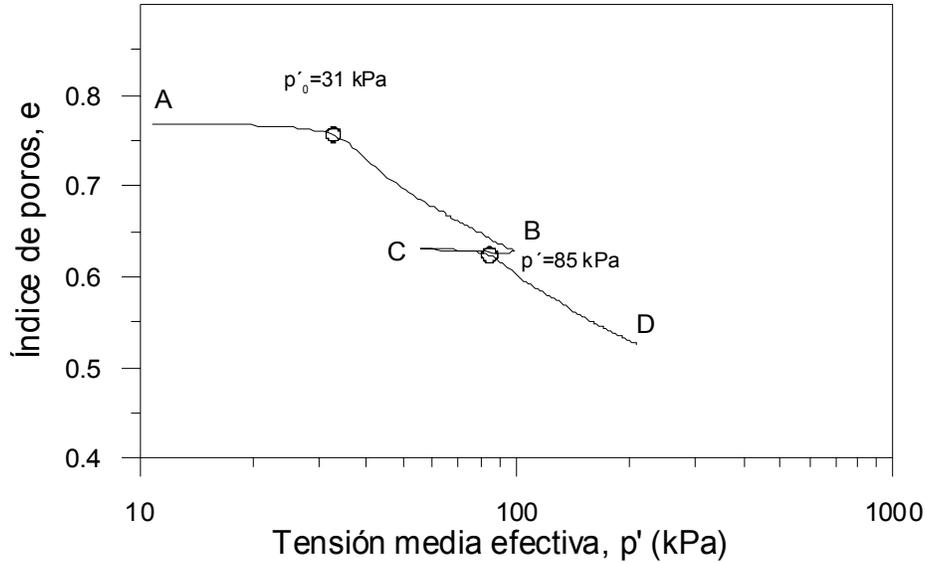


Figura 6.32 Variación de índice de poros durante las trayectorias de consolidación, bajo condiciones saturadas de la muestra, en el ensayo SM2.

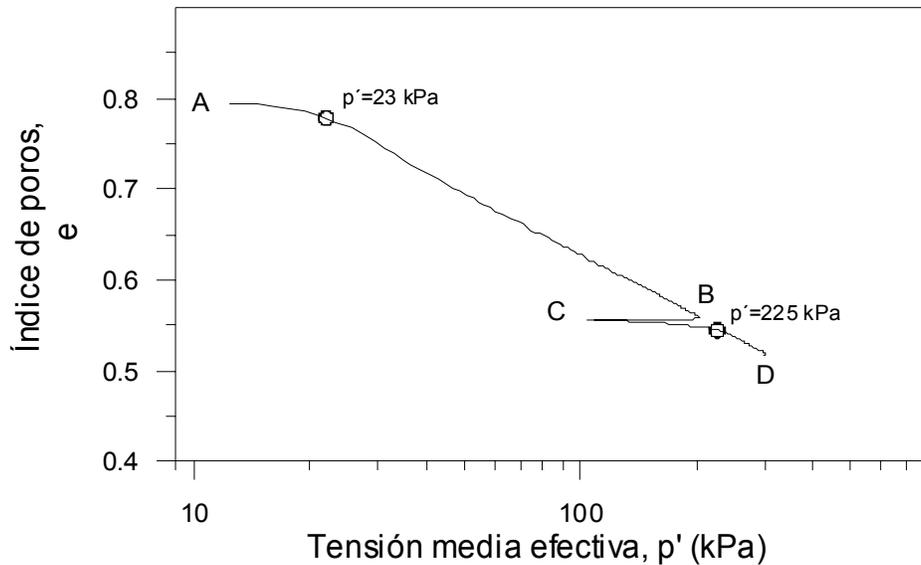


Figura 6.33 Variación de índice de poros durante las trayectorias de consolidación, bajo condiciones saturadas de la muestra, en el ensayo SM1.

En la Figura 6.34a) se presentan las tensiones de fluencia obtenidas en la trayectorias de carga, descarga y recarga realizadas en los ensayos SM1 y SM2, acompañadas de superficies de fluencia estimadas con el modelo Cam Clay modificado. f_1 corresponde a la superficie de fluencia fijada en $p' = 100$ kPa y $q = 0$, en el ensayo SM2. Y f_2 corresponde a la superficie de fluencia fijada en $p' = 200$ kPa y $q = 73$ kPa en el ensayo SM1. También se presenta f_0 que corresponde a la superficie

de fluencia inicial de la muestra en condiciones saturadas, y que experimentó deformaciones de colapso durante la saturación (presentada antes en la Figura 6.31). Puede apreciarse que las superficies cambian de tamaño (gobernado por el p' que lo fija en las trayectorias de carga, descarga y recarga). Por otra parte, los datos experimentales no sugieren que exista cambio de forma en las superficies de fluencia. Lo anterior puede observarse más claramente con los datos normalizados, con relación a su p'_o , presentados en la Figura 6.34b). Los datos están acompañados con una superficie de fluencia normalizada. Las tensiones de fluencia iniciales de la muestra (correspondiente a la superficie f_0) fueron normalizadas con $p'_o=30$ kPa, los datos de recarga del ensayo SM2 con $p'_o=100$ kPa y los del ensayo SM1 con $p'_o=220$ kPa. Aunque estos resultados sugieren que las superficies de fluencia no sufrieron cambios de forma ante las trayectorias de efectuadas, no se pueden ofrecer conclusiones firmes, debido a los pocos resultados existentes y a que las trayectorias fueron realizadas siguiendo relaciones $\eta=q/p'$ muy bajos (isótropa y anisótropa con $\eta=0.36$ ó $K=0.70$).

En la Figura 6.28 se observa que la línea de compresión normal (consolidación isótropa en el ensayo SI2) y la línea virgen en la consolidación anisótropa con $\eta=0.86$ son bastante paralelas en el espacio $e-\log p'$ y $\varepsilon_v-\log p'$, pero la línea virgen en la consolidación anisótropa con $\eta=0.36$ tan solo muestra ese paralelismo después de alcanzar, aproximadamente, p' de 50 kPa. Adicionalmente, en el espacio $\varepsilon_v-\log p'$ se observa que la línea de compresión normal está en la parte superior y en las otras trayectorias las líneas virgen de consolidación tienen un orden descendente en función de la relación η (no se puede observar en el espacio $e-\ln p'$ debido a las diferentes valores iniciales de e en los ensayos). Este comportamiento es consistente por lo planteado en el modelo Cam Clay para suelos isótropos, donde para una determinada relación de tensiones (η) se genera una serie de puntos de fluencia que forman una línea particular, en el espacio $v-\ln p'$ (donde v es el volumen específico) que es paralela a la línea de compresión normal. Sin embargo, en las trayectorias isótropa y anisótropa con $\eta=0.86$, las pendientes de la líneas virgen en el tramo inicial son ligeramente más inclinadas que para confinamientos altos, disminuyendo sus pendientes a medida que aumenta p' , hasta alcanzar $\lambda(0)=-0.11$ en la línea de compresión normal. Esta última observación no puede ser explicada con el modelo Cam Clay.

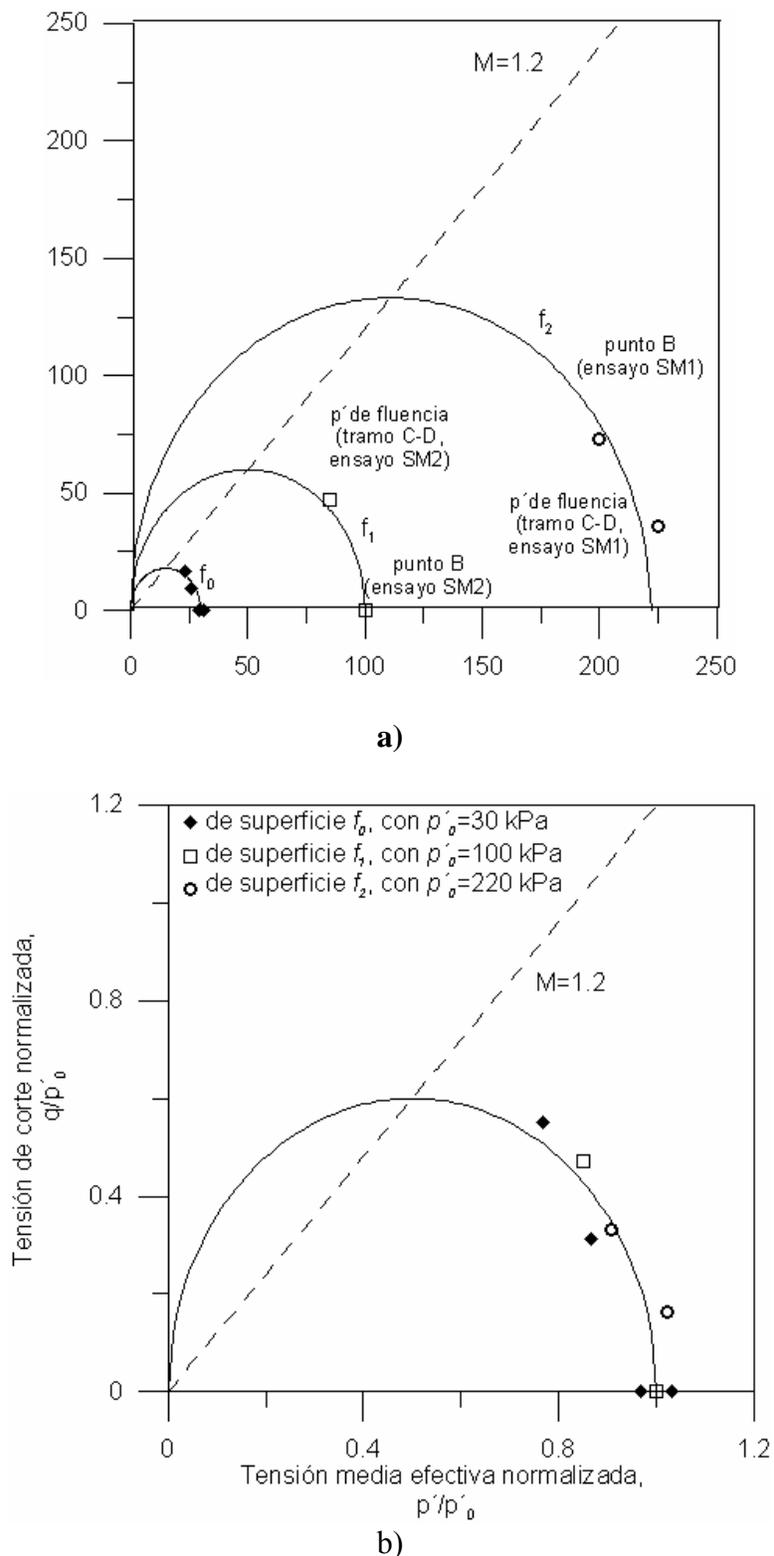


Figura 6.34 **a)** Tensiones de fluencia de la muestra saturada, obtenidos en las trayectorias de consolidación y en trayectorias múltiples de carga, descarga y recarga, y superficies de fluencia teóricas; **b)** Valores normalizados de las tensiones de fluencia de la muestra saturada, obtenidos en las trayectorias de consolidación y en trayectorias múltiples de carga, descarga y recarga, con una superficie de fluencia normalizada.

La Figura 6.28 muestra que las deformaciones de corte generadas durante la consolidación son mayores, para una determinada p' , al incrementarse la relación de tensiones η . El flujo plástico es examinado estudiando la dirección de incremento de deformación plástica $d\varepsilon_s/d\varepsilon_v$ en las distintas pruebas. En la Figura 6.28 se observa la evolución de $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ en los ensayos. Se prefirió no usar la relación $\delta\varepsilon_v/\delta\varepsilon_s$ para evitar los valores de gran magnitud que se generan en las trayectorias isotropas. En algunos casos la deformación plástica es obtenida restándole la parte elástica a la deformación total, con la deformación elástica estimada con base a los módulos elásticos. En otros casos, un método comúnmente usado es asumir que la deformación total es igual a la deformación plástica, considerando que la deformación elástica es despreciable, debido a que generalmente es mucho más pequeño que la deformación plástica. En este estudio, inicialmente se uso el primer método. Sin embargo, al resultar bastante pequeñas las deformaciones elásticas estimadas se optó usar el segundo método por su simplicidad.

En la Figura 6.28 se observa que todas las curvas $p'-\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ tienden a estabilizarse en un cierto valor que depende del valor de la relación de tensiones η aplicada en la trayectoria. Los valores más altos se dan en las trayectorias con mayor valor de η . Los valores $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ en la zona elástica pueden no ser precisos debido a las pequeñas deformaciones que ocurren (y grandes oscilaciones que se producen). En la trayectoria de consolidación isotropa, en el ensayo SI2, el valor de $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ es de aproximadamente 0.1 en la tensión de fluencia $p' \approx 30$ kPa, pero se reduce al aumentar p' hasta estabilizarse en $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ cercanos a 0 cuando se alcanza $p' \approx 50$ kPa. Los valores muy bajos de $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ son consistentes con lo esperado para suelos con fábrica (estructura) isotropa sometidos a consolidación isotropa.

En la trayectoria de consolidación anisótropa $\eta = 0.36$ el valor de $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v \approx 0.59$ en la tensión de fluencia $p' = 26$ kPa disminuye hasta alcanzar un valor de $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ cercano a 0.25 en $p' \approx 40$ kPa. En el modelo Cam Clay, considerando una regla de flujo asociada, la dirección de incremento de deformación plástica $d\varepsilon_s/d\varepsilon_v$ puede ser estimada por:

$$\frac{\partial \varepsilon_s^p}{\partial \varepsilon_v^p} = \frac{2\eta}{M^2 - \eta^2} \quad (6.5)$$

Donde $\partial \varepsilon_v^p$ y $\partial \varepsilon_s^p$, que son respectivamente los incrementos de deformación plástica volumétrica y de corte respectivamente, asimilados a $\partial \varepsilon_v$ y $\partial \varepsilon_s$ en esta tesis.

El valor de $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ estimado usando el modelo, con $\eta = 0.36$, es de 0.55. Este valor es consistente con lo obtenido experimentalmente (0.59) en la tensión de fluencia. Sin embargo, su decremento y posterior estabilización (en 0.25) no puede ser explicado. En el caso $\eta = 0.86$, el valor de $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v = 2.46$ estimado usando el modelo es bastante diferente a lo obtenido experimentalmente de $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v = 0.93$ en la tensión de fluencia. Similarmente al caso anterior, su decremento y posterior estabilización (en 0.8) no puede ser explicado por el modelo Cam Clay.

6.4.2 Consolidación no saturada bajo succión matricial constante.

6.4.2.1 Descripción de trayectorias.

En los ensayos A1 y AW se siguieron trayectorias de consolidación bajo condiciones de tensión anisótropa y de succión matricial constante de 100 kPa. Las rampas de consolidación anisótropa se realizaron mediante incrementos de tensiones cuasi-continuos a una velocidad predefinida, siguiendo una relación de tensión de corte entre tensión media neta, $\eta = q/(p-u_a)$, constante de 0.38 y 0.75 (ó $K=(\sigma_r - u_a)/(\sigma_a - u_a)$ igual 0.70 y 0.5) en los ensayos A1 y AW respectivamente. Estas trayectorias son representadas tanto en el espacio $(p-u_a)-q-s$ en la Figura 6.35 como en el plano $(p-u_a)-q$ en la Figura 6.36. Las etapas en estudio corresponden a los tramos B-C de las figuras. El análisis se complementa con el ensayo de compresión isotrópica realizado bajo succión matricial constante de 100 kPa, seguida en el ensayo I2 ($K=1$), que también se presenta en la Figura 6.35 y la Figura 6.36. Las trayectorias fueron efectuadas hasta alcanzar una tensión media neta 200 kPa. La etapa de equilibrio previa a la compresión se representa en el espacio $(p-u_a)-q-s$ por el tramo A-B en la Figura 6.35. Información más detallada de la trayectoria y el procedimiento seguido en los ensayos se han presentado en el Capítulo 5.

6.4.2.2 Características tensión-deformación y tensiones de fluencia.

Los resultados presentados en este apartado corresponden a registros cuasi-continuos de los resultados obtenidos durante la ejecución de las rampas cuasi-continuas de incremento de presiones. Por lo tanto, se obtienen curvas continuas pero que serán representadas acompañadas con símbolos espaciados para distinguir los ensayos. La anisotropía de la muestra compactada puede ser analizada estudiando el comportamiento mecánico de los ensayos I2, A1 y AW. Las compresiones se realizaron sobre muestras que no presentaron importantes cambios volumétricos

de hinchamiento y de relación de agua (véase la Tabla 6.1), permaneciendo dentro de la región elástica, durante la etapa de equilibrio. Por lo tanto, son muestras que mantienen un arreglo de partículas (fábrica) y contenido de agua cercano al existente en el estado final de la compactación. Los pequeños cambios en la relación de agua de las muestras, experimentados en la etapa de equilibrio, indican también una probable cercanía a la succión matricial que tiene al inicio de esta etapa, aunque debido a la sensibilidad mostrada en la relación e_w-s (en el intervalo de 100 a 600 kPa) la succión aplicada en estos ensayo (100 kPa) puede desviarse de forma considerable de la existente al final de la compactación (una succión de 270 kPa fue medida en una muestra usando un tensiómetro de alto rango, empleado por Ridley y Burland, 1993). Lo anterior fue analizado con mayor detalle en el apartado 6.2.2.

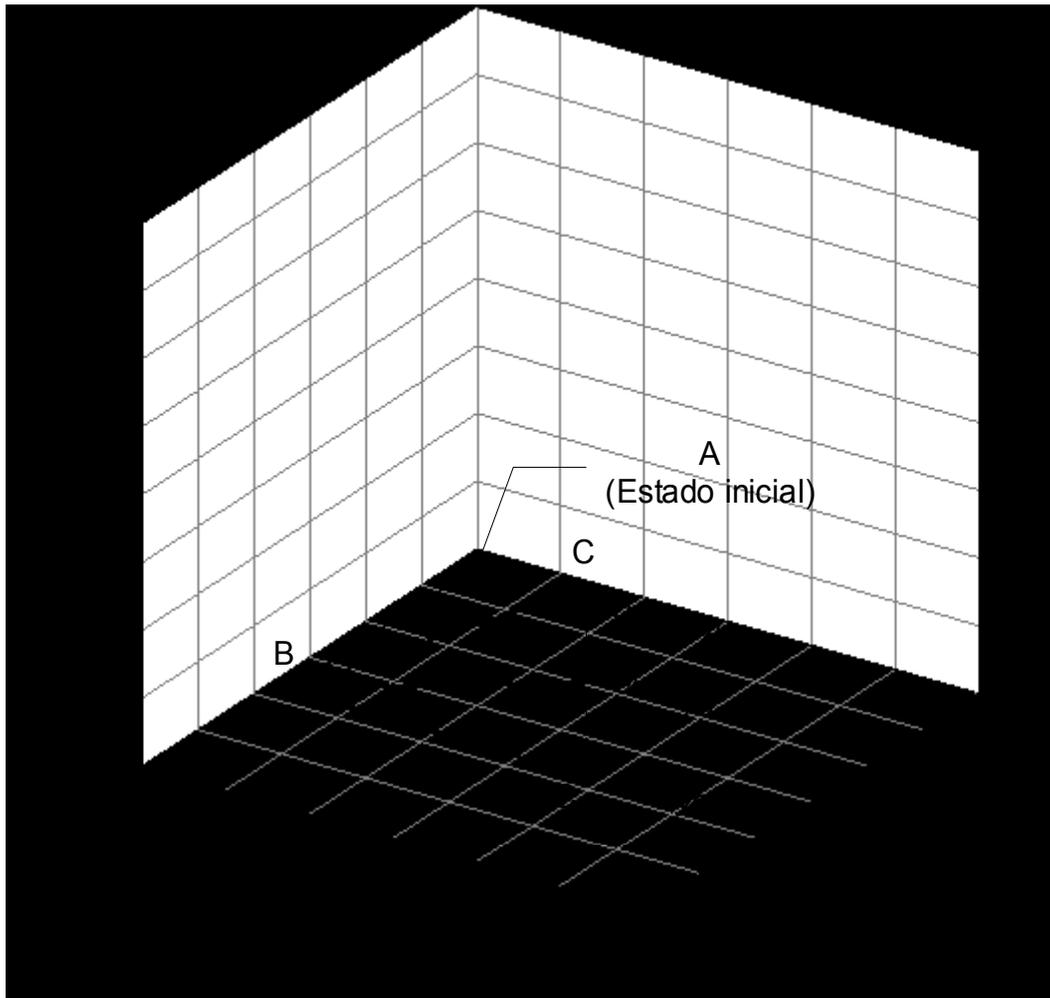


Figura 6.35 Etapa de equilibrio (A-B) y trayectoria de compresión anisótropa bajo condiciones de succión controlada (B-C), en el espacio (p-ua)-s-q, para los ensayos I2, A1 y AW.

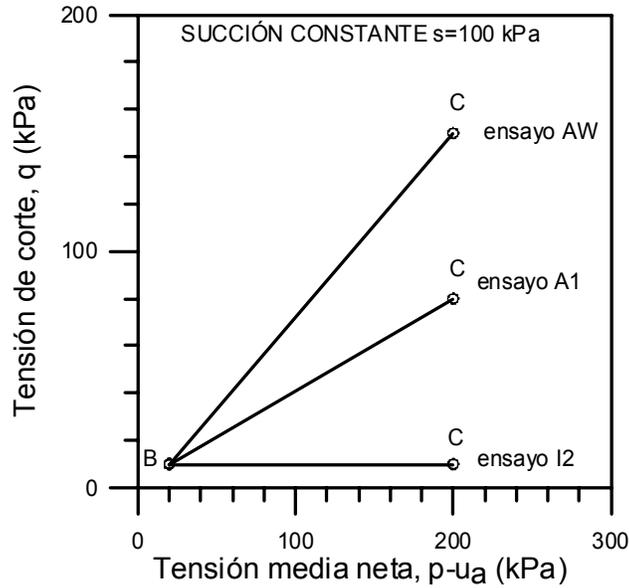


Figura 6.36 Trayectoria de compresión anisótropa bajo condiciones de succión controlada (B-C), en el plano $(p-u_a)-s$, para los ensayos I2, A1 y AW.

La Figura 6.37 y la Figura 6.38 muestran la variación de índice de poros y deformaciones de la muestra con la tensión media neta, $p-u_a$, durante las consolidaciones isotrópica y anisótropas cuasi-continua (con, $p-u_a$ en escala logarítmica), bajo una succión de 100 kPa. La tensión de fluencia (presión de preconsolidación) puede ser identificada con claridad, en todos los ensayos, por los marcados cambios existentes en la pendiente de la curva continua de índice de poros (o deformación volumétrica, ϵ_v) con el logaritmo de la tensión media efectiva. Puede observarse que la tensión de fluencia puede identificarse en los ensayos, también, en el espacio $p-u_a-\epsilon_s$, a excepción del en el ensayo A1 ($\eta=0.38$ o $K=0.70$) donde no se observa un cambio brusco en su pendiente. En la Tabla 6.11 se presentan los datos iniciales y finales de la etapa.

Tabla 6.11 Condiciones iniciales y finales en la etapa de consolidación isotrópica y anisótropa en los ensayos no saturados. Ensayos I2, A1 y AW.

Ensayo	η (K_0)	Final de etapa de equilibrio					Final de etapa de consolidación				
		e	e_w ($w\%$)	Sr_0 (%)	$p-u_a$ kPa	u_a-u_w kPa	e	e_w ($w, \%$)	Sr (%)	$p-u_a$ kPa	u_a-u_w kPa
I2	Isótropo (1.0)	0.834	0.324 (12.0)	40.0	23	100	0.721	0.320 (11.8)	44.2	200	100
A1	0.38 (0.70)	0.824	0.331 (12.2)	40.1	23	100	0.677	0.328 (12.1)	48.1	200	100
AW	0.75 (0.5)	0.834	0.334 (12.3)	40.0	23	100	0.718	0.334 (12.3)	46.5	200	100
IW	Isótropo (1.0)	0.827	0.329 (12.1)	40.2	23	100	0.689	0.322 (11.9)	46.7	200	100

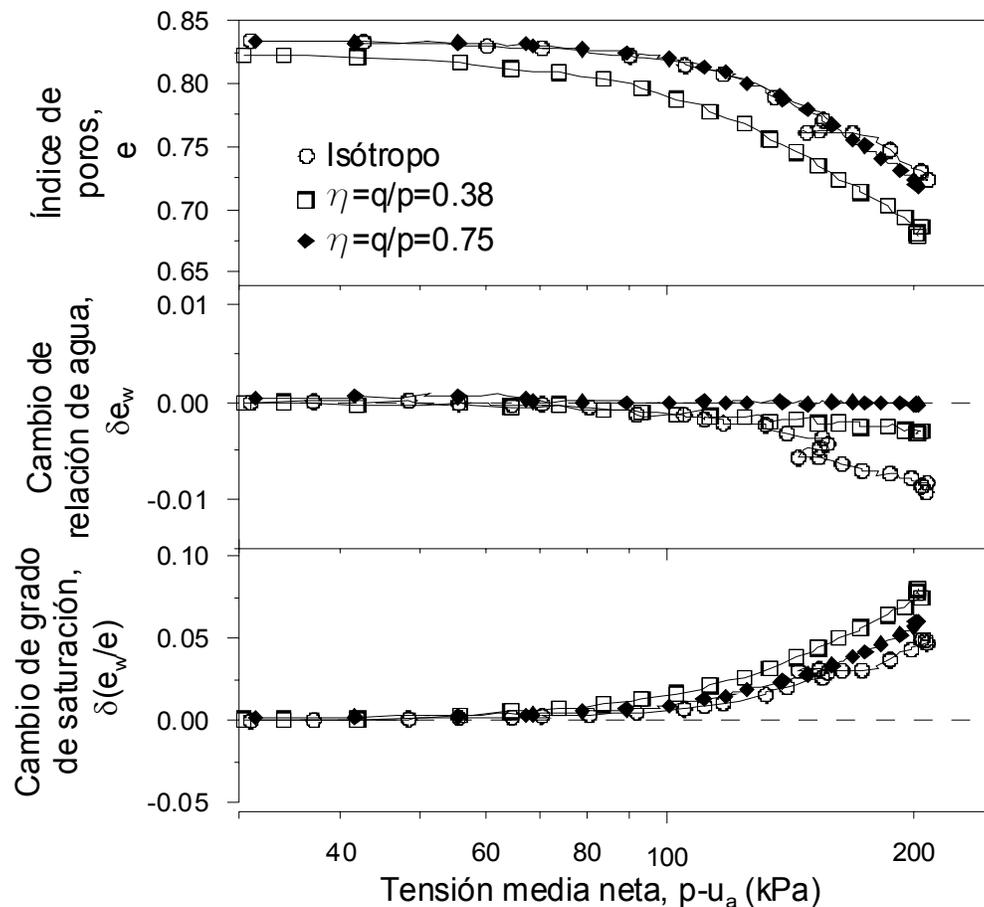


Figura 6.37 Variación de índice de poros, relación de agua y grado de saturación del suelo durante las trayectorias de consolidación anisótropa, mediante rampa cuasicontinua de incremento de presiones, bajo una succión matricial de 100 kPa.

Para determinar las tensiones de fluencia se utilizaron los mismos criterios expuestos en la sección anterior. En la Figura 6.39 y Figura 6.40 se presentan las graficas del trabajo desarrollado por unidad de volumen de la muestra (W) con la tensión media neta ($p-u_a$) y la tensión de corte (q) respectivamente, durante las trayectorias de consolidación anisótropa bajo succión controlada de 100 kPa. En ambas gráficas $\log p-u_a-W$ y $q-W$, se observa un cambio brusco en las pendientes que podrían indicar la separación de la zona elástica de la zona elasto-plástica.

En la Tabla 6.12 se muestran los valores de la tensión de fluencia en cada succión, determinados usando los criterios mencionados anteriormente. No son muy diferentes los valores determinados por distintos criterios, presentando valores más altos los determinados en el espacio $\log p-u_a-W$ y $q-W$.

Tabla 6.12 Tensión de fluencia en $s=100$ kPa, para trayectorias bajo succión matricial constante; utilizando diversos criterios.

Ensayo	Succión matricial s (kPa)	Trayectoria $\eta = q/p'$ ($K = \sigma_r'/\sigma_a'$)	Tensión de fluencia							
			M. Casagrande $\log(p-u_a)-\epsilon_v$		$(p-u_a)-\epsilon_v$		$\log(p-u_a)-W$		$q-W$	
			$p-u_a$	q	$p-u_a$	q	$p-u_a$	q	$p-u_a$	q
I2	100	Isótropa (1.00)	110	10	106	10	112	10	---	10
IW	100	Isótropa (1.00)	105	10	92	10	107	10	---	10
A1	100	0.38 (0.70)	103	43	97	37	100	42	105	44
AW	100	0.75 (0.5)	114	86	110	83	117	88	112	86

En el modelo propuesto por Alonso et al. (1990) la superficie de fluencia en el plano $p-q$ (para el estado triaxial de esfuerzo) es descrita con base al Modelo Cam-Clay modificado. Las superficies son elipses que exhiben endurecimiento (hardening) isótropo controlado por las deformaciones volumétricas plásticas. La ecuación de esas elipses es:

$$q^2 - M^2[(p + p_s)(p_0 - p)] = 0 \quad (6.6)$$

Donde p representa la tensión media neta $p-u_a$; M es pendiente de la línea de estado crítico; p_0 es la tensión de fluencia, sobre una trayectoria isótropa, para una succión s . El efecto de la succión en la resistencia es representado por un incremento en cohesión aparente, p_s , que es función de la succión.

Para buscar un mejor ajuste de las tensiones de fluencia, se estimó también una curva de fluencia para suelos anisótropos usando una ecuación basada en el modelo presentado por Wheeler et al. (2003). La curva de fluencia para la condición saturada es una elipse cortada dada por la ecuación:

$$(q - \alpha p')^2 - (M^2 - \alpha^2)(p'_m - p')p' = 0 \quad (6.7)$$

Donde M es el valor del estado crítico; p'_m y α definen el tamaño e inclinación de la curva de fluencia, respectivamente (véase la Figura 6.41). El valor de α es una medida del grado de anisotropía del suelo. Con $\alpha=0$ el suelo es isótropo y la curva de fluencia es similar a la obtenida con el modelo Cam-Clay modificado.

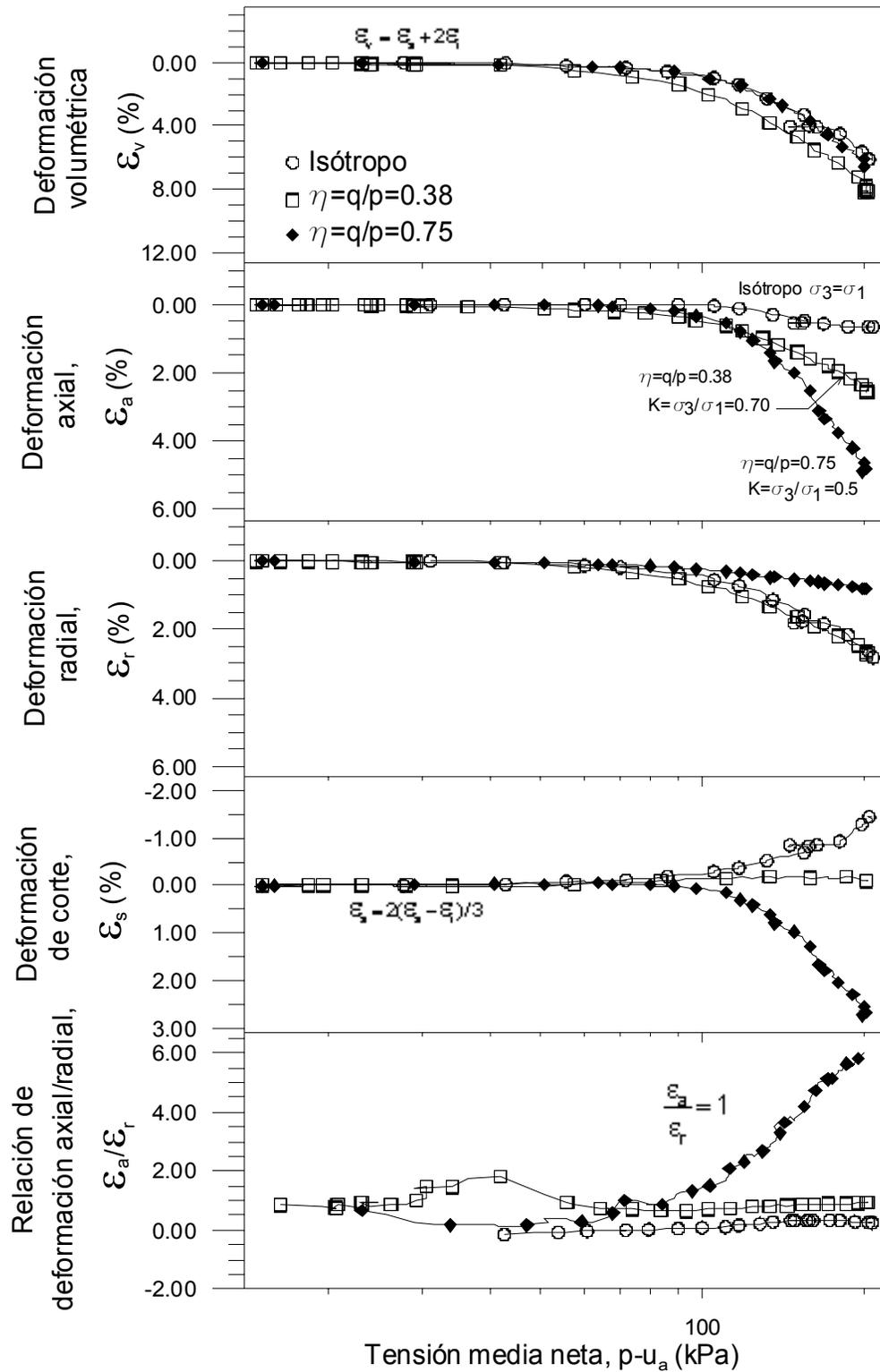


Figura 6.38 Variación de las deformaciones del suelo con respecto a la tensión media neta, durante las trayectorias de consolidación anisótropa, mediante rampa cuasicontinua de incremento de presiones, bajo una succión matricial de 100 kPa.

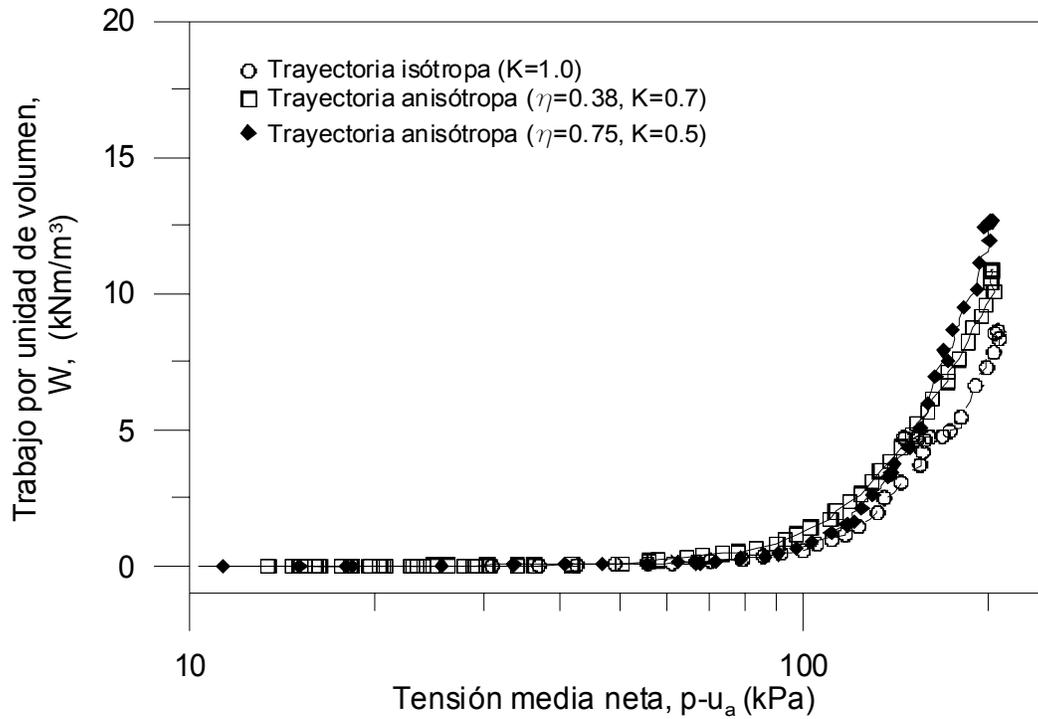


Figura 6.39 a) Trabajo desarrollado por unidad de volumen de la muestra no saturada (W) con la tensión media neta ($p-u_a$), durante las trayectorias de consolidación anisótropa.

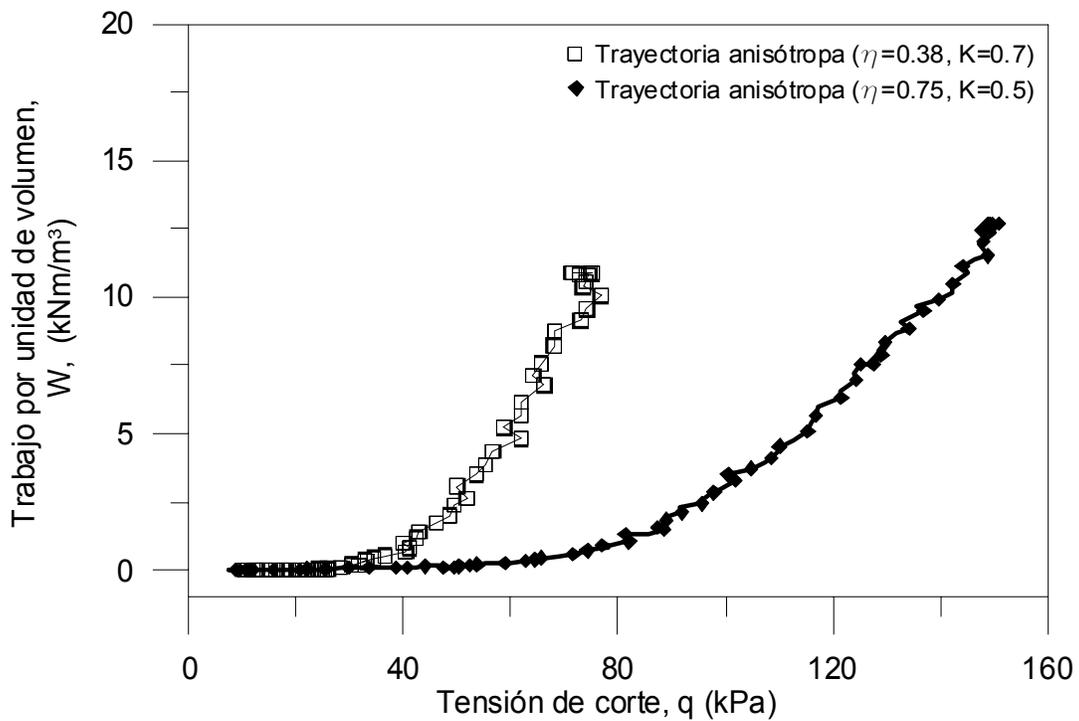


Figura 6.40 Trabajo desarrollado por unidad de volumen de la muestra no saturada (W) con la tensión de corte (q), durante las trayectorias de consolidación anisótropa.

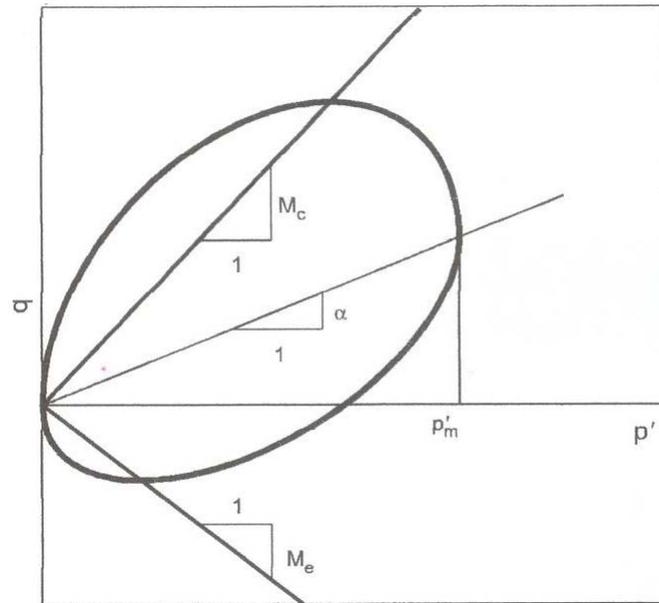


Figura 6.41 Curva de fluencia para suelos saturados propuesta en el modelo de Wheeler et al. (2003) para suelos saturados.

Para aplicar la ecuación anterior a las condiciones parcialmente saturadas de la muestra se efectuó una modificación similar a la realizada a la curva de fluencia de Cam-Clay en Alonso et al. (1990). Considerando que el efecto de la succión es representado por un incremento en cohesión aparente, p_s , la ecuación de la curva de fluencia será:

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

Donde, en este caso, p es la tensión media neta $p - u_a$, y p_m representa la tensión media neta ($p_m - u_a$) que define el tamaño de la curva de influencia.

El valor del parámetro α puede obtenerse usando un procedimiento similar al realizado por Wheeler et al. (1999). Asumiendo que p_m y α resultan de historia de deformación del suelo, es posible estimarlos analizando una trayectoria de tensiones unidimensional (K_0 o η_{K0}). En este trabajo, para estimar α se utilizó la trayectoria de tensiones seguida durante la compactación (obtenida durante un proceso de compactación, similar al realizado para preparar las muestras, en un edómetro con medida de tensión lateral). Adicionalmente, se usa una regla de flujo asociada a

la curva de fluencia propuesta (ecuación 6.8), siguiendo la propuesta asumida en el modelo de Wheeler et al. (2003) para suelos saturados:

$$\frac{\partial \varepsilon_s^p}{\partial \varepsilon_v^p} = \frac{2[q - \alpha(p + p_s)]}{2\alpha[\alpha(p + p_s) - q] + (M^2 - \alpha^2)(2p + p_s - p_m)} \quad (6.9)$$

Donde q es la tensión de corte; y p_m , es la tensión media neta ($p-u_a$) que define el tamaño de la curva de fluencia (véase la Figura 6.41). Esta ecuación 6.9 también se puede presentar usando la relación $\eta_s = q/(p + p_s)$, con p representando la tensión media neta ($p-u_a$). En este caso la ecuación queda de la siguiente manera:

$$\frac{\partial \varepsilon_s^p}{\partial \varepsilon_v^p} = \frac{2(\eta_s - \alpha)}{M^2 - \eta_s^2} \quad (6.10)$$

Por otra parte, asumiendo que las deformaciones elásticas son mucho más pequeñas que las deformaciones plásticas, en una trayectoria de tensiones con deformación lateral cero, la regla de flujo es dada por:

$$\frac{\partial \varepsilon_s^p}{\partial \varepsilon_v^p} = \frac{2}{3} \quad (6.11)$$

Combinando las ecuaciones anteriores 6.10 y 6.11, se podrá estimar α_{K_0} para la consolidación unidimensional por:

$$\alpha_{K_0} = \frac{\eta_{SK_0}^2 + 3\eta_{SK_0} - M^2}{3} \quad (6.12)$$

Donde $\eta_{SK_0} = q_{K_0}/(p_{K_0} + p_s)$; y p_{K_0} y q_{K_0} son la tensión media neta y tensión de corte para una trayectoria de tensiones unidimensional (K_0 o η_{K_0}).

Para poder aplicarlo en el suelo en estudio, debe asumirse que el valor de K_0 obtenido al final del proceso de compactación es un parámetro que indica la relación de tensiones proporcionada al suelo ligada con la succión generada al término de la compactación. Es decir, se produce al final de la compactación un estado de tensiones (p, q, s) con una relación $\eta_{SK_0} = q_{K_0}/(p_{K_0} + p_s)$ en una determinada succión s (con p siendo la tensión media neta). Se puede aplicar este procedimiento

(usado en Wheeler et al., 2003; en la condición saturada, $s=0$) para determinar la inclinación de la curva de fluencia en la succión observada al final de la compactación. En este estudio el parámetro $\eta_{SK0} = q_{K0}/(p_{K0} + p_s)$ sustituye a $\eta_{K0} = q_{K0}/p_{K0}$ usado en Wheeler et al. (2003). Aunque, según lo obtenido experimentalmente, η_{K0} es constante en el tramo final de la trayectoria de tensiones seguida en el procedimiento de compactación, el parámetro η_{SK0} sufrirá cambios a medida que la compactación avanza, debido a los cambios de succión generados. Por lo tanto α_{K0} varía durante el proceso de compactación. Un valor de $\eta_{K0}=0.80$ ($K_0=0.48$) puede ser utilizado para estimar α_{K0} al final de compactación, basado en los valores obtenidos en el un edómetro con medida de tensión lateral (véase el capítulo 4). La tensión media neta al final de la compactación es de 180 kPa y la tensión de corte de 144 kPa, considerando los valores de tensión vertical neta al final de la compactación y el valor de η_{K0} .

Con base a los resultados obtenidos en la etapa de equilibrio, donde se estima que la succión matricial al inicio del ensayo podría tener algún valor entre 100 y 200 kPa (véase la sección 6.2), se considera conveniente realizar el análisis considerando una succión matricial de 200 kPa al final de la compactación estática (en lugar de la succión, de $s=270$ kPa, medida en una muestra). El valor de p_s correspondiente a la succión de 200 kPa no se obtuvo experimentalmente, pero puede estimarse considerando una relación lineal de la cohesión aparente con la succión ($-p_s = -ks$, siendo k una constante), y usando los valores de p_s obtenidos a partir de ensayos de corte triaxial drenado saturados y no saturados (véase el capítulo 7). El valor estimado de p_s para $s=200$ kPa corresponde a 50 kPa. Usando estos valores y la ecuación 6.12, la inclinación estimada de la curva de fluencia, para una succión de 200 kPa, al final de la compactación es de $\alpha_{K0} = 0.28$. Considerando que durante la etapa de equilibrado de succión, las deformaciones y los cambios de humedad son muy pequeños, puede considerarse que la inclinación de la curva de fluencia en succión matricial de 100 kPa (α_{100}) no resultará muy diferente al α_{K0} estimado para el estado final de compactación.

Si el valor inicial de la inclinación de la curva de fluencia ($\alpha_{100} = 0.28$) es conocido, entonces solamente se necesita de un punto de la curva de fluencia para estimar el valor de p_m (define el tamaño de la curva de fluencia). Con base a las tenciones de fluencia ($p-u_a, q$) determinadas en

las tres trayectorias de tensiones seguidas bajo una succión matricial de 100 kPa, se estimaron tres valores de p_m con la ecuación 6.13:

$$p_m = \frac{[q - \alpha_{100}(p + p_s)]^2}{(M^2 - \alpha_{100}^2)(p + p_s)} + p \quad (6.13)$$

Para el análisis se utilizó el valor de $p_s=30$ kPa correspondiente a la succión de 100 kPa, determinado experimentalmente (véase en el capítulo 7). Para determinar la curva de fluencia se seleccionó el valor promedio de $p_m=113$ kPa.

En la Tabla 6.13 se presentan los parámetros usados para determinar las curvas de fluencia MI_0 (isótropa) y MA_0 (anisótropa). El valor de M y p_s utilizados corresponden a valores obtenidos a partir de ensayos de corte triaxial drenado con control de succión, sobre muestras parcialmente saturadas y de ensayos de corte triaxial drenado (en equipo convencional) en muestras saturadas (véase el capítulo 7). El valor de p_0 seleccionado es el promedio de las tensiones de fluencia, determinado mediante el método de Casagrande, en las trayectorias de consolidación isótropa (en los ensayos I2 e IW).

Tabla 6.13 Parámetros del modelo utilizados en la obtención de la curva de fluencia en el plano p - q .

Modelo	M	p_0 (kPa)	p_s (kPa)	α	p_m (kPa)
Curva MI_0 (Alonso et al. 1990)	1.2	108	30		
Curva MA_0 (Wheeler et al., 2003; modificado para suelos no saturados)	1.2	---	30	0.28	113

Como puede observarse en la Figura 6.42, la curva MI_0 no ajusta bien los datos, con la tensión de fluencia determinada en la trayectoria $\eta=0.75$ estando bastante alejada de lo sugerido por el modelo. Sin embargo, si descartamos la tensión de fluencia determinada para la trayectoria en $\eta=0.75$, los dos puntos restantes son bien ajustados por la curva de fluencia MI_0 . En la Figura 6.42 puede observarse que la curva de fluencia (curva MA_0) que considera la anisotropía del suelo, estimada con $\alpha_{k0}=0.28$, $p_m=113$ kPa y $p_s=30$ kPa, ajusta mejor los resultados obtenidos.

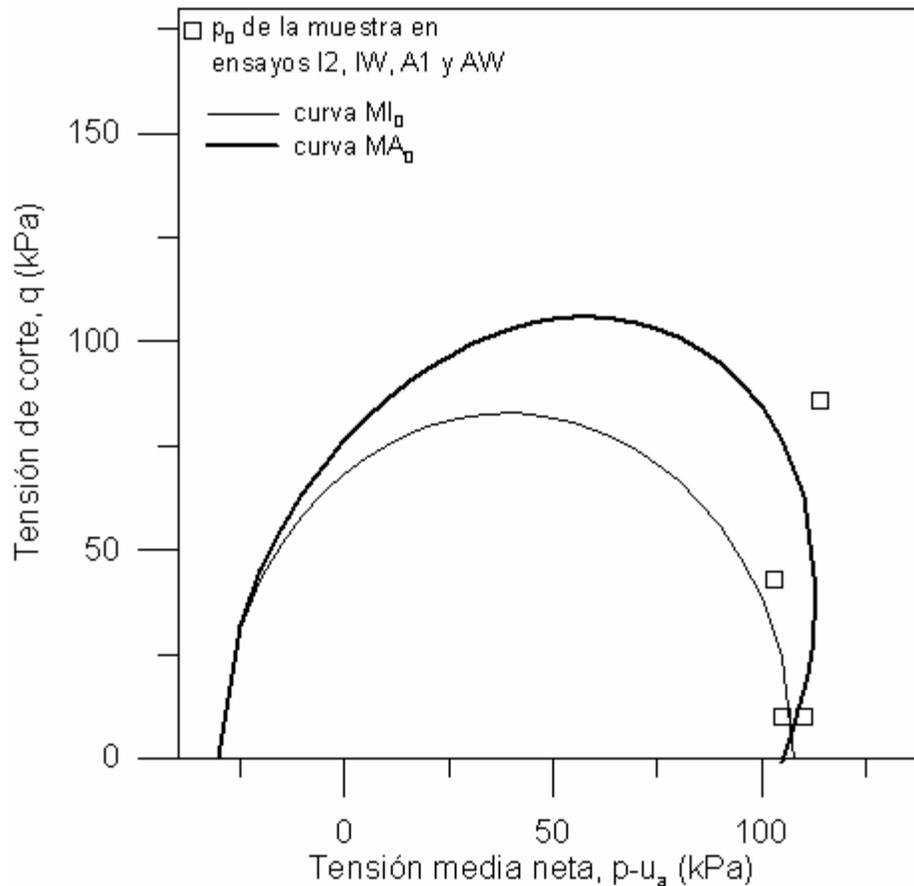


Figura 6.42 Tensiones de fluencia de la muestra con succión matricial de 100 kPa, obtenidos en las trayectorias de consolidación isotrópica y anisótropa, y superficies de fluencia teóricas

En el ensayo A1 (véase la Figura 6.43) después de alcanzar con relación de tensiones $\eta=0.38$, una presión media neta ($p-u_a$) de 200 kPa, se realizó una descarga anisótropa hasta alcanzar una tensión media neta ($p-u_a$) de 115 kPa y una tensión de corte q de 10 kPa; seguida de una recarga isotrópica a succión constante hasta alcanzar una tensión media neta ($p-u_a$) de 400 kPa (véase, también, capítulo 5). Con la trayectoria anterior, se movió la curva de fluencia hasta un punto con relación de tensiones $\eta=0.38$, que después fue tocada y desplazada nuevamente al efectuar la recarga isotrópica. Por lo tanto, se genera una nueva curva de fluencia al mover la curva de fluencia que podría estar definida por los puntos $p-u_a$ de 200 kPa y $q=76$ kPa, y $p-u_a$ de 214 kPa y $q=10$ kPa. Estos dos puntos pueden unirse con una curva que siga el modelo de Alonso et al. (1990), utilizando los parámetros de la Tabla 6.13 pero con un valor de $p_0=214$ kPa (MI_1 en la Figura 6.44). Ello puede indicar que para valores pequeños de la relación de tensiones, η , el suelo tiende a comportarse más isotrópamente a medida que aumenta el nivel de carga.

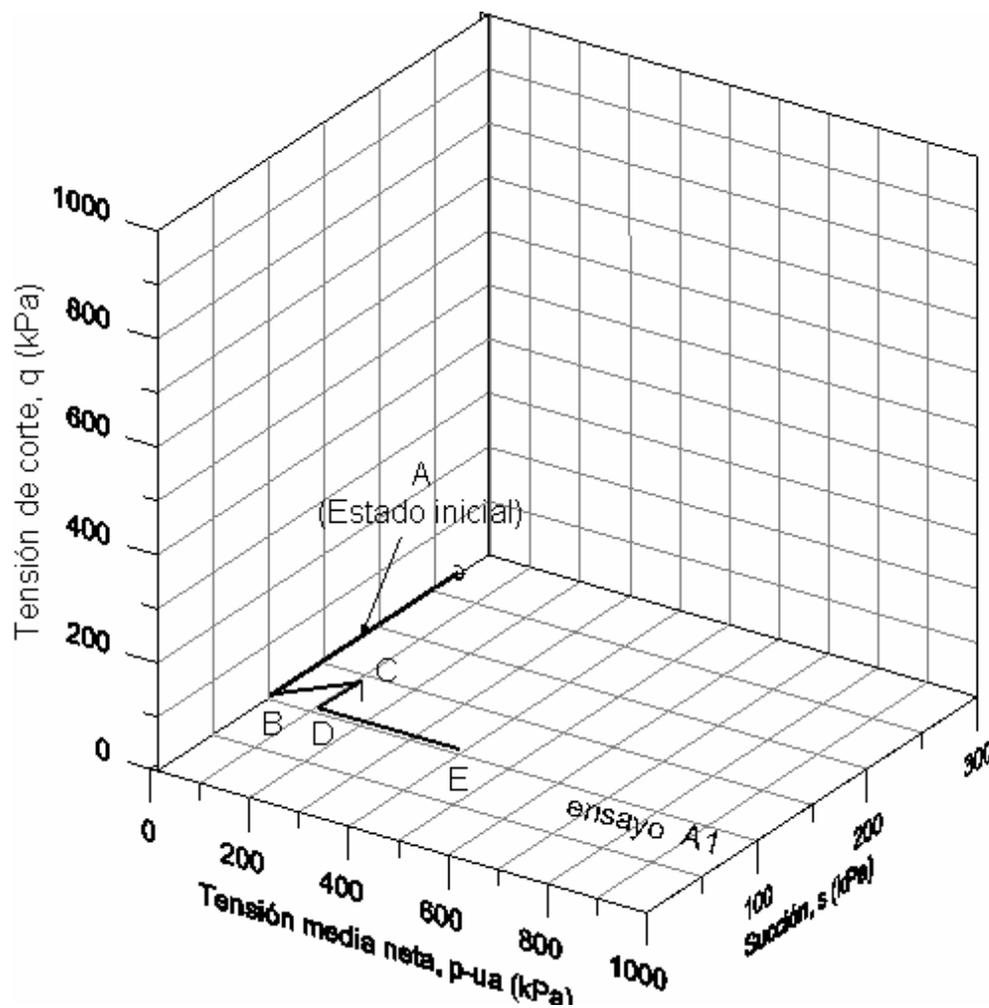


Figura 6.43 Trayectoria del ensayo A1: consolidación anisótropa con $\eta=0.38$ hasta $p-u_a=200$ kPa, de B a D; descarga hasta $p-u_a=115$ kPa y $q=10$ kPa, de C a D; y recarga isotrópica hasta $p-u_a=400$ kPa, de D a E; en succión matricial constante de 100 kPa.

En la Figura 6.45a se muestran las tensiones de fluencia normalizadas con relación a (p_0+p_s) acompañadas de la superficie de fluencia del modelo de Alonso et al. (1990) normalizada (en la representación de las normalizaciones se presenta $p-u_a$ con p para simplificarlas). Puede observarse que las tensiones de fluencia determinadas en la trayectoria $\eta=0.38$ muestran valores muy cercanos en el espacio normalizado $(p+p_s)/(p_0+p_s)$, $q/(p_0+p_s)$. La tensión de fluencia inicial se normalizó con $(p_0+p_s)=138$ kPa; y el estado de tensiones máximo alcanzado con la trayectoria $\eta=0.38$ con $(p_0+p_s)=244$ kPa, que es el valor de fluencia generado al recargar la muestra con una trayectoria isotrópica más $p_s=30$ kPa. En la Figura 6.45b, de forma análoga, se muestran las tensiones de fluencia y la superficie de fluencia del modelo de Wheeler normalizadas utilizando

la tensión de referencia (p_m+p_s), en este caso se ha utilizado unos valores de (p_m+p_s) de 143 kPa y de 244 kPa respectivamente, para definir la superficie de fluencia inicial y la alcanzada tras la carga con $\eta=0.38$. El modelo isótropo de Alonso et al. (1990) es capaz de reproducir aproximadamente los puntos asociados a relaciones de la tensión desviadora, η , pequeñas o a valores de la tensión media altos, sin embargo cuando la relación de tensiones se hace alta, como en el caso de $\eta=0.75$, es necesario usar un modelo que considere la anisotropía del suelo.

En la curva deformación volumétrica (ϵ_v)- logaritmo de la presión media neta ($p-u_a$) de la Figura 6.38 se observa que los tramos vírgenes de los ensayos de consolidación isótropa y anisótropa (en $s=100$ kPa) son cercanamente paralelos. Sin embargo no se aprecia ningún patrón claro en el orden que guardan entre sí dichas curvas debido, quizás, a la cercanía existente entre las tensiones de fluencia de dichos ensayos (en el eje $\log p-u_a$), y el error experimental que podría ser esperado en estas trayectorias. El error al final de la etapa de consolidación isótropa bajo succión matricial de 100 kPa fue de $\Delta\epsilon_v=1.36\%$, que podría ser generado en la preparación de la muestra y en la etapa de equilibrio previa (aunque estos errores son muy pequeños, como se mostró en las secciones previas, podrían influir en el comportamiento del suelo bajo consolidación).

Sin embargo, se distinguen patrones de comportamiento más claros en las curvas ϵ_a - $\log(p-u_a)$, ϵ_r - $\log(p-u_a)$ y ϵ_s - $\log(p-u_a)$ en el rango elastoplástico, apuntando que se producen deformaciones volumétricas similares pero siguiendo patrones distintos de deformaciones axial y radial. Las deformaciones axial (ϵ_a) y de corte (ϵ_s) son más grandes a medida que la relación de tensiones η es mayor.

El patrón de comportamiento puede ser descrito con base a las deformaciones de corte (ϵ_s). En la trayectoria de consolidación isótropa la deformaciones de corte tienen signo negativo, predominando la deformación radial sobre la axial; en la trayectoria de consolidación con $\eta=0.38$ la deformación de corte generada es muy próxima a cero, indicando que se generan deformaciones axial y radial muy similares; en la trayectoria de consolidación con $\eta=0.75$ la deformación de corte es de signo positivo, generándose deformaciones radiales muy pequeñas y por lo tanto predomina la deformación axial sobre la radial.

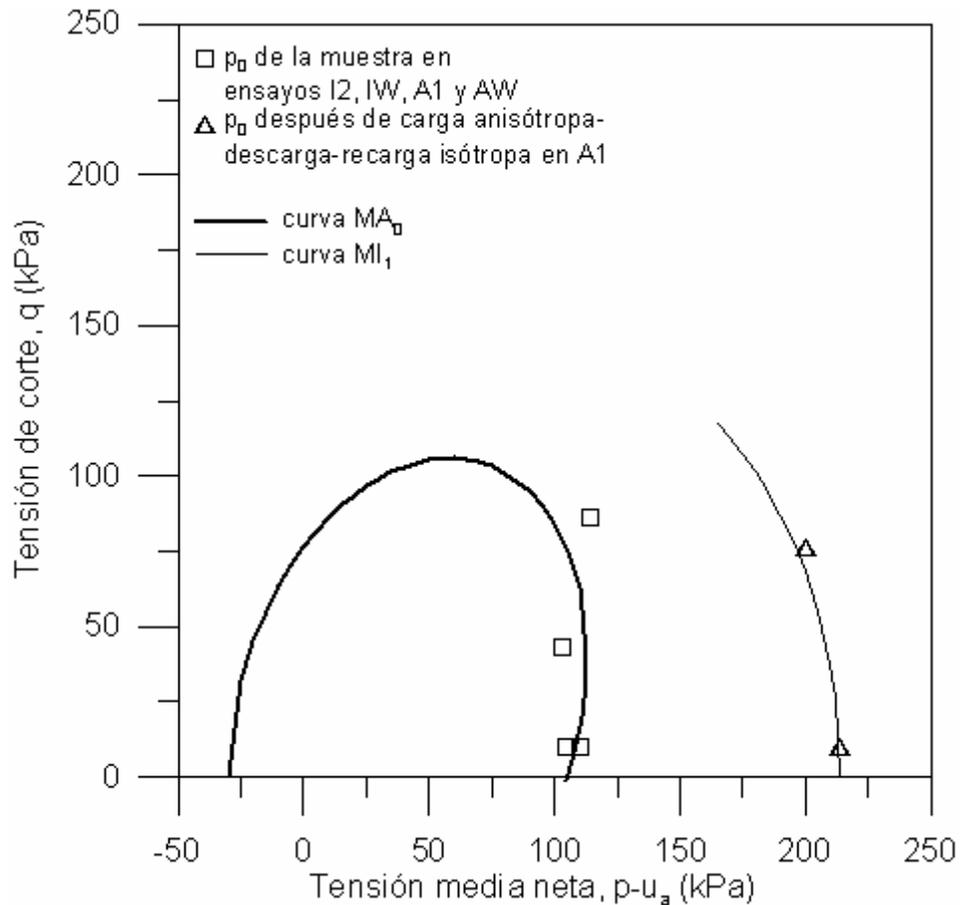
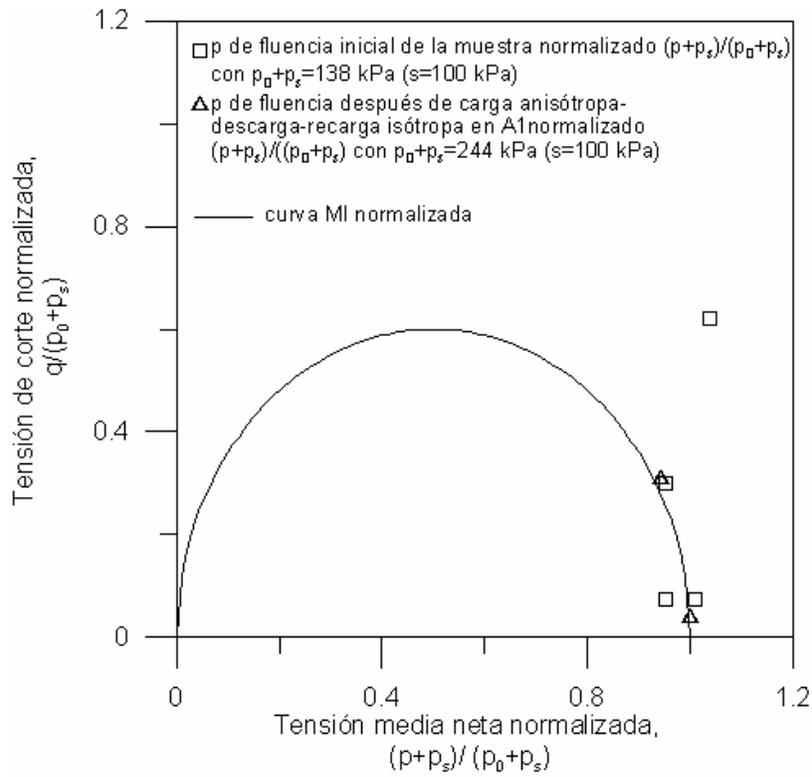
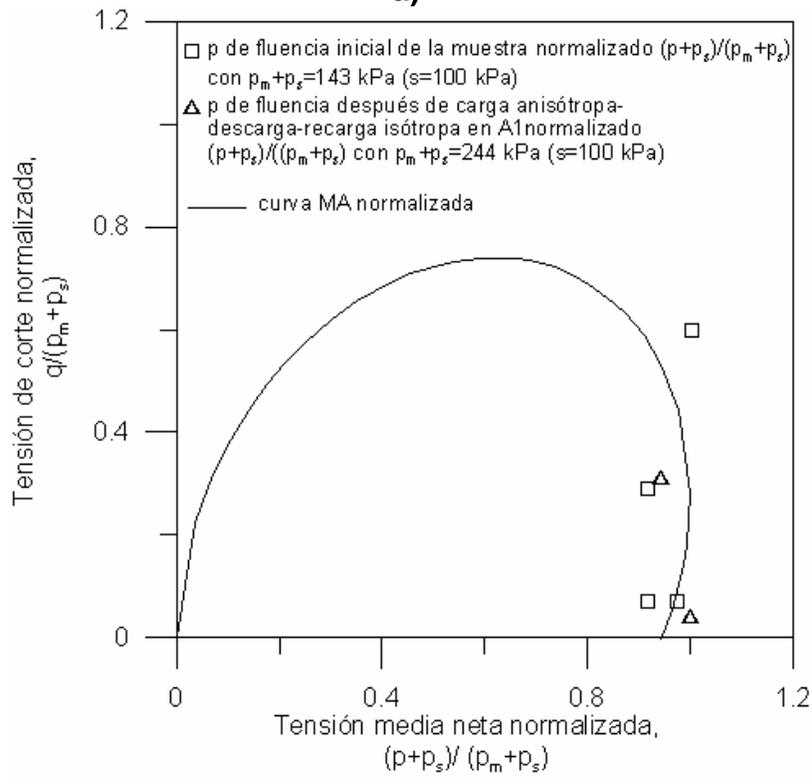


Figura 6.44 Superficies de fluencia obtenidas en procesos de carga anisótropa, para diferentes valores de la presión aparente de preconsolidación $(p-u_a)_0$.

En el modelo de Wheeler et al. (2003) se estima que en una trayectoria donde $\eta=\alpha$ no se presentarán cambios de deformación de corte, es decir se presentan iguales deformaciones radiales y axiales. En el caso del modelo de Wheeler et al. (2003) modificado para suelos no saturados, de la ecuación 6.10 se deduce que lo anterior ocurriría donde $\eta_s=\alpha$. Lo anterior es consistente con los resultados experimentales, en los cuales se obtienen deformaciones de corte muy cercanas a cero, en la trayectoria de consolidación con $\eta=0.38$ constante, donde los valores de η_s son muy cercanos al ángulo de inclinación de la curva de fluencia estimado, $\alpha=0.28$. Al aplicar la trayectoria de consolidación con $\eta=0.38$ constante, resulta un valor de $\eta_s=0.32$ en la tensión de fluencia ($p-u_a = 103$ con $q=43$), y se incrementa alcanzando $\eta_s=0.33$ en $p-u_a = 200$ kPa.



a)



b)

Figura 6.45. Tensiones de fluencia y superficies de fluencia normalizadas a) Modelo isotrópico, b) Modelo anisótropo.

En la Figura 6.38 y Figura 6.46 se muestra con mayor claridad las distintas tendencias en la relación entre la deformación radial (ϵ_r) y axial (ϵ_a) seguidas en las trayectorias de consolidación con diferentes relaciones η . Se observa que al incrementar la relación η , la relación (ϵ_a/ϵ_r) es más grande, con la trayectoria $\eta=0.38$ estando más cerca de la condición $\epsilon_a=\epsilon_r$ y con la trayectoria $\eta=0.75$ acercándose al comportamiento seguido en los ensayos bajo condiciones edométricas ($\epsilon_r=0$).

En la Figura 6.47 se presenta la relación entre la deformaciones de corte (ϵ_s) y volumétrica (ϵ_v) durante las trayectorias de consolidación isótropa y anisótropa. Los resultados muestran la tendencia señalada anteriormente, siguiendo una pendiente negativa (ϵ_s/ϵ_v) la trayectoria de carga isótropa, una pendiente muy cercana a cero la trayectoria con $\eta=0.38$ y una pendiente positiva la trayectoria con $\eta=0.75$.

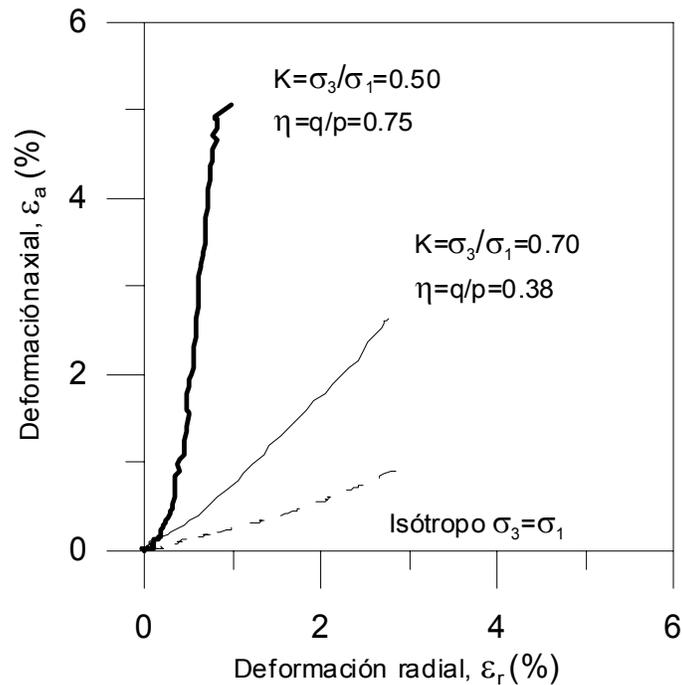


Figura 6.46 Relación de la deformación axial con la deformación radial durante las trayectorias de consolidación isotrópica y anisótropa, bajo una succión matricial de 100 kPa en la muestra.

La Figura 6.48 muestra la evolución de la relación del incremento de la deformación de corte con el incremento de la deformación de volumétrica ($\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$) con la tensión media neta durante las trayectorias de consolidación isótropa y anisótropa. Los valores de ($\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$) en las tensiones media neta de fluencia y final de trayectoria son mostradas en la Tabla 6.14. Los valores más altos de la dirección de incremento de deformación plástica $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ se han medido en la trayectoria con mayor valor de η . La relación $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ para las trayectorias isótropas (ensayos I2 e IW) tienden hacia cero a medida que se incrementa ($p-u_a$) y no alcanzan a estabilizarse, finalizando en -0.121 y -.116. En la trayectoria con $\eta=0.38$ los valores de $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ se estabilizan en valores cercanos a cero al alcanzar la tensión media neta de fluencia y se mantienen cercanamente constantes hasta el final de la etapa. El valor de $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ es de aproximadamente -0.022 en la tensión media neta de fluencia $p-u_a=105$ kPa y el valor al final de la etapa es de 0.030. En la trayectoria de consolidación con $\eta=0.75$ el valor de $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ es de aproximadamente 0.392 en la tensión de fluencia $p-u_a=114$ kPa, que se incrementa al aumentar $p-u_a$ hasta estabilizarse en $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ cercanos a 0.5 cuando se alcanza $p-u_a \approx 140$, terminando la etapa con un valor de $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v=0.488$. En los parrafos anteriores, los datos experimentales de $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ se relacionan con su respectiva relación $\eta=q/(p-u_a)$, en lugar de $\eta_s=q/(p-u_a+p_s)$, debido a que se mantuvo constante durante las distintas trayectorias en estudio, aunque la regla de flujo depende de la relación η_s .

La dirección de incremento de deformación plástica $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ en la tensión media de fluencia (curva de fluencia inicial) puede ser estimada teóricamente. En la Tabla 6.15 se muestran los resultados de $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ proporcionados por los modelos 1) Cam-Clay propuesto por Alonso et al. (1990) para suelos parcialmente saturados (conocido como usualmente como Barcelona Basic Model, BBM) y 2) modelo presentado por Wheeler et al. (2003) (MCCA) pero modificado para suelo no saturado. Para el modelo de Wheeler et al. (2003) (MCCA) modificado para suelos no saturados, se usa la regla de flujo asociada dada por la ecuación 6.10. Para el modelo propuesto por Alonso et al. (1990), la regla de flujo asociada (sin considerar el parámetro α (Ohmaki) introducido en el modelo original) es dada por:

$$\frac{\partial \varepsilon_s^p}{\partial \varepsilon_v^p} = \frac{2q}{M^2(2p + p_s - p_0)} \quad (6.13)$$

Que también se puede representar de la siguiente manera:

$$\frac{\partial \varepsilon_s^p}{\partial \varepsilon_v^p} = \frac{2\eta_s}{M^2 - \eta_s^2} \quad (6.14)$$

Donde $\eta_s = q / (p - u_a + p_s)$.

En la Tabla 6.13 se presentan los parámetros usados. En la Tabla 6.15 se muestran los resultados de $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ proporcionados por los modelos de Alonso et al. (1990) (BBM) y el presentado por Wheeler et al. (2003) para suelos no saturados (MCCA). Puede observarse que, aunque no son suficientemente precisos, los valores proporcionados por el modelo de Wheeler et al. (2003) (modificado para suelos no saturados) representan de forma cualitativa el patrón de comportamiento seguido por los valores obtenidos en los ensayos, acercándose más a los valores experimentales que el otro modelo. Estos resultados sugieren que el suelo compactado muestra un comportamiento mecánico anisótropo bajo una succión de 100 kPa.

El modelo de Wheeler, en suelos no saturados, predice cambios de los valores de $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$, al incrementar la tensión media neta sobre la tensión de fluencia, en las trayectorias de η constante, aún cuando el ángulo de inclinación de la superficie de fluencia ($\alpha=0.28$) permanezca constante. Esto es debido a que los valores de $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$, dependen de la relación η_s . Aunque, lo anterior explica adecuadamente los cambios observados de $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$, en los ensayos A1 y AW, después de alcanzar la tensión media de fluencia, en el caso de la trayectoria de carga isotrópica se observa una tendencia hacia un comportamiento isotrópico en $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$, que no es predicho (véase las Tablas 6.14 y 6.15).

Tabla 6.14 Relación $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ experimental sobre la tensión de media neta de fluencia y la final de la trayectoria para los ensayos isotrópicos y anisótropos en succión matricial de 100 kPa.

Ensayo	s (kPa)	Relación η en la trayectoria	En la tensión media neta de fluencia		Al final de la trayectoria	
			$p-u_a$ (kPa)	$\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$	$p-u_a$ (kPa)	$\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$
I2	100	Isótropo*	110	-0.206	200	-0.121
IW	100	Isótropo*	105	-0.214	200	-0.116
A1	100	0.38	103	-0.022	200	0.030
AW	100	0.75	114	0.392	200	0.488

* $q=10$ kPa

Tabla 6.15 Relación $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ teórica sobre la tensión de media neta de fluencia y la final de la trayectoria para los ensayos isótropos y anisótropos en succión matricial de 100 kPa.

Relación η en la trayectoria	s (kPa)	En la tensión media neta de fluencia			Al final de la trayectoria		
		$p-u_a$ (kPa)	Modelo (BBM) $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$	Modelo (MCCA) $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$	$p-u_a$ (kPa)	Modelo (BBM) $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$	Modelo (MCCA) $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$
0 (Isótropo)*	100	110	0.101	-0.289	200	0.107	-0.329
0.38	100	103	0.435	0.021	200	0.497	0.076
0.75	100	114	1.092	0.577	200	1.285	0.734

* $q=10$ kPa

Estos cambios observados de $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ pueden ser explicados mediante los conceptos de elastoplasticidad en suelos con anisotropía transversal (por ejemplo Wheeler et al., 2003), y donde las deformaciones volumétricas plásticas generadas inducen la expansión y rotación de la superficie de fluencia. En el caso de la trayectoria $\eta=0.38$ (cuyo valor se acerca mucho al ángulo de inclinación estimado de la superficie de fluencia) el hecho de que $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ se mantenga prácticamente constante en valores cercanos a cero, después de alcanzar la tensión media neta de fluencia, sugiere que dicha trayectoria no induce la rotación de la superficie de fluencia. Esto es consistente con lo observado en la trayectoria de consolidación con $\eta=0.38$, descarga y reconsolidación isótropa bajo una succión matricial constante de 100 kPa, efectuado en el ensayo A1 (descrito anteriormente en esta misma sección).

El patrón de comportamiento descrito anteriormente puede ser observado también en los perfiles de desplazamiento y deformaciones radiales de la muestra en las etapas de consolidación. Estos perfiles son presentados en la Figura 6.49 y en la Figura 6.50. Los perfiles se obtienen al mover el sensor verticalmente por medio de un motor eléctrico y se relacionan con los desplazamientos verticales del sensor medidos con LVDTs externos colocados sobre la base móvil (véase capítulo 3). Los perfiles se representan con la escala horizontal aproximadamente 10 veces mayor que la escala vertical y no se representa el diámetro real de la muestra.

Los perfiles presentan una mayor deformación radial en la muestra en la trayectoria de carga isótropa, esta deformación disminuye para $\eta=0.38$ y se acerca bastante a las condiciones de deformación radial nula en la trayectoria $\eta=0.75$. Por otra parte, puede observarse la falta de uniformidad en los desplazamientos radiales a lo largo del espécimen, ya que se presentan

mayores deformaciones en la parte central del espécimen y son nulos en sus bordes. La falta de uniformidad es debida a la fricción entre los bordes del espécimen y el disco cerámico del triaxial. Puede observarse que la no uniformidad en los desplazamientos radiales es más notoria en la trayectoria isótropa, y es muy poco perceptible en la trayectoria $\eta = 0.75$. También, son notorias algunas irregularidades presentes en los puntos que se marcan aproximadamente los puntos 1/3 y 2/3 de elevación de la muestra. Estas irregularidades son debidas al proceso empleado al preparar la muestra por compactación en tres capas.

En la Figura 6.37 y la Tabla 6.11 se presentan los cambios en e_w producidos durante las consolidaciones isótropas y anisótropas de muestras bajo succión de 100 kPa. Los cambios en e_w son muy pequeños, aunque puede apreciarse una tendencia a reducirse el cambio en e_w al incrementar la relación η , llegando a ser casi nulos los cambios cuando se aplicó la trayectoria $\eta = 0.75$. Como fue descrito en la sección 6.3.2.4, durante la trayectoria de compresión isótropa bajo una succión matricial de 100 kPa, el índice de poros disminuyó de $e = 0.834$ a 0.721 , generando un ligero movimiento de las curvas de retención principales. Sin embargo, el estado del suelo permaneció dentro de la zona de “scanning” entre ambas curvas principales. El mismo comportamiento puede ser asumido para los cambios de e_w en las trayectorias de consolidación $\eta = 0.38$ y 0.75 . Dentro de ésta zona, Romero y Vaunat (2000) y Vaunat et al. (2000) asumieron, también, una respuesta reversible de los cambios de la relación de agua en las trayectorias de carga/descarga. Los cambios en e_w esta zona dependen únicamente de la rigidez hidráulica elástica contra cambios de tensión neta propuesta por estos autores (pendiente de la línea de descarga-recarga en un diagrama $e_w : \ln(p - u_a)$ en succión constante), y no son afectados por el índice de poros, e , de la muestra. La rigidez hidráulica elástica contra cambios de tensión neta propuesta por estos autores predice una reducción de la relación de agua durante la consolidación, tal como fue la respuesta observada. Sólo se determinó la rigidez hidráulica elástica contra cambios de tensión neta en la trayectoria de consolidación isótropa, bajo una succión matricial de 100 kPa, por lo cual no es posible concluir sobre las diferencias observadas en los cambios de e_w cuando se aplicaron trayectorias de consolidación con $\eta = 0.38$ y 0.75 .

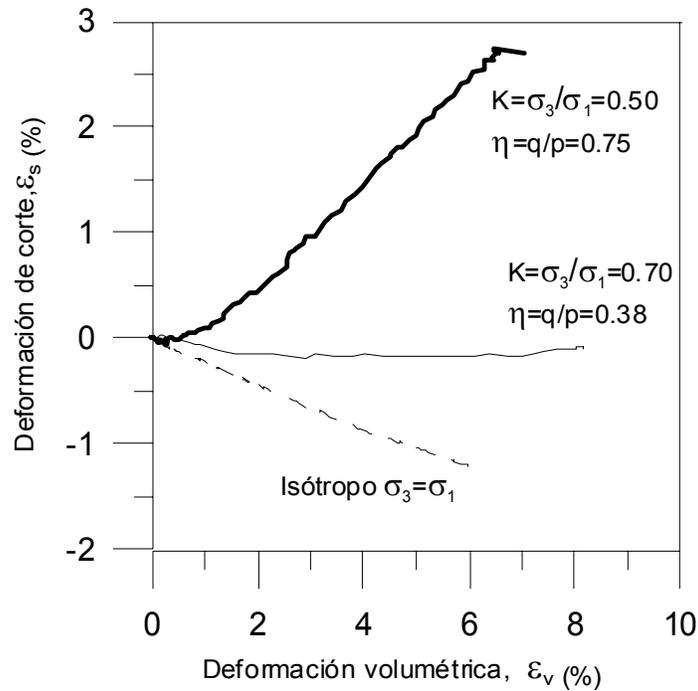


Figura 6.47 Relación de la deformación de corte con la deformación de volumétrica durante las trayectorias de consolidación isotrópica y anisótropa, bajo una succión matricial de 100 kPa en la muestra.

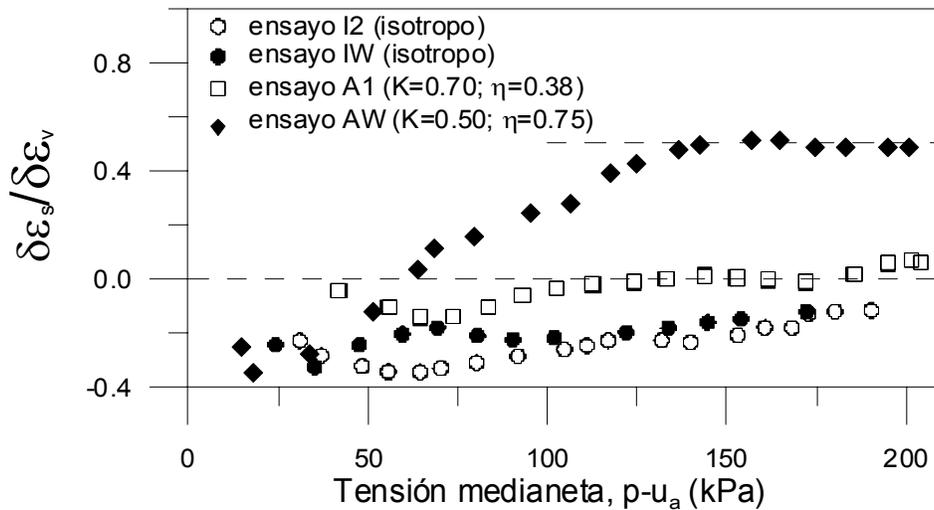


Figura 6.48 Evolución de la relación del incremento de la deformación de corte con el incremento de la deformación de volumétrica durante las trayectorias de consolidación isotrópica y anisótropa, bajo una succión matricial de 100 kPa en la muestra.

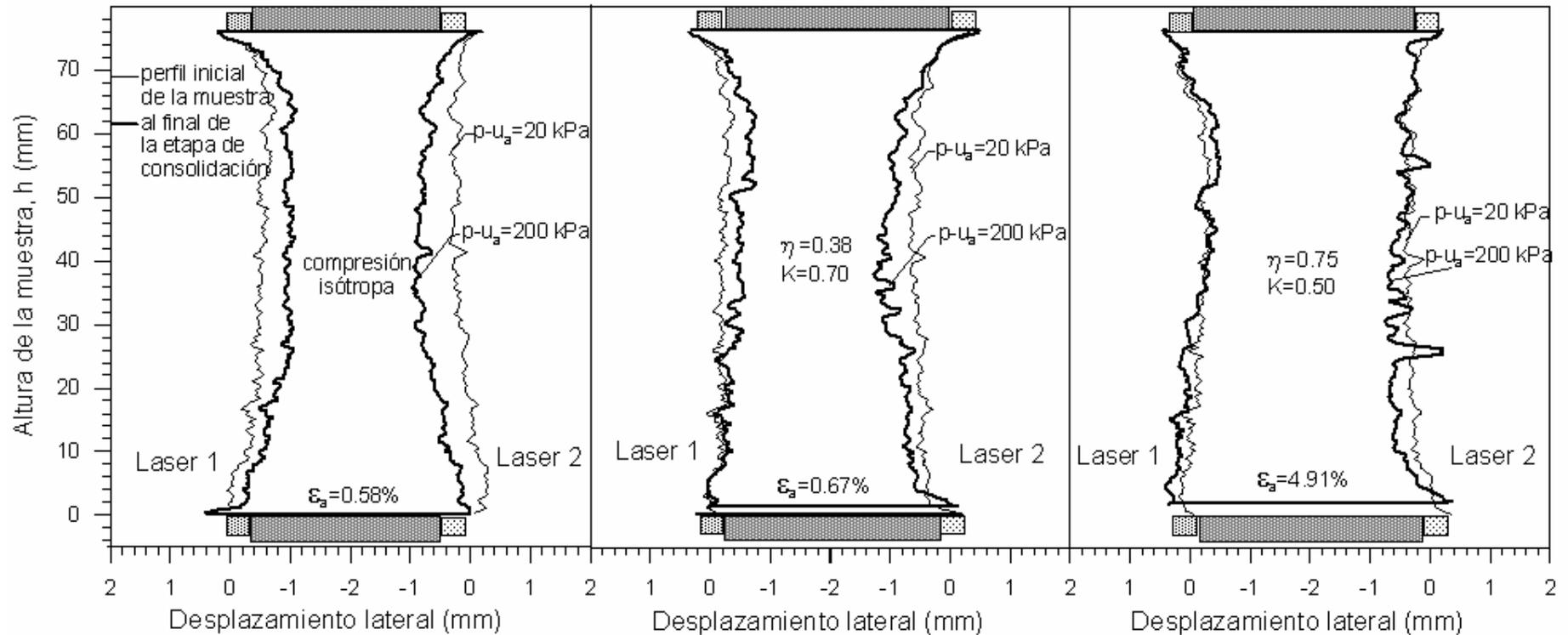


Figura 6.49 Perfiles de los desplazamientos radiales de las muestras al inicio y final de las etapas de consolidación isotrópica y anisótropa, bajo una succión matricial de 100 kPa. Escala horizontal es aproximadamente 10 veces la escala vertical. En la figuras no es representado el diámetro real de la muestra.

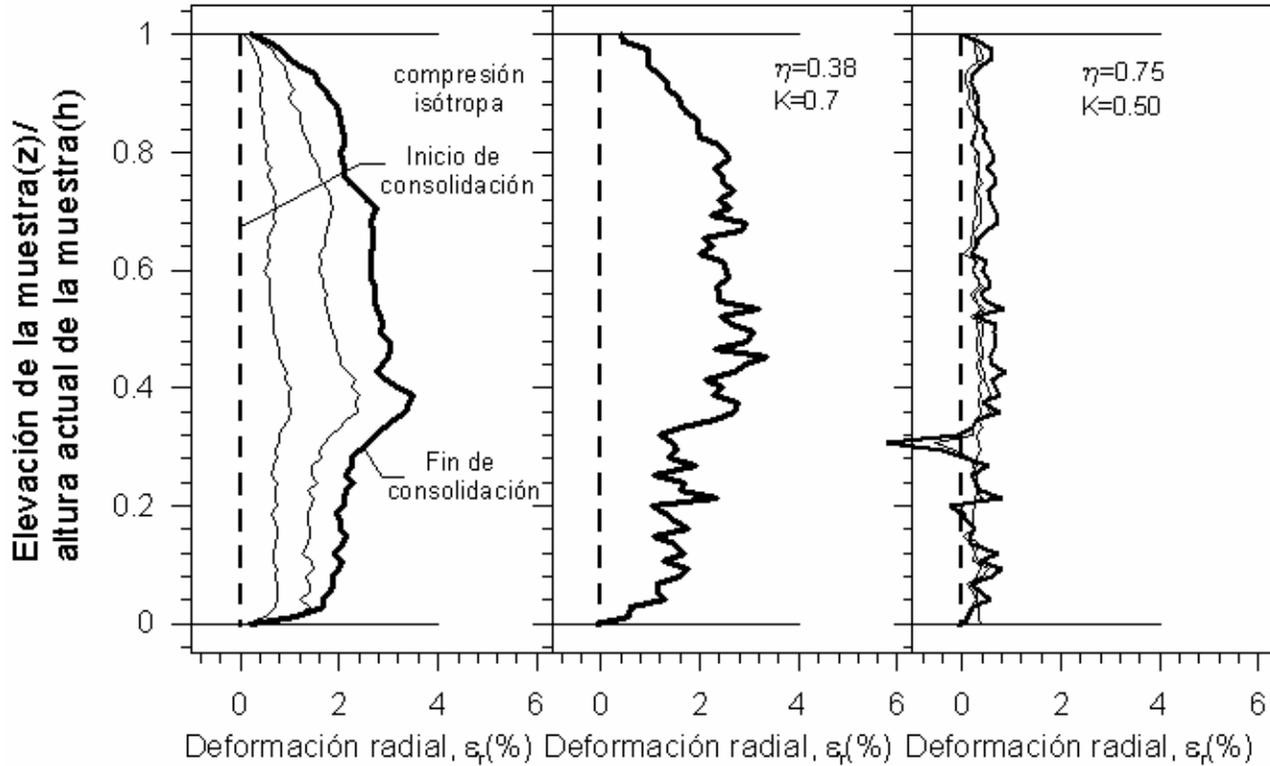


Figura 6.50 Evolución de perfiles de las deformaciones radiales de las muestras durante las etapas de consolidación isotrópica y anisótropa, bajo una succión matricial de 100 kPa.

6.4.2.3 Comparación entre consolidación bajo succión matricial constante de 100 kPa y consolidación bajo condiciones saturadas.

En la Figura 6.51 se presentan las superficies de fluencia normalizadas teóricas que cercanamente ajustan las tensiones de fluencia normalizadas de la muestra saturada con deformaciones de colapso en la saturación (usando el Modelo Cam-Clay y normalizando con respecto a p_0') y de la muestra en succión matricial de 100 kPa, con deformaciones despreciables de hinchamiento (usando el Modelo de Wheeler et al., 2003; modificado para condiciones no saturadas y normalizando respecto a (p_m+p_s)).

Cuando se aplica una trayectoria de carga isotrópica, la dirección de incremento de deformación plástica $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ en las tensiones de fluencia también sugiere un cambio desde un comportamiento a mecánico anisótropo en las muestras con succión de 100 kPa a un comportamiento cercanamente isotrópico cuando la muestra está bajo una succión de 0 kPa y sufrió deformaciones

volumétricas de colapso durante la saturación. En la Figura 6.52 se presenta la evolución de las relaciones $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ en trayectorias de consolidación similares, tanto en muestras bajo una succión de 100 kPa como en muestras en condiciones saturadas y con deformaciones volumétricas de colapso previo. Las trayectorias son: consolidación isótropa (véase Figura 6.52a); consolidación con $\eta=0.36$ y 0.38 (véase Figura 6.52b); y consolidación con $\eta=0.75$ y 0.86 (véase Figura 6.52c). La evolución de la relación $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ sigue tendencias diferentes, estando en todos los casos la relación $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ de la muestra saturada por arriba de la evolución de $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ de la muestra bajo succión matricial de 100 kPa.

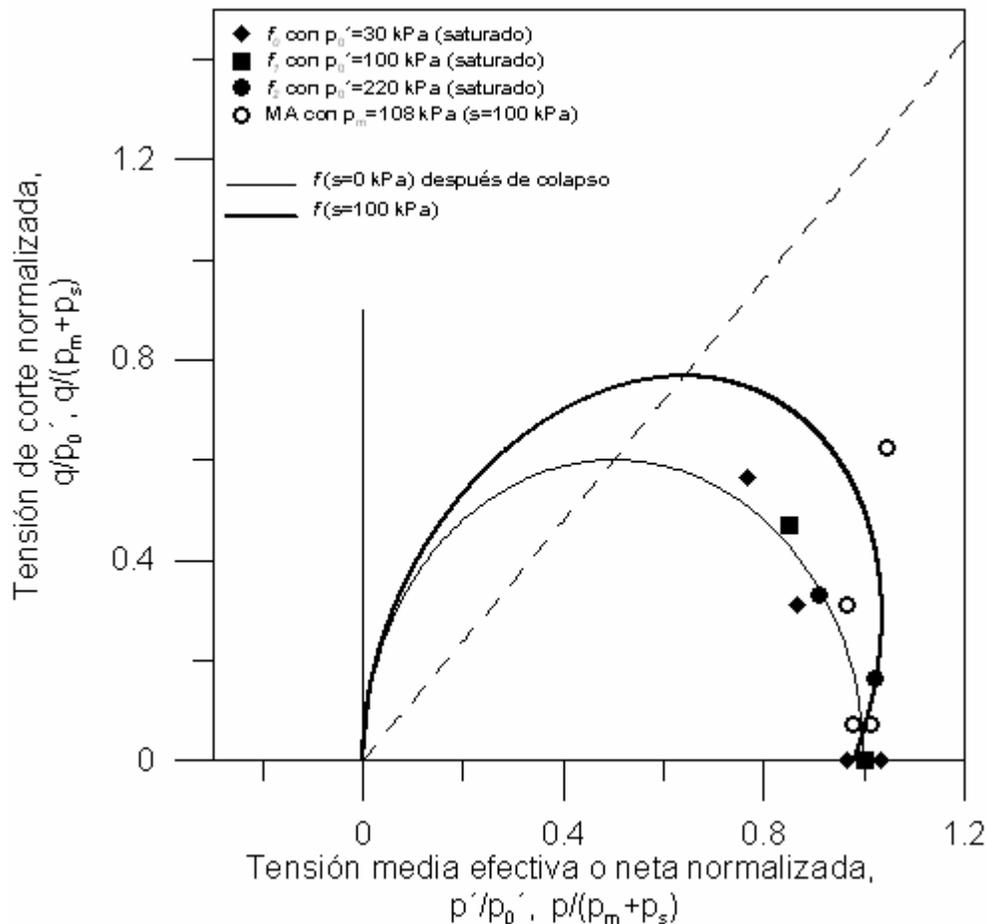
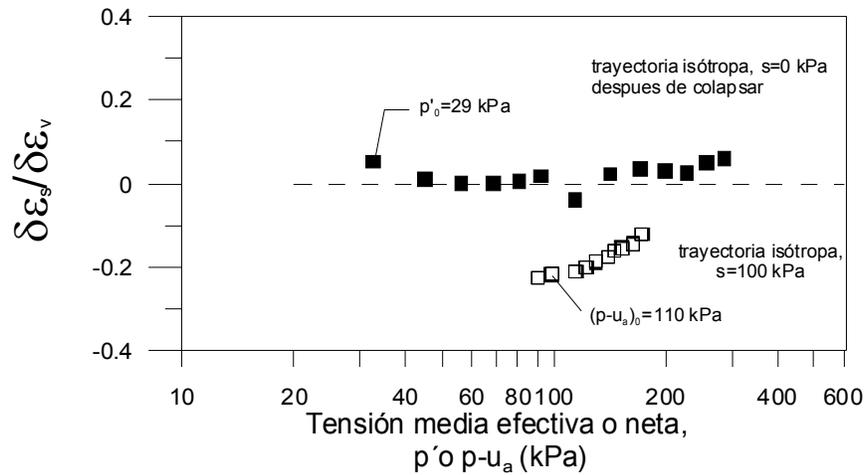
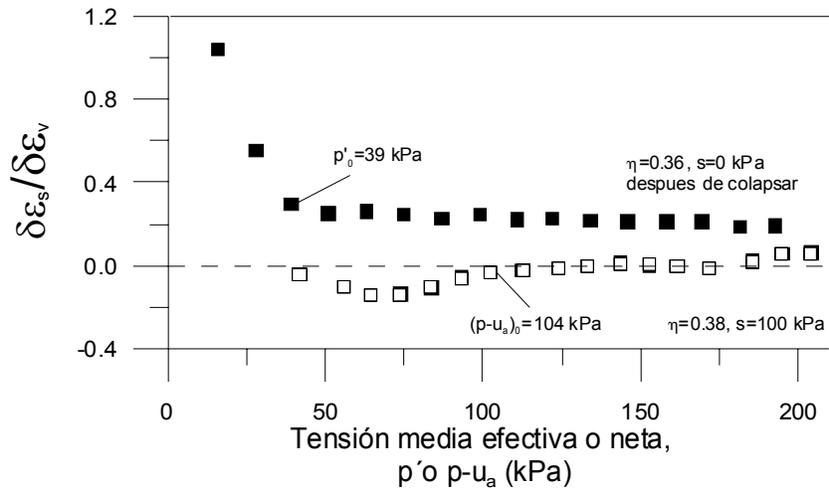


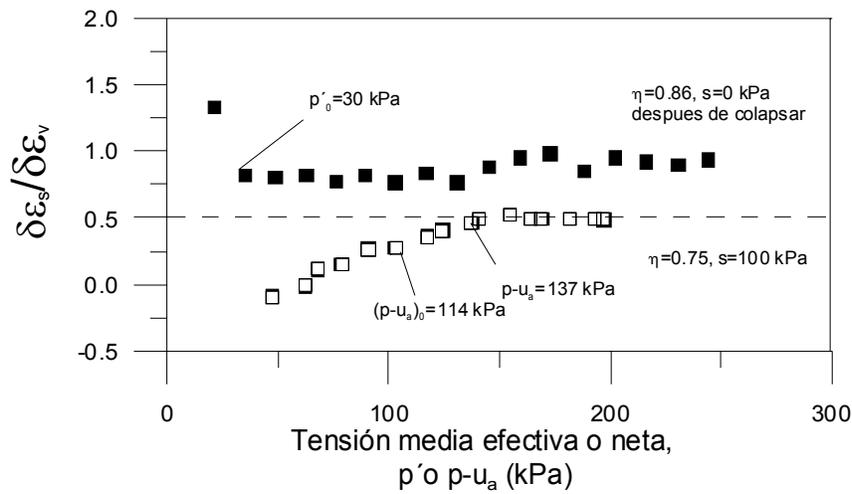
Figura 6.51 Valores normalizados de las tensiones de fluencia, de la muestra con succión matricial de 100 kPa y muestra saturada con deformaciones volumétricas de colapso previo, obtenidos en las trayectorias de consolidación isótropa y anisótropa, y en trayectoria de carga anisótropa, descarga y recarga isótropa. Superficies de fluencia teóricas normalizadas.



a)



b)



c)

Figura 6.52 Evolución de la relación del incremento de la deformación de corte con el incremento de la deformación de volumétrica durante las trayectorias de consolidación isotrópica y anisotrópica en: 1) condiciones saturadas con colapso previo, y 2) bajo una succión matricial de 100 kPa en la muestra.

Cuando se sigue una trayectoria de consolidación isótropa se genera un comportamiento cercano a $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v = 0$ (con $\delta\varepsilon_a = \delta\varepsilon_r$) en el caso de la muestra saturada, mientras que en la muestra bajo succión de 100 kPa se dan valores negativos de $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ (con $\delta\varepsilon_a < \delta\varepsilon_r$). Cuando la muestra está bajo una succión de 100 kPa, el comportamiento cercano a $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v = 0$ se presenta en la trayectoria de consolidación anisótropa $\eta = 0.38$. En las muestras bajo una succión de 100 kPa, a excepción de la trayectoria con $\eta = 0.38$, los valores de $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ crecen a medida que la tensión media neta es incrementada (llegando a estabilizarse en la trayectoria $\eta = 0.75$). En la muestra saturada, los valores de $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$, aunque experimentan reducciones durante su evolución, permanecen más estables.

Estas curvas sugieren que al saturar la muestra se manifiesta el borrado de la anisotropía presente en la muestra con succión matricial de 100 kPa (cuyo comportamiento anisótropo se describió en el apartado anterior). Bajo condiciones de saturación total se presenta una curva de fluencia, claramente, representativa de suelos isótropos.

En la Figura 6.53 se presenta la evolución de $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ experimentada en trayectorias de consolidación isótropa bajo diferentes succiones (similar a la Figura 6.22 pero sólo se muestran los resultados después de la tensión de fluencia). Se observa que las muestras que tan solo presentan pequeñas deformaciones de hinchamiento durante la etapa de equilibrio (ensayos S11, I2 e I3), manteniendo aproximadamente la misma fábrica de agregados, al alcanzar la tensión de fluencia presentan distintos valores de $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$. En este caso, al no sufrir deformaciones volumétricas importantes en la etapa previa, las diferencias deben ser atribuidas a los cambios de succión matricial y grado de saturación. En la Figura 6.54 se muestra el efecto de la succión matricial y del grado de saturación sobre el valor de $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ generada en la tensión media (neta o efectiva) de fluencia durante las trayectorias de consolidación isótropa con control de succión. En las muestras que mantienen aproximadamente la misma fábrica de agregados (“sin colapso previo”), el mayor cambio de $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ se observa entre una succión de 10 a 100 kPa, donde se produce un cambio de grado de saturación de tan solo 7%. El comportamiento anterior sugiere que en las muestras “sin colapso previo”, los cambios de $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ en la tensión media de fluencia son afectados por la succión matricial. Adicionalmente, se observa que la saturación total “sin colapso previo” de la muestra no borra totalmente la anisotropía de la muestra, teniendo que

ejecutar la consolidación isótropa por arriba de p' de 80 kPa para que la muestra presente una relación $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ muy próxima a cero. Por otra parte, la muestra colapsada durante la etapa de saturación presenta un comportamiento característico de suelos isótropos al alcanzar la tensión media efectiva de fluencia.

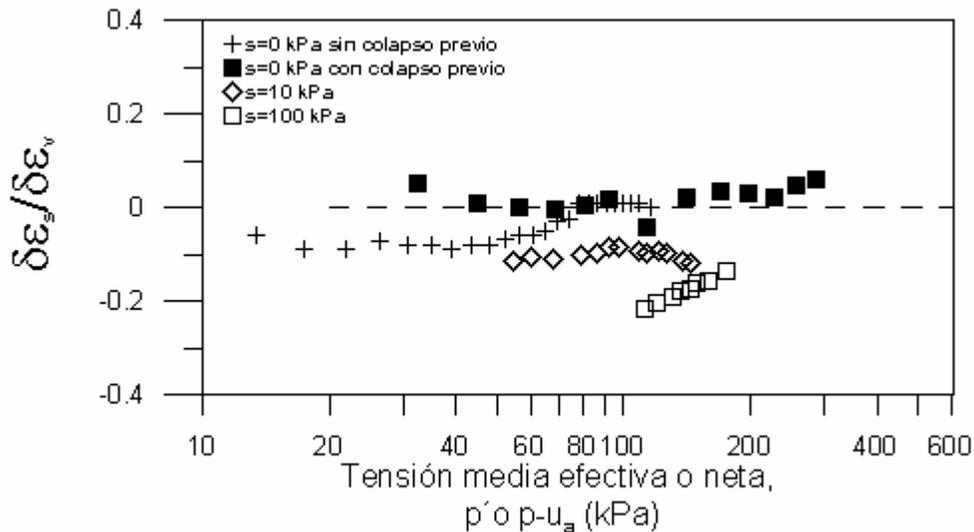


Figura 6.53 Evolución de la de la relación del incremento de la deformación de corte con el incremento de la deformación de volumétrica durante las trayectorias de consolidación isótropa bajo condiciones saturadas y parcialmente saturadas de la muestra. Sólo se presenta la evolución de $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ experimentada después de la tensión de fluencia.

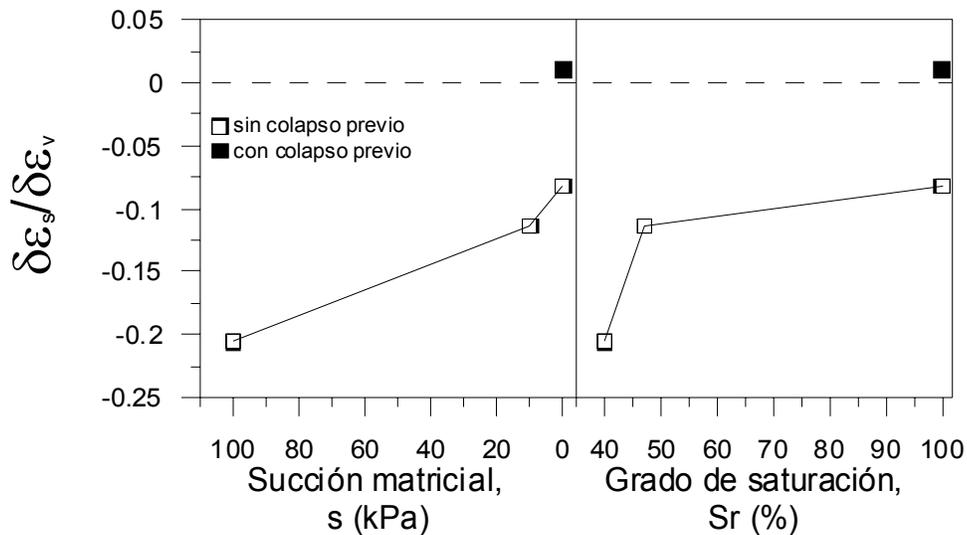


Figura 6.54 Gráfica de $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ experimentada en la tensión media neta (o efectiva) de fluencia, durante la consolidación isótropa, con la succión matricial ($s-\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$) y con el grado de saturación ($Sr-\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$).

6.5 Características del colapso inducido por mojado bajo diferentes relaciones de tensión.

6.5.1. Descripción de trayectorias.

En los ensayos IW y AW se realizan etapas de reducción cuasi-continua de succión matricial, usando el método de traslación de ejes, desde una succión de 100 kPa a 10 kPa, y posteriormente alcanzar una succión de 0 kPa mediante la aplicación del método de columna negativa de agua. La Figura 6.55 y la Figura 6.56 muestran estas trayectorias en el espacio tensión media neta-succión matricial-tensión de corte, $(p-u_a)$ - s - q y en el plano tensión de corte de corte- succión matricial, q - s .

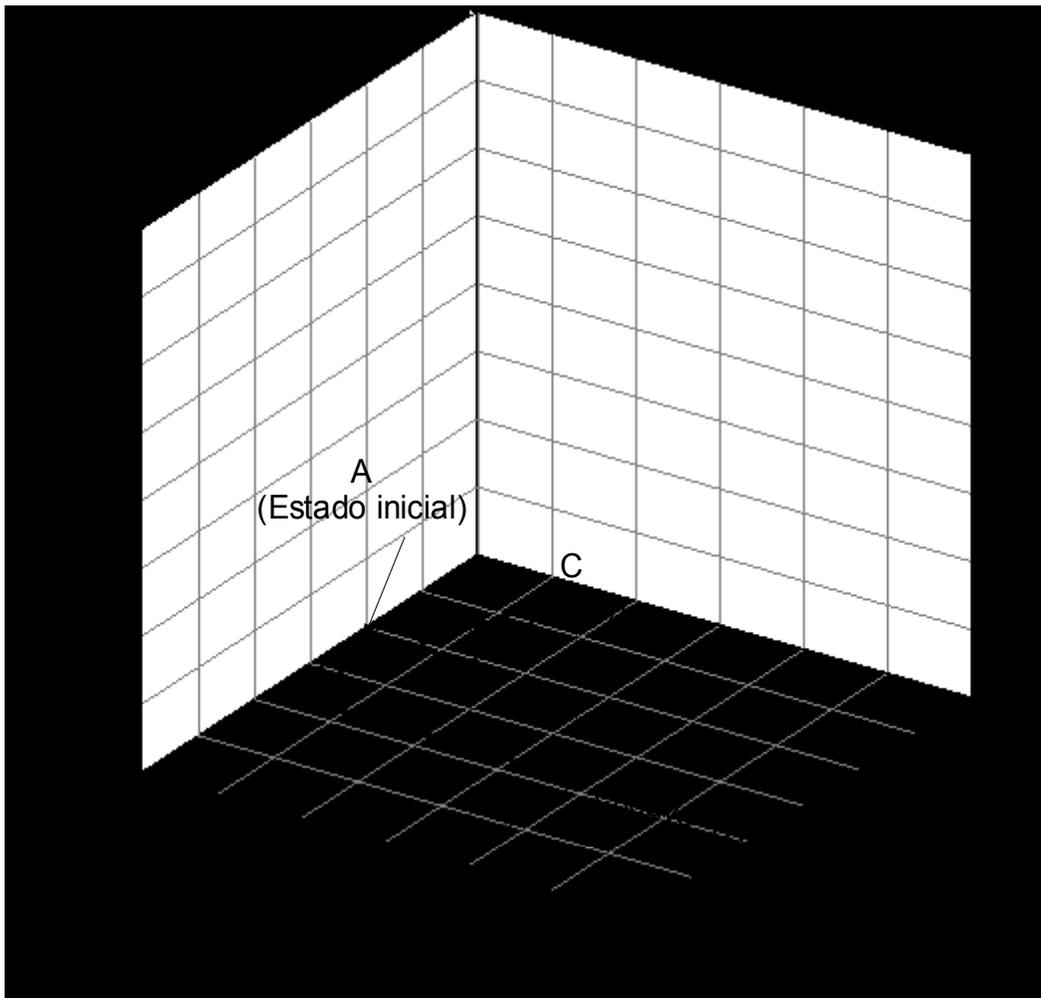


Figura 6.55 Etapa de equilibrio (A-B), trayectoria de compresión, isotrópica o anisotrópica, bajo condiciones de succión controlada (B-C) y etapa de mojado (C-D), en el espacio $(p-u_a)$ - s - q , para los ensayos AW y IW.

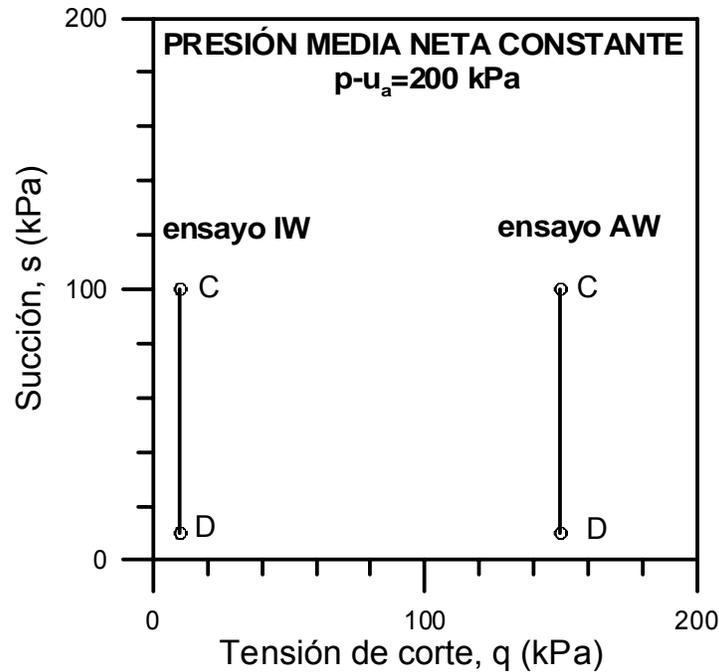


Figura 6.56 Trayectoria de mojado bajo condiciones de relación $q/(p-u_a)$ constante (C-D), en el plano $(p-u_a)$ - s , para los ensayos IW y AW.

Las trayectorias de mojado en los ensayos IW y AW se presentan por los tramos C-D en la Figura 6.55 y la Figura 6.56. Ambas trayectorias de mojado se realizan bajo una presión neta media ($p-u_a$) de 200 kPa, pero en el ensayo IW la reducción de succión matricial se llevó a cabo bajo condiciones de tensión isotropa (relaciones de tensión de $q/(p-u_a) \approx 0$ (con una tensión de corte, q , de 10 kPa) y en el ensayo AW bajo una relación $q/(p-u_a)$ constante de 0.75 (tensión de corte, q , de 150 kPa). La reducción cuasi-continua de succión matricial, usando el procedimiento de traslación de ejes, consiste en incrementar la presión de agua a una velocidad prefijada mientras es mantenida constante la presión de aire de 220 kPa. Esta etapa se realiza después de una compresión isotropa en el ensayo IW y después de una trayectoria de consolidación anisótropa con relación de tensión constante de $q/(p-u_a) = 0.75$ en el ensayo AW. Se seleccionó una velocidad de reducción de succión matricial de 4.5 Pa/min (0.27 kPa/h) considerando una duración de la trayectoria (s variando de 100 a 10 kPa) de 14 días, para realizar el ensayo en un tiempo adecuado y asegurar una correcta aplicación de la succión.

Con el procedimiento usado se pretende obtener una historia continua de las deformaciones generadas en el espécimen y relacionarlas con la succión aplicada en los bordes. La selección de este procedimiento de mojado se apoyó en el hecho de que la trayectoria genera un

comportamiento hidromecánico acoplado sobre el espécimen, al producirse tanto flujo de agua como deformaciones. Para poder caracterizar adecuadamente este comportamiento acoplado es necesario efectuar el mojado usando pequeños escalones de succión matricial, evitando los cambios bruscos en su aplicación, pero esto genera la existencia de un número grande de escalones y un tiempo de ensayo excesivamente largos. Después de finalizar el período de estabilización, al terminar de la trayectoria reducción continua de succión usando traslación de ejes, se sigue una trayectoria de succiones desde 8 kPa hasta valores cercanos a cero usando la técnica de columna negativa de agua (similar al procedimiento presentado por Alonso y Romero, 2003).

6.5.2 Resultados del comportamiento del suelo.

Las curvas presentadas en esta sección corresponden a registros cuasi-continuos de los resultados obtenidos durante la ejecución de las rampas cuasi-continuas de reducción de succión matricial, pero que las curvas resultantes serán representadas acompañadas con símbolos espaciados para distinguir los ensayos. Estos ensayos se realizaron sobre muestras que mantuvieron al final de la etapa de equilibrio un arreglo de partículas (fábrica) y un contenido de agua cercano al existente en el estado final de la compactación, pero que tuvieron distintas historias de tensiones durante la etapa de consolidación. En la Tabla 6.16 se presentan las condiciones iniciales y finales en la trayectoria de mojado (dividido en etapas de mojado I, II y III) bajo estado de tensiones isótropo y anisótropo. Ensayos IW y AW.

Los resultados de las deformaciones y cambios de humedad del suelo con el tiempo, durante la reducción cuasi-continua de la succión matricial, de 100 a 10 kPa, realizada en los ensayos IW y AW se presentan en la Figura 6.57 y la Figura 6.58 respectivamente. La deformación radial usada es la obtenida con base a las medidas locales realizadas con los sensores láser. En el mojado bajo un estado de tensiones isótropo (véase Figura 6.57, ensayo IW) la deformación axial obtenida con medida local es mayor que la obtenida con medida externa, tal y como ocurrió en las etapas de consolidación (véase las Figuras 5.10 y 5.13). Esto podría indicarnos la existencia de una mayor deformación axial en la parte central del espécimen debido a las restricciones presentes en los bordes, como es señalado por Germaine y Ladd (1988). Las restricciones en los bordes, en el equipo triaxial, generan condiciones de no uniformidad de tensiones y deformaciones en la

muestra, que en trayectorias de consolidación isótropa podrían ocasionar un estrechamiento hacia el centro del espécimen (véase la Figura 6.49), y unas medidas de deformación axial que van en aumento hacia dicho centro. Este comportamiento se observó también en la trayectoria de mojado bajo condiciones de tensión isótropa (véase la Figura 6.64).

Tabal 6.16 Condiciones iniciales y finales en la trayectoria de mojado (dividido en etapas de mojado I, II y III) bajo estado de tensiones isótropo y anisótropo. Ensayos IW y AW.

Ensayo	Final de etapa de consolidación						Final de etapa de mojado I			
	e	e_w (w ,%)	Sr_0 (%)	$p-u_a$ kPa	u_a-u_w kPa	η (K)	e	e_w (w ,%)	Sr (%)	u_a-u_w kPa
AW	0.706*	0.334 (12.3)	47.3*	200	100	0.75 (0.5)	0.615	0.445 (16.4)	72.4	10
IW	0.689	0.322 (11.9)	46.7	200	100	Isótropo (1.0)	0.606	0.405 (14.9)	66.9	10

Ensayo	Final de etapa de mojado II				Final de etapa de mojado III			
	e	e_w (w ,%)	Sr (%)	u_a-u_w kPa	e	e_w (w ,%)	Sr (%)	u_a-u_w kPa
AW	—	—	—	—	0.615	0.480 (17.7)	78.0	1
IW	0.607	0.437 (16.1)	72.1	5	0.576*	0.432* (15.9)	74.9*	1*

Ensayo	Cambios en Final de etapa de mojado I			Cambios en Final de etapa de mojado total		
	Δe	Δe_w (Δw ,%)	ΔSr (%)	Δe	Δe_w (Δw ,%)	ΔSr (%)
AW	0.090	0.111 (4.1)	25.1	0.090	0.146 (5.4)	30.7
IW	0.084	0.083 (3.1)	20.2	0.082	0.116 (4.3)	25.4

*En mojado III (al aplicar columna negativa de agua) en IW se presentó contracción por secado.

En el mojado bajo una relación de tensión $q/(p-u_a) = 0.75$, se observa poca diferencia entre deformación axial local y la global, siendo un poco mayor la global. Esta inconsistencia, con respecto a lo usualmente observado, puede ser causada por una presencia de efectos despreciables de la restricción de los bordes sobre la deformación de la muestra cuando se sigue una trayectoria de deformación radial nula (o cercana a cero) en un equipo triaxial. En este caso la muestra experimenta una deformación radial muy pequeña, manteniendo su diámetro en condiciones cercanas a la uniformidad a lo largo de todo el espécimen después de realizarse la consolidación

anisótropa y la etapa de mojado (como puede observarse en los perfiles de las Figuras 6.49 y 6.64).

En la Figura 6.57 y en la Figura 6.58 se observa que al final de la reducción de la succión matricial aplicada en los bordes, cuando se alcanzó una succión de 10 kPa, las deformaciones y la humedad (dada en relación de agua, e_w) siguen variando. La falta de estabilización de estos parámetros indican que la velocidad de reducción de succión matricial usada no fue lo suficientemente lenta para asegurar que la succión, u_a-u_w , aplicada en los bordes de la muestra corresponda a la succión matricial global existente dentro de la muestra. Al reducir la succión en los bordes se causa la entrada de agua a la muestra, generando el equilibrio entre la succión matricial en sus extremos con la succión aplicada. Sin embargo, se requiere más tiempo para lograr el equilibrio hacia el centro de la muestra. Es posible que, en el inicio de estas trayectorias, la muestra presente en los poros inter-agregados una mayor cantidad de agua forma de meniscos aislados que en forma de agua libre continua (las muestras presentan $S_r=47.3\%$ en AW y 46.7% en IW con probable predominio de agua en los poros intra-agregados), lo cual influiría en el flujo de agua hacia el interior de la muestra. Al aplicar la siguiente reducción de succión, antes de llegar a la estabilización de flujo y deformaciones en toda la muestra, se genera un mayor gradiente entre las condiciones mecánicas presentes en el centro y las impuestas en los extremos, que se acumula a medida que se aplican las reducciones de succión posteriores.

La falta de homogeneidad en la succión matricial a lo largo de la muestra puede generar deformaciones de colapso inducidos por mojado en los extremos de la muestra antes de presentarse en su centro un equilibrio con la succión aplicada. Por lo tanto, las medidas de deformación registrados, que corresponden a la parte central de la muestra, no siempre podrán ser relacionadas a las succiones aplicadas en los bordes. Con el procedimiento empleado se intentó minimizar las diferencias entre las succiones impuestas en los bordes y la presente en el centro de la muestra, sin consumir tiempos de ensayos muy largos, pero esto no siempre pudo lograrse, tal como lo muestran los largos períodos de estabilización que se presentan después de terminar con la reducción de succión. A pesar de este inconveniente, se considera que el procedimiento empleado es más adecuado para estudiar el fenómeno de colapso inducido por mojado que el procedimiento por escalones, debido a que evita diferencias excesivamente grandes entre la

succión aplicada en los bordes y la presente en la región central de la muestra (al iniciar el escalón).

En la Figura 6.59 y Figura 6.60 se muestran las trayectorias de succión matricial con relación de agua (e_w-s) seguidas durante las etapas de mojado en IW y AW. En IW y AW la relación de vacíos (e) se mantienen constante, en 0.689 y 0.706 respectivamente, hasta que experimenta deformaciones de colapso al alcanzar una determinada succión matricial aplicada, de $s \approx 40$ kPa en AW y $s \approx 30$ kPa en AW. La entrada de agua y las deformaciones de colapso continúan al reducirse la succión aplicada, y llegan al final a valores de $e=0.606$ y $e_w=0.405$ en IW, y $e=0.615$ y $e_w=0.445$ en AW.

En la misma figura también se presentan las curvas de retención obtenidas en los ensayos EDO1 y EDO2 descritos en el capítulo 4 (con muestras preparadas de forma similar a los usados en el programa experimental pero con diferentes relaciones de vacíos al final de la compactación estática). Durante el mojado del ensayo EDO1 la relación de vacíos cambió de 0.82 a 0.75 y en el ensayo EDO2 de 0.59 a 0.57. Aunque realizar comparaciones entre estas curvas es complicado debido a la diferente relación de vacíos mostrada, pueden hacerse algunas observaciones. En el tramo inicial, desde $s=100$ kPa hasta aproximadamente $s \approx 40$ kPa, todas las curvas están muy próximas entre sí, presentando pequeños incrementos (con variación lineal) de la relación de agua con el logaritmo de la succión, a pesar de las diferencias en la relación de vacíos. Como ya se describió en el capítulo 4, la forma de las curvas obtenidas en EDO1 y EDO2 sugieren que en el mojado inicial la trayectoria siguió una “scanning curve” antes de alcanzar las curvas de mojado principal, debido a que presentan una típica característica del efecto de histéresis de las curvas de retención antes de sufrir un brusco aumento de contenido de agua. De lo anterior podría sugerirse que las curvas de mojado en IW y AW también siguen una “scanning curve” en la etapa inicial de reducción de succión. Por lo tanto, podría considerarse que en este tramo de “scanning curve”, donde se presentan pequeños cambios de e y e_w , las curvas de mojado en IW y AW representan correctamente la relación e_w-s de la muestra, y no presenta problemas de falta de homogeneidad en la succión matricial a lo largo de la muestra. Aunque, no es posible delimitar el final del tramo de “scanning curve” en estos ensayos.

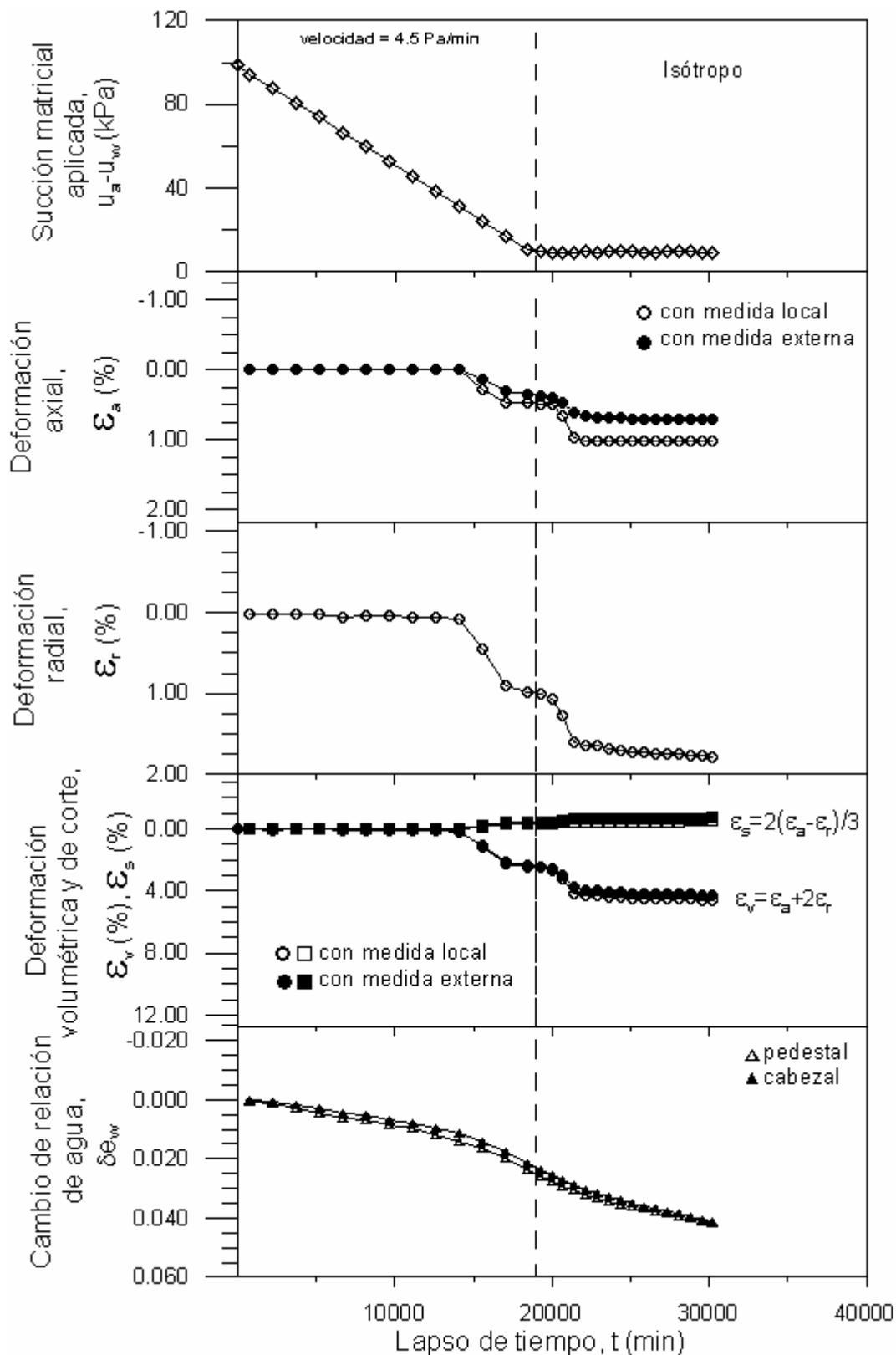


Figura 6.57 Evolución de la succión matricial aplicada en los bordes, deformaciones y variación de agua (en e_w) con el tiempo, en la etapa de reducción cuasi-continua de succión matricial de $s=100$ a 10 kPa, del ensayo IW, bajo condiciones isotrópicas de tensiones ($q \approx 0$ kPa).

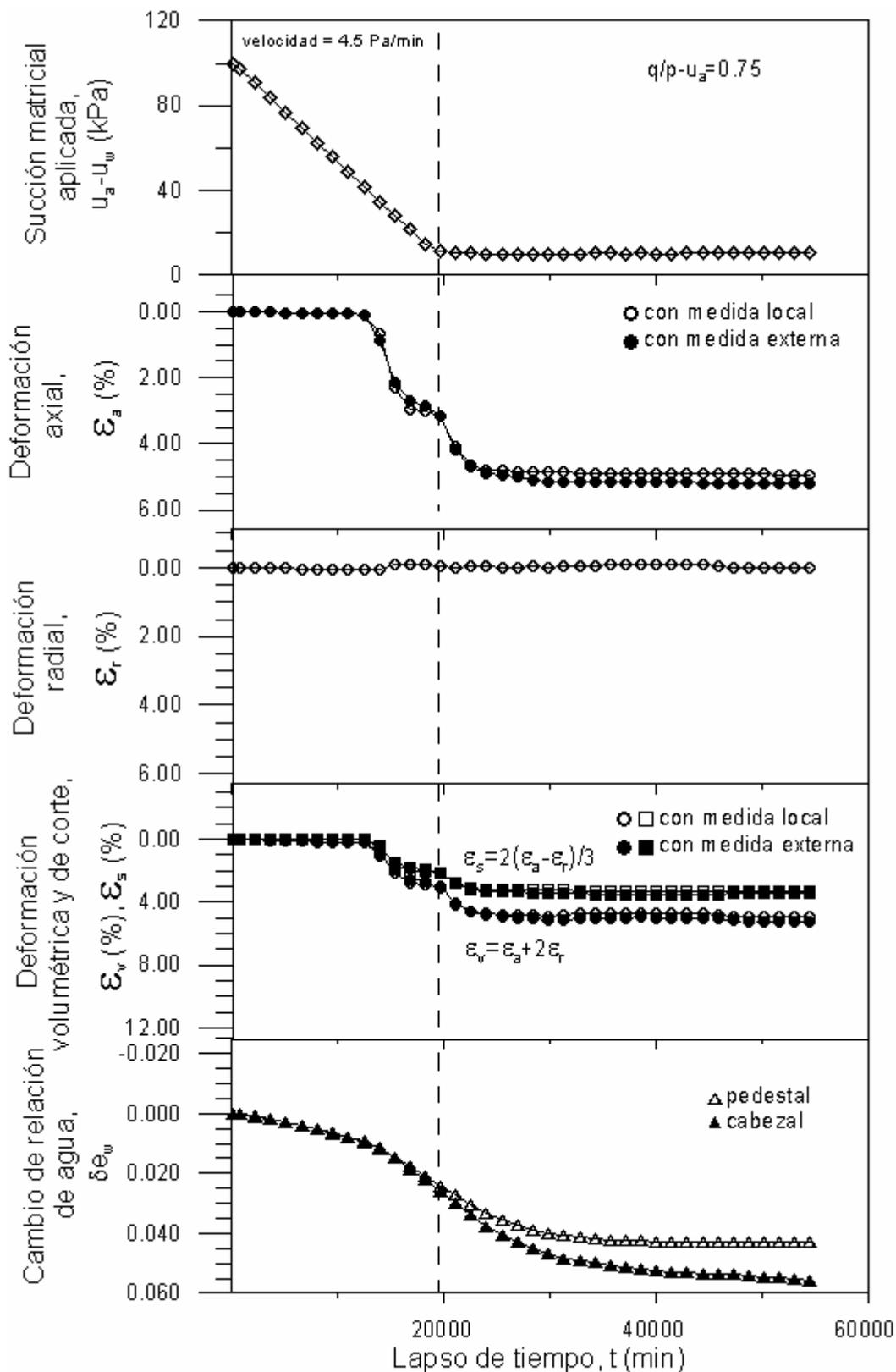


Figura 6.58 Evolución de la succión matricial aplicada en los bordes, deformaciones y variación de agua (en e_w) con el tiempo, en la etapa de reducción cuasi-continua de succión matricial de $s=100$ a 10 kPa, del ensayo AW, bajo condiciones anisótropas de tensiones ($\eta=q/p-u_a=0.75$).

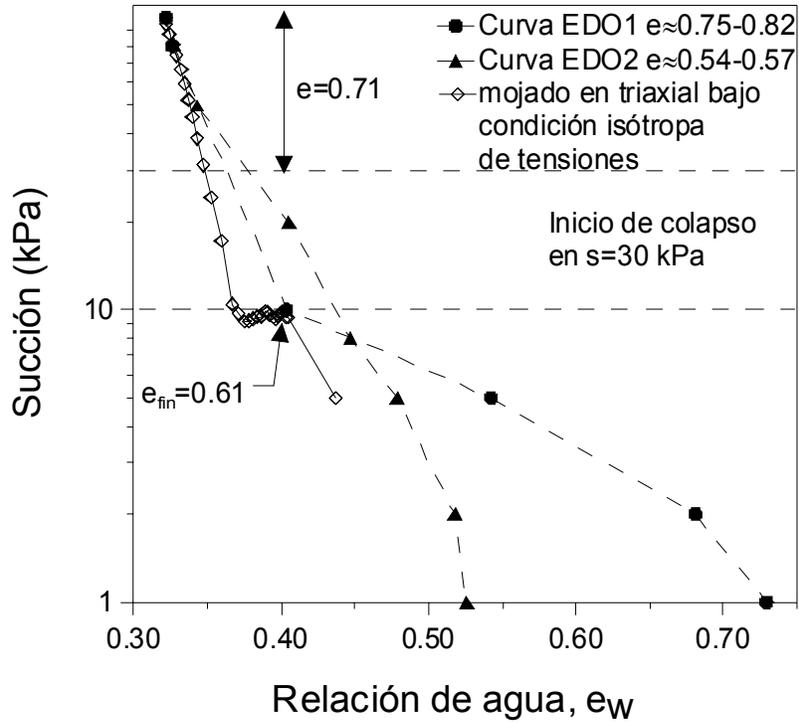


Figura 6.59 Succión matricial (aplicada en los bordes) y relación de agua (e_w), en la etapa de reducción cuasi-continua de succión matricial de $s=100$ a 10 kPa, del ensayo IW, bajo condiciones isotropas de tensiones.

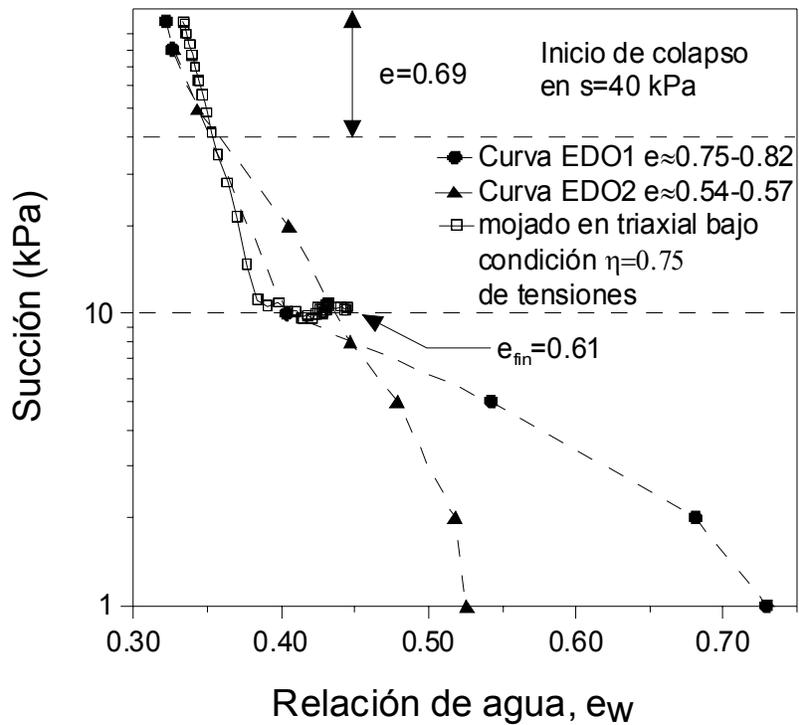


Figura 6.60 Succión matricial (aplicada en los bordes) y relación de agua (e_w), en la etapa de reducción cuasi-continua de succión matricial de $s=100$ a 10 kPa, del ensayo AW, bajo condiciones anisotropas de tensiones ($\eta = q/p - u_a = 0.75$).

Al reducir la succión por debajo de $s \approx 40$ kPa, las curvas de mojado de IW y AW en el espacio (e_w-s) se apartan hacia la izquierda de las curvas de EDO1 y EDO2, cuando podría esperarse que ocuparan el espacio entre las ambas, considerando la relación de vacíos que presentan. Es decir ocupan zonas “no posibles” (siguiendo lo presentado por Vaunat et al., 2000). Lo anterior, puede atribuirse a diferencias entre la succión aplicada en los bordes y la existente en el interior de la muestra, debido a una velocidad de reducción de succión matricial insuficientemente lenta para permitir la homogeneidad en la succión matricial a lo largo de la muestra.

Los resultados de la relación e_w-s al final de la etapa de mojado, hasta $s=10$ kPa, son consistentes con los resultados de la curva de retención de EDO2. El ensayo EDO2 presenta un índice de poros ($e=0.59-0.57$) cercano al observado al final de los ensayos IW y AW ($e=0.61$). Al final de la etapa de mojado, después de permitir la estabilización de la muestra en $s=10$ kPa, la relación e_w-s en IW y AW tienden alcanzar la curva de retención EDO2. Siendo más notorio en AW, lo cual podría ser atribuido a la similar historia de tensiones de EDO2 (trayectoria K_θ en edómetro durante la compactación y mojado) y AW (con deformaciones radiales muy cercanas a cero durante la consolidación y el mojado de la muestra estáticamente compactada, tal como se muestra en las Figuras 6.38 y 6.58).

Aunque no se puede hablar de tendencias en IW y AW, por la falta de más ensayos, en la Figura 6.61 y Figura 6.62 puede observarse una ligeramente mayor entrada de agua en AW ($e_w=0.445$ y $Sr=72.4\%$) que en IW ($e_w=0.405$ y $Sr=66.9\%$) cuando se alcanzó $s=10$ kPa. Esto podría sugerirnos la presencia de diferente capacidad de retención de agua de las muestras, relacionadas con los patrones de deformación experimentados (generando geometrías de poro distintas). Pero, también, hay que considerar que tal pequeña diferencia podría ser causada por la falta de uniformidad de las deformaciones a lo largo del espécimen observada en el ensayo IW.

La Figura 6.61 muestra la variación de índice de poros, relación de agua y grado de saturación de la muestra obtenidos en la reducción cuasicontinua de succión con traslación de ejes de 100 a 10 kPa y realizando escalones de succión mediante columna negativa de agua hasta 0.4 kPa. En el ensayo IW se realizó un escalón de succión con traslación de ejes en $s=5$ kPa y se presentan también resultados de $s=1$ kPa y 0.4 kPa con columna negativa de agua. En el caso de AW sólo

se presenta el escalón en $s=0.4$ realizado con columna negativa de agua. En AW se realizaron escalones en $s=5$ y 1 kPa con columna negativa de agua, pero no se dieron cambios apreciables en índice de poros y relación de agua, tal como se observa en el ensayo IW.

Los resultados observados en la Figura 6.61 y la Figura 6.62 muestran que ambos ensayos, IW y AW, siguen tendencias similares con entrada de agua acompañado con reducción del índice de poros (deformaciones volumétricas de colapso, sin observarse hinchamiento de la muestra), durante la etapa de mojado con estado de tensiones $p-u_a$ y q , tanto isotrópica como anisotrópica, constantes. Este comportamiento es consistente con el modelo de Alonso et al. (1990) que predice deformaciones de colapso (irreversibles) al mojarse suelos cuyo estado de tensiones está sobre la superficie de fluencia. La condición anterior se cumple en los ensayos IW y AW donde en la etapa de consolidación, anterior a la etapa de reducción de succión, se alcanza la superficie de fluencia inicial y la arrastra hasta llevarla al estado de tensiones previo al mojado de la muestra (experimentando deformaciones irreversibles). Por lo tanto, desde el inicio de la etapa, el estado de tensiones de las muestras se encuentra sobre la curva LC, propuesta en Alonso et al. (1990). Durante el mojado la trayectoria de tensiones seguida se encuentran fuera de la región elástica, experimentando las muestras deformaciones de colapso (irreversibles) que generan el movimiento de la curva de fluencia LC.

El cambio en la relación de vacíos al finalizar la estabilización en $s=10$ kPa fué de $\delta e=0.084$ y 0.090 en IW y AW respectivamente (final de etapa de mojado1 en la Tabla). Estos resultados, que son muy cercanos entre sí, son consistentes con lo observado por Lawton et al. (1991) (usando la técnica de doble triaxial) y Sun et al. (2004) (en equipo triaxial con succión controlada), en estudios sobre colapsos inducidos por mojado bajo estado de tensiones anisótropo. En estos trabajos se muestra que la magnitud de reducción de volumen (colapso) es casi independiente de la relación de tensiones principales impuesta, pero las componentes axial y radial si fueron afectadas. Las deformaciones de colapso, en una trayectoria de mojado, dependen principalmente de la tensión media neta aplicada y el índice de poros al inicio de mojado. Con base a lo anterior, se sugiere que la pequeña diferencia en δe observada al final de la trayectoria de reducción cuasi-continua de succión, en los ensayos presentados es esta sección, es debido al menor índice de poros inicial presente en IW ($e_0=0.689$) que en AW ($e_0=0.706$), generando así

una menor deformación volumétrica de colapso en IW (los dos ensayos se realizaron sobre $p-u_a$ de 200 kPa). Y la diferencia en la relación de tensión impuestas (isótropa en IW y anisótropa con $\eta=0.75$ en AW) no afecta el cambio de volumen de la muestra durante su mojado.

Los resultados observados en la Figura 6.61 y la Figura 6.62 presentan distintas fases con respecto a la evolución $s-e$, $s-e_w$ y $\delta e-\delta e_w$. Una primera fase donde la reducción de la succión genera pequeños incrementos de agua acompañados con pequeñas reducciones en el índice de poros, siguiendo aproximadamente una relación lineal en los planos $s-e$, $s-e_w$ y $\delta e-\delta e_w$. Se proponen las relaciones anteriores considerando que, en esta fase inicial de la trayectoria, la succión aplicada en los bordes representa correctamente la succión matricial dentro de la muestra, como se sugirió en párrafos anteriores. Los colapsos siguen una relación lineal con la succión de $\delta e/\delta s=3.5 \times 10^{-5} \text{ kPa}^{-1}$ en IW y $\delta e/\delta s=7.2 \times 10^{-5} \text{ kPa}^{-1}$ en AW. La relación lineal en el espacio $\delta e-\delta e_w$ es de $\delta e/\delta e_w=0.093$ hasta $\delta e_w=0.026$ en IW y de $\delta e/\delta e_w=0.224$ hasta $\delta e_w=0.020$ en AW. Esta fase inicialmente coincide con una “scanning curve” seguida en la etapa inicial de reducción de succión de los ensayos IW y AW (sugerida, en párrafos anteriores, con base a comparaciones con curvas de retención análogas pero con distintos índices de poros). Sin embargo, no es posible delimitar el final del tramo de “scanning curve” en estos ensayos y por lo tanto no es posible afirmar que la finalización de la fase de pequeños cambios de e coincida con la de “scanning curve” (y el inicio de una trayectoria de mojado principal de la curva de retención).

En una segunda fase se presenta un cambio súbito en el índice de poros, al alcanzar una succión matricial aplicada de aproximadamente 30 kPa en IW y 40 kPa en AW, pero la entrada de agua sigue siendo pequeña. Los cambios en el índice de poros generan inicialmente una pendiente de $\delta e/\delta e_w=3.159$ en IW y 2.822 en AW, para después reducir la relación $\delta e/\delta e_w$, y posteriormente tener nuevamente un cambio súbito de pendiente. Los resultados sugieren que los grandes cambios de índice de poros, que presenta al inicio de esta fase, tienden a estabilizarse en un valor determinado ($e \approx 0.64$ con $e_w \approx 0.37$ en IW, y $e \approx 0.65$ con $e_w \approx 0.39$ en AW), a pesar de que sigue la entrada de agua, para posteriormente volver a presentar grandes deformaciones de colapso. Aunque en el ensayo AW el inicio de este segundo cambio brusco de pendiente parece coincidir con el final de aplicación de la reducción de succión en 10 kPa, manteniéndose después constante la succión aplicada en los bordes (véase la Figura 6.58), esto no ocurre en el ensayo IW (véase la

Figura 6.57); por lo tanto no es posible atribuir este comportamiento a posibles afectaciones ligadas con la aplicación de tensiones y succión matricial en los bordes.

Al final de la etapa de reducción continua de succión, se presenta una fase de estabilización del índice de poros, tendiéndose a homogenizar la succión matricial y la humedad en las muestras. En el ensayo IW se presenta una pequeña cresta (con hinchamiento de la muestra) durante la fase de estabilización, que no fue posible de explicar. En la Figura 6.61 y Figura 6.62 se presenta el resultado de la aplicación de un escalón de succión matricial en $s=5$ kPa, usando traslación de ejes, después de estabilizarse los resultados en la reducción continua de succión, en el ensayo IW. La aplicación de este escalón genera entrada de agua de $\delta e_w=0.032$ pero el cambio en el índice de poros es despreciable.

Los resultados de la aplicación del escalón de succión con columna negativa de agua, en los ensayos IW y AW, están graficados en la Figura 6.61 (pero no en la Figura 6.62). En el ensayo IW se presenta salida casi despreciable de agua acompañado con pequeña contracción al aplicar $s=1$ kPa, quizás generada al cambiar de técnica (posibles cambios en la muestra al reducir la presión de agua y aire a cero, mientras se mantienen constantes las tensiones media neta y de corte). Los cambios de e y e_w al aplicar la succión en $s=0.4$ kPa, en el ensayo IW, se consideran despreciables. En el caso del ensayo AW, la aplicación de la succión en $s=0.4$ kPa genera una entrada de agua de $\delta e_w=0.035$ sin cambios en el índice de poros. Se observaron cambios despreciables en el índice de poros y la relación de agua al aplicar $s=5$ y 1 kPa con columna negativa de agua, por lo cual no se han graficado. Lo anterior sugiere que la técnica de aplicación de succión mediante columna negativa de agua en el equipo triaxial no resultó tan eficiente como se esperaba, después de los buenos resultados obtenidos al aplicarse en el edómetro.

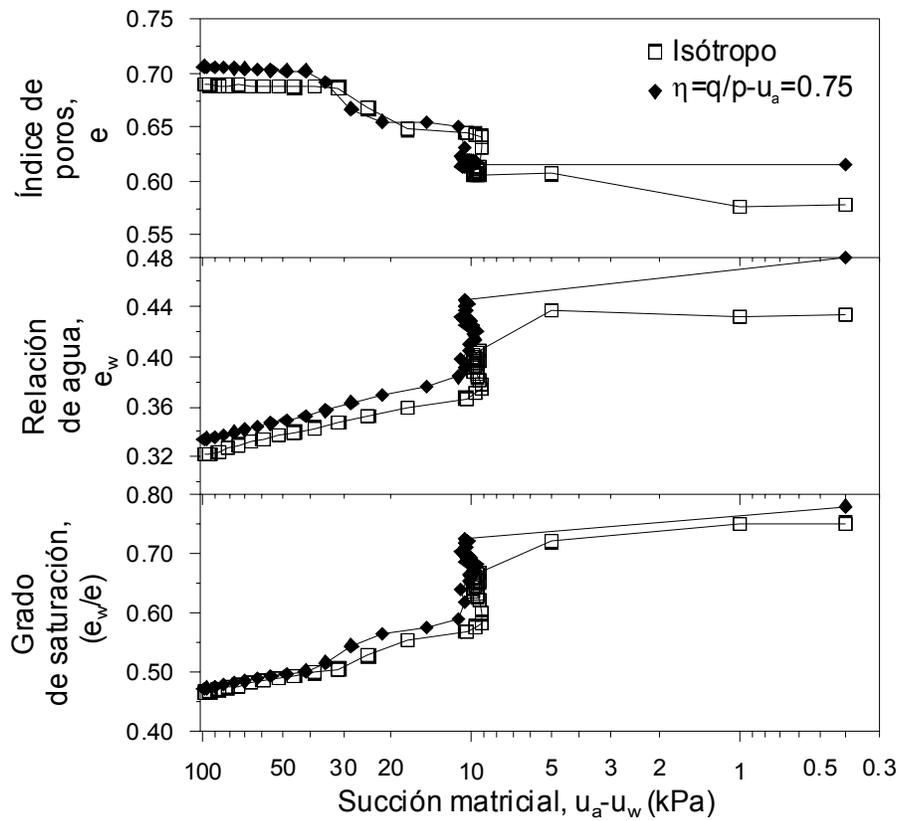


Figura 6.61 Gráfica de succión matricial (aplicada en los bordes) con índice de poros (e_w), relación de agua (e_w) y grado de saturación, en la etapa de reducción cuasi-continua de succión matricial de $s=100$ a 10 kPa, de los ensayos IW y AW.

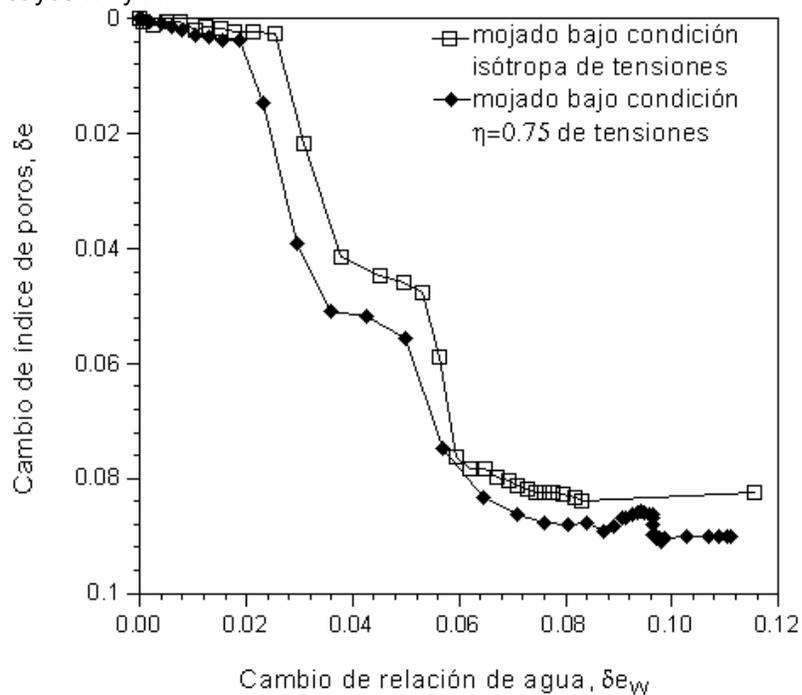


Figura 6.62 Gráfica relación de agua (e_w) con índice de poros, en la etapa de reducción cuasi-continua de succión matricial de los ensayos IW y AW.

Los resultados obtenidos son consistentes con los presentados por Pereira y Fredlund (2000) (con un sistema de permeámetro triaxial) y Sun et al. (2004), donde en respuesta a la reducción de succión, pequeñas deformaciones de colapso ocurren en las más altas succiones, mientras que grandes deformaciones de colapso ocurren en succiones relativamente bajas. La primera fase puede ser visualizada como una compresión sin gran deslizamiento de granos, al reducir el efecto de cementación que proporciona la succión matricial. Después, en este trabajo se ha observado una brusca deformación de colapso al alcanzar una determinada succión aplicada. Este comportamiento sugiere un reacomodo de agregados debido al rompimiento de enlaces conectores y agregados. Lo anterior implica un aumento en el número de contactos entre partículas grandes entre sí (partículas de arena y limo) y con los agregados. Sin embargo, después del primer colapso brusco de la estructura (y a partir del cual no es posible relacionar la succión aplicada en los bordes con la succión matricial dentro de la muestra) las deformaciones tienden a estabilizarse. La estabilización del índice de poros podría ser atribuida a que la reducción de potencial de colapso por una densificación importante de la muestra (experimentada de forma brusca) es mayor que el efecto de entrada de agua sobre su estructura. Entonces, se genera una estructura bastante estable al colapso por mojado hasta que vuelva alcanzar un estado crítico y ocurra otro colapso importante de la estructura. La estabilización de deformaciones y posterior segundo colapso brusco no fue observado por Pereira y Fredlund (2000) y Sun et al. (2004).

Las muestras no alcanzaron una total saturación, obteniéndose valores de S_r del 75% en IW y del 79% en AW. Resultados similares fueron registrados por Pereira y Fredlund (2000) y Sun et al. (2004) ($S_r \approx 88\%$), donde el 100% de saturación no fue alcanzado en una succión de cero. Pereira y Fredlund (2000) atribuyen el comportamiento al incremento de aire atrapado dentro de la microestructura del suelo debido a la reducción de tamaño de poro (por el colapso de la estructura metaestables) y la dificultad para que penetre el agua libre, bajo pequeños gradientes hidráulicos, en los espacios reducidos de poro llenos de aire.

En las Figuras 6.61 y 6.63 se observa que existe poca diferencia entre las deformaciones volumétricas en la etapa de reducción cuasi-continua de succión matricial de $s=100$ a 10 kPa, de los ensayos IW y AW. Sin embargo, en las Figuras 6.63 y 6.64 se observa que las componentes axial y radial dependen de la relación de tensiones impuesta durante el mojado. En forma similar a lo descrito en párrafos anteriores, las deformaciones (axial, radial volumétrica y de corte)

importantes se generan en succiones relativamente bajas, presentando una primera fase donde se dan deformaciones muy pequeñas.

En la Figura 6.64 y Figura 6.65 se observa claramente la diferencia en el patrón de comportamiento en deformaciones axial con radial, y deformación volumétrica con la de corte en los ensayos IW y AW. De forma semejante a lo observado en los ensayos de consolidación, en la etapa de mojado bajo condición de tensiones isótropa las deformaciones de corte son pequeñas, y tienen signo negativo, predominando la deformación radial de colapso sobre la axial; y en la trayectoria de mojado bajo una relación de $\eta=q/(p-u_a)=0.75$ ($K=(\sigma_r-u_a)/(\sigma_a-u_a)=0.5$) se genera una deformación de corte importante de signo positivo, generándose deformaciones radiales muy pequeñas y predominando la deformación axial de colapso. El ligero hinchamiento radial observado en la trayectoria bajo $\eta=0.75$ sugiere que esta relación de tensiones es muy cercana a la que debe tener para que el colapso se produzca en un estado K_0 . Los resultados son consistentes con los obtenidos por Lawton et al. (1991) y Sun et al. (2004), donde se observa que, para una tensión media neta, es mayor la magnitud del colapso axial y del hinchamiento radial (o menor colapso) a medida que es mayor la relación de tensiones principales ($R=\sigma_a/\sigma_r$; que es la relación usada en esos trabajos) bajo el cual se reduce la succión.

En la Figura 6.66 se presentan los perfiles de los desplazamientos radiales de las muestras al inicio y final de la etapa de reducción cuasi-continua de succión matricial de $s=100$ a 10 kPa, de los ensayos IW y AW. Escala horizontal es aproximadamente 10 veces la escala vertical (en la figuras no es representado el diámetro real de la muestra). En esta figura puede observarse, también, los diferentes patrones de deformación radial que experimentan la muestras al mojarse. En el ensayo IW se generan mayores desplazamientos radiales en la parte central del espécimen que en los bordes, acompañado con una deformación axial de 1.02%, de manera semejante a lo observado en la etapa de consolidación isótropa bajo succión constante. Por otra parte, en el ensayo AW una deformación axial importante de colapso, del orden de 4.88%, genera pequeños desplazamientos de hinchamiento radial, casi uniforme, a lo largo de la muestra. Por lo tanto, puede observarse que el colapso ocurre en estado K_0 a todo largo de la muestra en el ensayo AW. Pueden observarse en el ensayo AW varias protuberancias, formando picos, que representan arrugas en las membranas generadas durante la etapa de mojado. La presencia de mayores

arrugas en el ensayo AW que en IW es debido a una mayor deformación axial generada y menor presión radial aplicada sobre la muestra en AW.

En la Figura 6.63 y en la Figura 6.65 se muestran con claridad las distintas tendencias en relaciones entre la deformación volumétrica (ε_v) y de corte (ε_s) seguidas en las trayectorias de mojado con diferentes relaciones η . En la Figura 6.63 se muestra la evolución de la relación del incremento de la deformación de corte con el incremento de la deformación de volumétrica ($\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$) con la succión matricial aplicada en los bordes. Los valores de ($\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$) en succiones matriciales intermedias y final de trayectoria hasta $s=10$ kPa son mostradas en la Tabla 6.17. Estos valores corresponden a valores promedio, de los datos filtrados en intervalos de aproximadamente 5 kPa.

Tabla 6.17 Relación $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ medida en puntos intermedios y final de la trayectoria para los ensayos de mojado bajo estado de tensiones isótropo y anisótropo.

Ensayo	$p-u_a$ (kPa)	Relación η en la trayectoria	En succión matricial presente antes del primer colapso brusco			Al final de la trayectoria		
			s (kPa)	ε_v (%)	$\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$	s (kPa)	ε_v (%)	$\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$
IW	200	Isótropo	45	0.119	-0.34	10	4.595	-0.10
AW	100	0.75	49	0.206	-0.09	10	4.928	0.65

Tabla 6.18 Relación teórica $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ (con base a la ecuación 6.10) sobre el final de la trayectoria de consolidación y el final de la etapa de mojado I (hasta $s=10$ kPa) para los ensayos IW y AW.

Relación η en la trayectoria	En la tensión media neta de fluencia	Final de consolidación		Final de etapa de mojado I	
	$p-u_a$	s (kPa)	$\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$	s (kPa)	$\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$
0 (Isótropo)	200	100	-0.329	10	-0.325
0.75	200	100	0.734	10	0.855

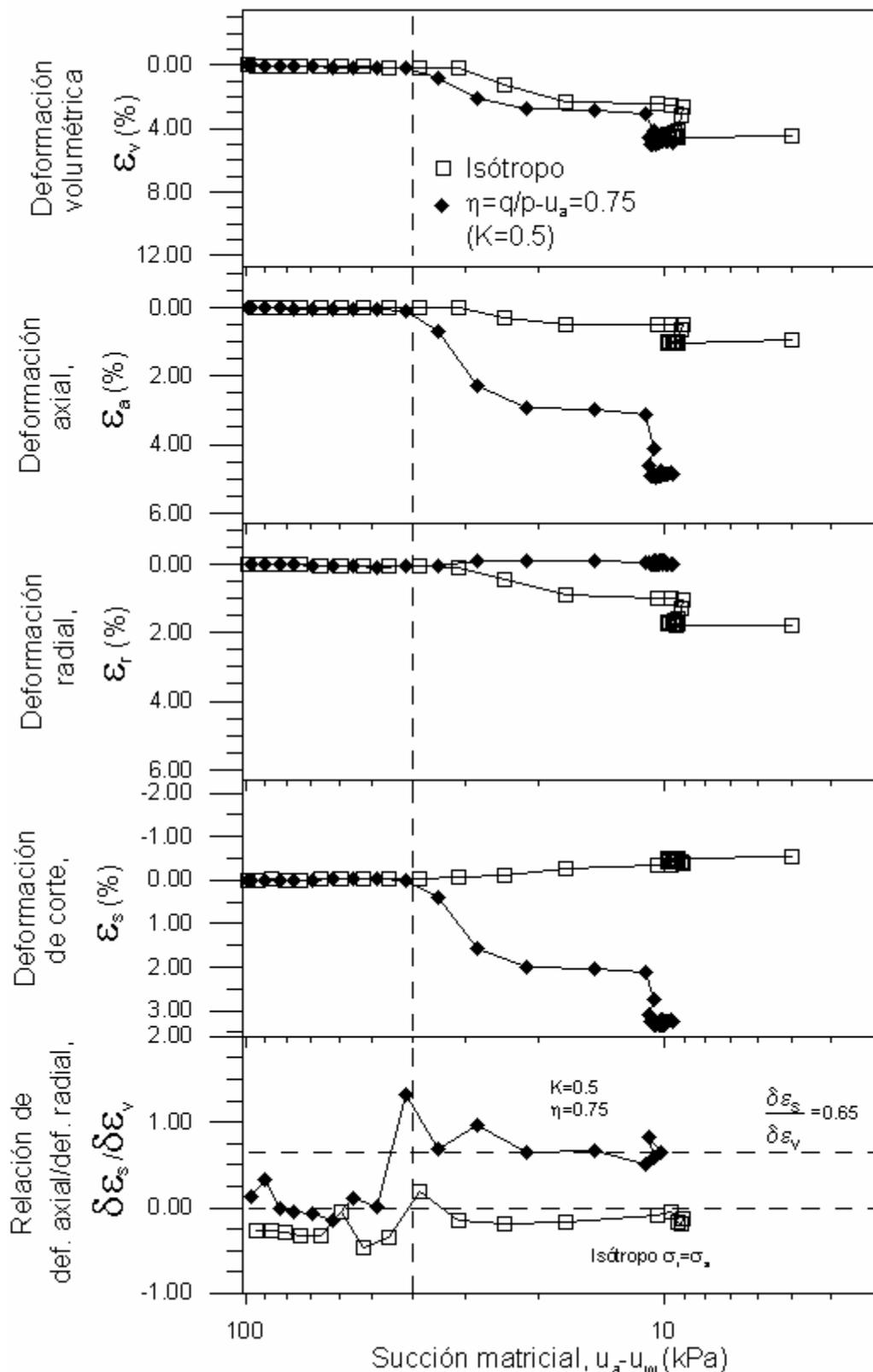


Figura 6.63 Gráfica de succión matricial (aplicada en los bordes) con deformaciones volumétrica, axial, radial y de corte; y con la relación entre deformación axial y radial, en la etapa de reducción cuasi-continua de succión matricial de $s=100$ a 10 kPa, de los ensayos IW y AW.

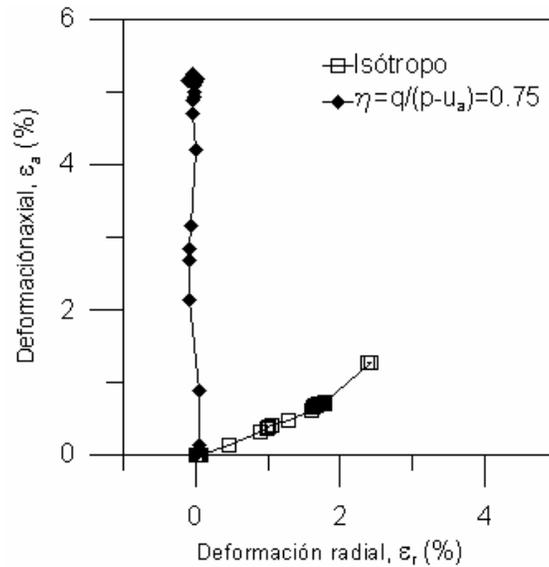


Figura 6.64 Relación de la deformación axial con la deformación radial durante la etapa de reducción cuasi-continua de succión matricial de $s=100$ a 10 kPa, de los ensayos IW y AW.

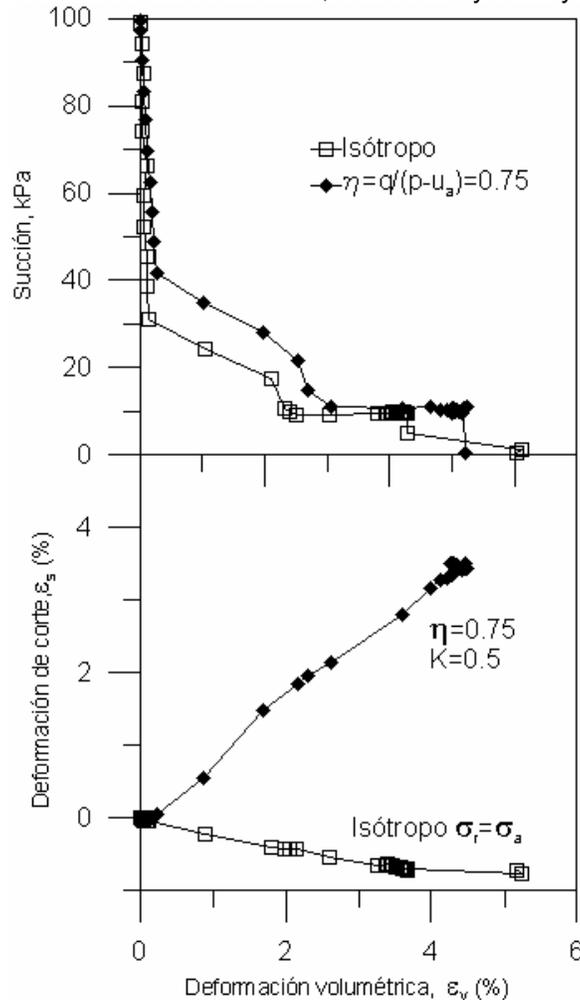


Figura 6.65 Relación de la succión aplicada y deformación de corte con la deformación de volumétrica, durante en la etapa de reducción cuasi-continua de succión matricial de $s=100$ a 10 kPa, de los ensayos IW y AW.

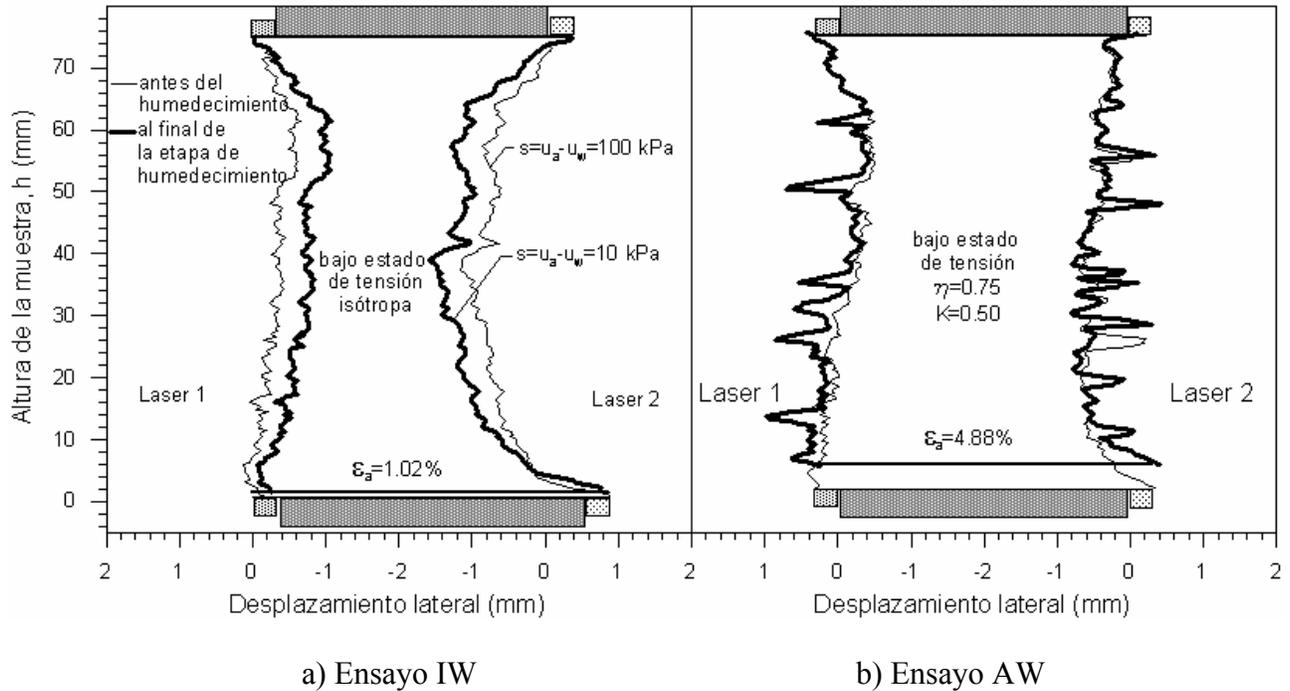


Figura 6.66 Perfiles de los desplazamientos radiales de las muestras al inicio y final de la etapa de reducción cuasi-continua de succión matricial de $s=100$ a 10 kPa, de los ensayos IW y AW. Escala horizontal es aproximadamente 10 veces la escala vertical. En la figuras no es representado el diámetro real de la muestra.

Los valores de $(\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v)$ también difieren en las distintas fases observadas durante la reducción de la succión matricial, en ambos ensayos. En la fase de pequeñas reducciones en el índice de poros con pequeños incrementos de agua, los valores de $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ son menores que los observados después del primer colapso brusco de la estructura. Esta diferencia es bastante marcada en el ensayo AW, donde $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v = -0.09$ (en promedio) de $\varepsilon_v = 0$ a 0.119% , y de $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v = 0.65$ al final de la etapa en $s = 10$ kPa (con $\varepsilon_v = 0$ a 4.928%). En el ensayo IW pasa de $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v = -0.34$ a -0.10 . En toda la trayectoria, la relación $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ resultó menor cuando el mojado se realizó bajo tensión isotrópica que cuando se produjo bajo $\eta = 0.75$. En la fase de pequeñas reducciones en el índice de poros, la incertidumbre en los valores medidos de la relación $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ puede ser grande debido a que los errores producidos en la medida de las pequeñas deformaciones los magnifican de manera importante.

Cuando se alcanza el primer colapso brusco, en ambos ensayos, $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ se incrementa hasta alcanzar un valor determinado y se mantiene aproximadamente constante hasta el final de la etapa, en $s=10$ kPa (de $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v=-0.10$ en IW y 0.65 en AW). Como en el caso de la consolidación, se observa que los valores de $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ tienden a estabilizarse en un cierto valor que depende del valor de la relación de tensiones η aplicada en la trayectoria y los valores más altos se dan en las trayectorias con mayor valor de η .

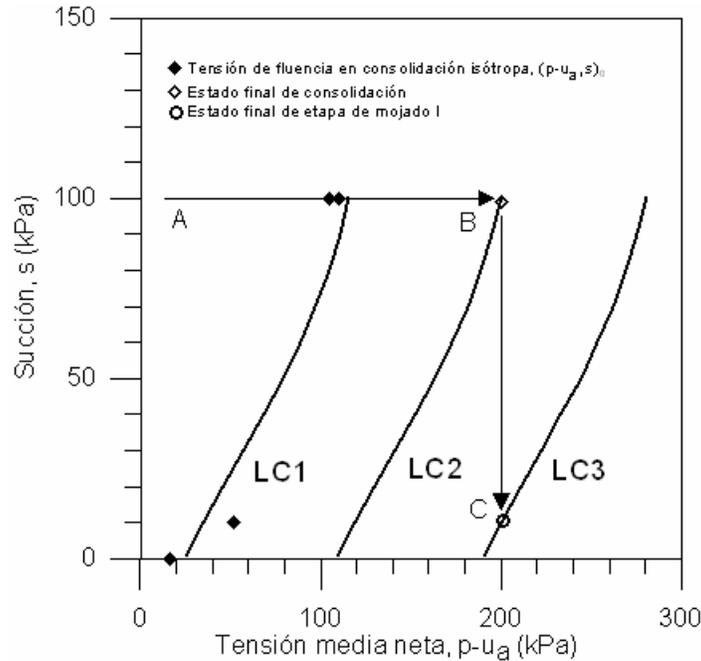
Los cambios sufridos de $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ después del primer colapso brusco pueden ser explicados mediante los conceptos de elastoplasticidad en suelos no saturados (Alonso et al., 1990) considerando también su anisotropía transversal (por ejemplo Wheeler et al., 2003). En ambos ensayos, la reducción de succión genera deformaciones irreversibles de colapso debido a que la trayectoria de tensiones mueve la curva de fluencia LC (propuesta por Alonso et al., 1990) desde un inicio, lo que produce sobre la fábrica de la muestra un efecto similar al movimiento de la curva de fluencia en el plano $(p-u_a)-q$ (para estado de tensiones triaxiales). Lo anterior puede ser descrito con base a la Figura 6.67, donde se presenta un esquema (no experimental) de la evolución de la curva de fluencia LC durante la consolidación y etapa de mojado I (hasta $s=10$ kPa). Durante la consolidación en succión matricial $s=100$ kPa la trayectoria de tensiones (véase tramo A-B, en la Figura 6.67) toca la curva LC1 de la figura (estimada con base a datos experimentales, $(p-u_a, s)$, determinados en consolidación isótropa en distintas s), propia del estado inicial de la muestra, y la desplaza al incrementar la tensión media neta hasta alcanzar la curva LC2 (estimada sin base experimental) al final de la etapa $p-u_a=200$ kPa. Lo anterior genera deformaciones irreversibles y una rigidización en el espécimen. Al realizar el mojado, se sigue la trayectoria B-C de la figura. Al iniciar el estado de tensiones se encuentra sobre la curva LC2, así que desde el principio al reducir la succión se genera el desplazamiento de la curva LC, que aumenta de tamaño hasta alcanzar LC3 al final de la etapa de mojado I (en $s=10$ kPa).

En el modelo de Alonso et al. (1990) las curvas de fluencia en el plano $(p-u_a)-q$ fueron descritas por medio de elipses que exhiben una rigidización isótropa controlada por deformaciones volumétricas plásticas. Durante el proceso de rigidización por colapso (movimiento de la curva LC), también cambian de tamaño las elipses. Entonces la dirección de incremento de deformación plástica, $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$, generada durante el mojado dependerá de la regla de flujo plástico

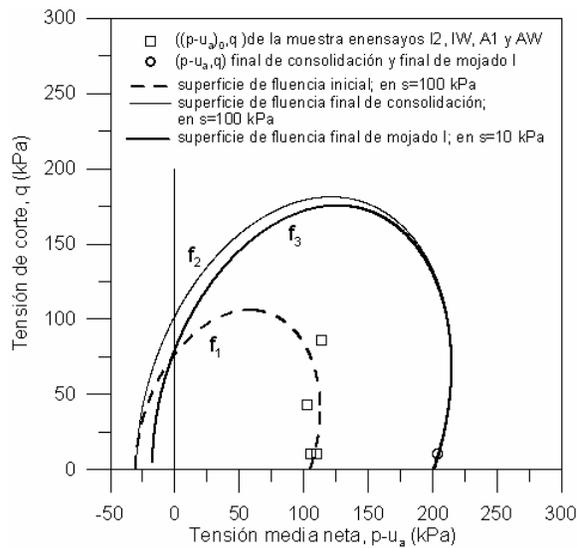
del suelo y de la relación de tensiones aplicada $q/(p-u_a)$. En la sección anterior se asumió que la muestra presenta una curva de fluencia en forma de elipse inclinada con respecto al eje $(p-u_a)$ cuando se consolida con una succión de 100 kPa, lo cual sugiere la presencia de anisotropía transversal. Esta anisotropía podría ser borrada parcial o totalmente con la aplicación de tensiones (Wheeler et al., 2003). En las Figuras 6.67 b) y 6.67 c) se presenta un esquema (no experimental) de la evolución de las curvas de fluencia en el espacio $(p-u_a)-q$ en el ensayo IW y en el ensayo AW. En ambos casos, al tocar la curva LC1 durante la consolidación, el estado de tensiones también se encuentra sobre la superficie de fluencia f_1 de la figura 6.67 b) y c), propia del estado inicial de la muestra, (graficada con base a lo descrito en el apartado 6.4.2.2, siendo la misma para ambas trayectorias IW y AW). Al moverse la curva LC hasta LC2 en $p-u_a=200$ kPa, también se mueve f_1 hasta f_2 en la Figura 6.67 b) y c). Las superficies f_2 fueron graficadas considerando solo el desplazamiento de f_1 sin cambio de forma, es decir, con el mismo ángulo de inclinación de la elipse, aunque en el apartado 6.4.2.2 se sugiere una posible rotación de la superficie de fluencia durante la consolidación. Lo anterior, se realizó debido a la falta de más datos para sugerir el valor de tal rotación, y a para simplificar la descripción esquematizada. Por otra parte, las superficies f_2 pueden ser diferentes para los ensayos IW y AW (representados en las Figuras 6.67 b) y c) respectivamente) si se considera que el giro producido respecto a la superficie de fluencia inicial depende de la trayectoria de tensiones durante la consolidación.

Al realizarse la reducción de succión, y moverse la curva LC2 a LC3, también se pasa de la superficie f_2 a f_3 (Figura 6.67 b y c) en el espacio $(p-u_a)-q$. El cambio de tamaño de la elipse al pasar de B a C (de f_2 a f_3) es pequeño, pero hay que tener en cuenta que en un caso, (B), la succión es de 100 kPa y en el otro, (C), de sólo 10 kPa. El tamaño de la elipse para $s=0$, que está definido en el caso del BBM por $p_0^* = p_0(s=0)$, habrá cambiado y, por tanto, se producirán deformaciones plásticas ya que se pasa de un valor de p_0^* de aproximadamente 100 kPa antes de la reducción de succión, a un valor del orden de 200 kPa al final de la etapa I de reducción de succión. Sin embargo, si se considera la sección de la superficie de fluencia por planos en $s=100$ kPa (f_2) y en $s=10$ kPa (f_3) se observa una reducción del tamaño de la superficie f en el plano $(p-u_a)-q$ debido a la reducción de la cohesión aparente, p_s , (véase las Figuras 6.67 b y c). Por otra parte, el mojado podría generar una rotación de la curva de fluencia (si consideramos que la anisotropía transversal de la muestra no fue borrada totalmente al aplicar la consolidación). Tal

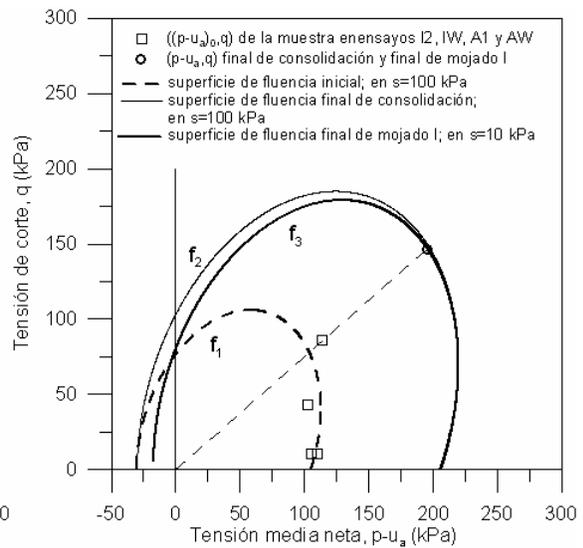
rotación debe generar cambios en la dirección de incremento de deformación plástica, $\delta\epsilon_s/\delta\epsilon_v$. En conclusión, aún cuando la relación de tensiones $q/(p-u_a)$ se mantenga constante durante el mojado, se esperan cambios en $\delta\epsilon_s/\delta\epsilon_v$, ya sea asociados a las deformaciones plásticas, a la rotación de la superficie de fluencia o a la reducción de la cohesión aparente, p_s .



a)



b)



c)

Figura 6.67 a) Esquema (no experimental) de la evolución, durante la consolidación y etapa de mojado I, de: a) la curva de fluencia LC; b) la curva de fluencia en el espacio $(p-u_a)$ - q en el ensayo IW; y c) la curva de fluencia en el espacio $(p-u_a)$ - q en el ensayo AW.

Para el caso de mojado bajo tensión isotrópica, después del primer colapso brusco, se observó una dirección de incremento de deformación plástica, en promedio, de $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v = -0.2$, presentando después un pequeño incremento hasta alcanzar en $s=10$ kPa un valor final cercano a cero, estabilizándose al final en aproximadamente en $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v = -0.10$ (véase la Figura 6.63), que es muy cercano a $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v = -0.116$ observado al final de la etapa de consolidación isotrópica bajo succión matricial de 100 kPa. Estos valores, próximos a cero, son consistentes con lo esperado para suelos con fábrica (estructura) isotrópica sometidos a consolidación isotrópica. Lo anterior sugiere que durante la consolidación isotrópica con succión de 100 kPa la anisotropía de la muestra fue casi totalmente borrada, y que al realizarse la etapa de mojado se incrementó el borrado, generándose un comportamiento cercanamente isotrópico en la muestra. Para este ensayo, el cambio de $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ que se predice, debido a los cambios de η_s por reducción de succión, son pequeños (véase la Tabla 6.18).

Para el caso de mojado bajo $\eta=0.75$, después del primer colapso brusco, la dirección de incremento de deformación plástica $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ fue en promedio de 0.65, hasta el final de la etapa en $s=10$ kPa. El valor es ligeramente mayor al observado al final de la etapa de consolidación con $\eta=0.75$ bajo succión matricial de 100 kPa ($\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v = 0.488$). Si no se consideran cambios en la inclinación de la elipse, el modelo anisótropo usado predice pequeños cambios en $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ al reducir la succión matricial manteniendo p y q constantes. Estos pequeños cambios serían debidos a los cambios de la relación η_s , de forma que $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ que pasaría de valer 0.734 en $s=100$ kPa a 0.855 en $s=10$ kPa, de forma consistente con lo obtenido experimentalmente. Por otra parte, con el incremento de $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v = 0.488$ (al final de la consolidación) a 0.65 (al finalizar la etapa de mojado) se tiende a alcanzar el $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ observado en la consolidación de la muestra saturada en $\eta = 0.86$ (aproximadamente 0.8 en $p'=200$ kPa). Aunque lo anterior sugiere un cambio de inclinación en la superficie de fluencia de la muestra, esto no puede asegurarse debido a que tales cambios también pueden ser atribuidos a los cambios en la relación η_s . En conclusión, las deformaciones volumétricas plásticas generadas durante el mojado de la muestra inducen la expansión de la superficie de fluencia LC, la reducción de la superficie de fluencia en el espacio $p-u_a-q$ por disminución de p_s , y pueden también generar su rotación de tal superficie, pero éste último fenómeno no se puede apreciar con toda claridad en los ensayos realizados.

En la Figura 6.68 se presenta un esquema, en el espacio $p-u_a-q$, de la dirección de los incrementos de deformación tras los procesos de carga (ensayos SI2, SM1 y SA en $s=0$ kPa, e I2, IW, A1 y AW en $s=100$ kPa), y de reducción de succión (ensayos IW y AW). Se observa que tras un proceso de aumento de carga o un proceso de reducción de succión, las direcciones de los incrementos de deformación son muy parecidas y en ambos casos parece que se pierde algo de anisotropía.

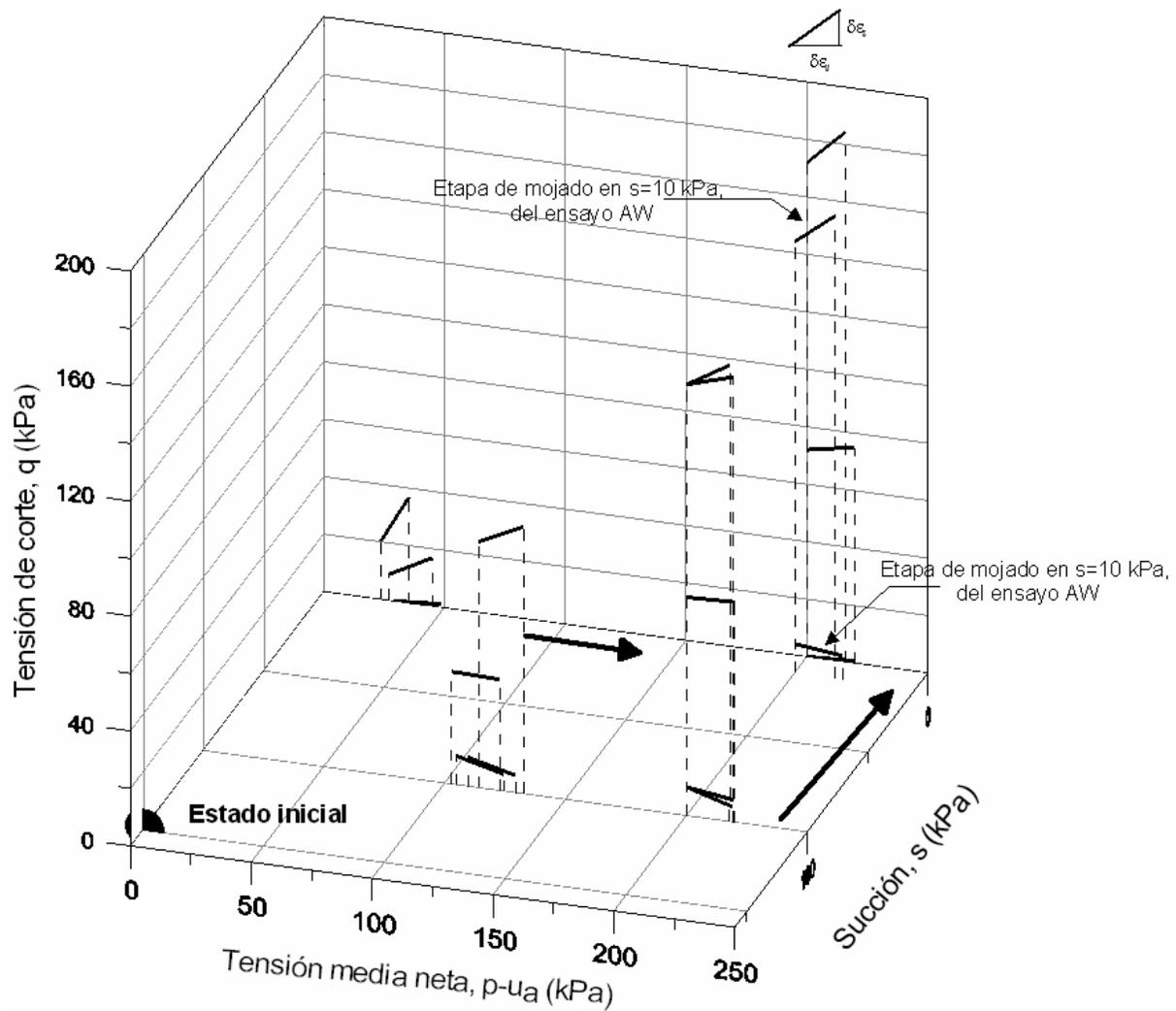


Figura 6.68 Esquema en el espacio $p-u_a-q$ de la dirección de los incrementos de deformación tras los procesos de carga (ensayos SI2, SM1 y SA en $s=0$ kPa e I2, IW, A1 y AW en $s=100$ kPa), y de reducción de succión (ensayos IW y AW).

En la Figura 6.69 se observa que la trayectoria de mojado en IW (tramo C-D) no alcanza la línea de compresión normal del ensayo SI1 (tramo B-C) realizado sobre una muestra saturada. Lo anterior no es consistente de lo observado por Maswoswe (1985) (donde las muestras colapsadas por mojado alcanza la curva de compresión e -log σ_v de la muestra saturada en ensayos edométricos) y los resultados presentados en el apartado 6.3.1.1 (donde se presenta la convergencia de las curvas de compresión isotropa después alcanzarse las presiones de preconsolidación en los ensayos SI2 y SM2). Aunque esto podría ser debido a que la muestra no alcanzó una total saturación, obteniéndose 75%.

En la figura 6.70 se observa, en el espacio e - e_w , que en los ensayos IW y AW, durante la consolidación en $s=100$ kPa se presentan pequeñas expulsiones de agua, que contrasta con una gran entrada de agua durante el mojado. El colapso súbito ocurre en succiones más altas a un mayor índice de poros (en AW), pero en ambos ocurre en un grado de saturación cercano al 50%. Los cambios más grandes en el grado de saturación, $\delta(e_w/e)$, se producen cuando se presentan grandes deformaciones de colapso durante el mojado.

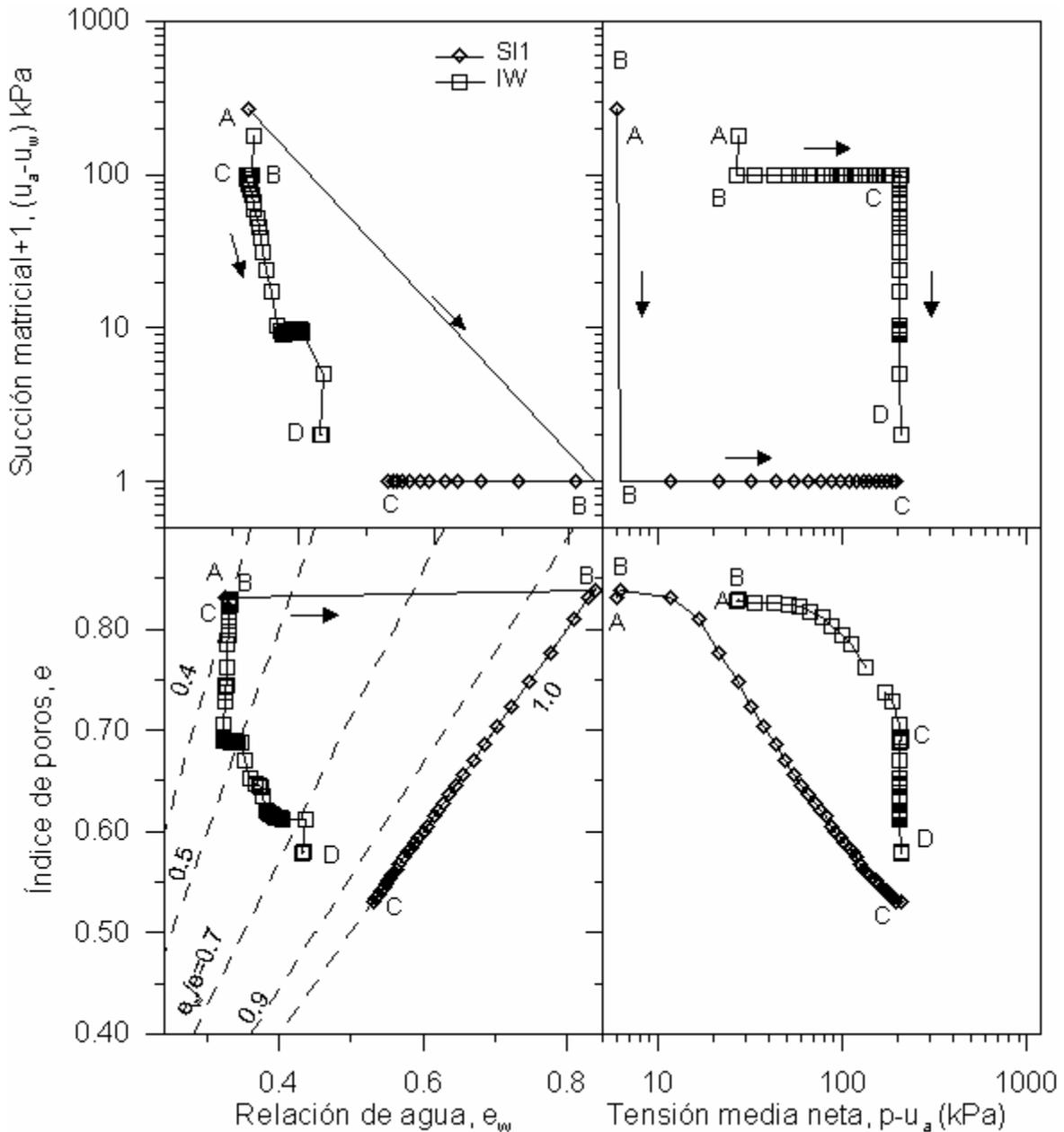


Figura 6.69 Resultados de las etapas de equilibrio, consolidación isotrópica con succión constante y mojado del ensayo IW; con los resultados de las etapas de saturación, consolidación isotrópica sobre una muestra saturada del ensayo SI1; representados en los planos $\log(p-u_a)$ - $\log(s)$, $\log(p-u_a)$ - e , $\log(s)$ - e_w y e - e_w .

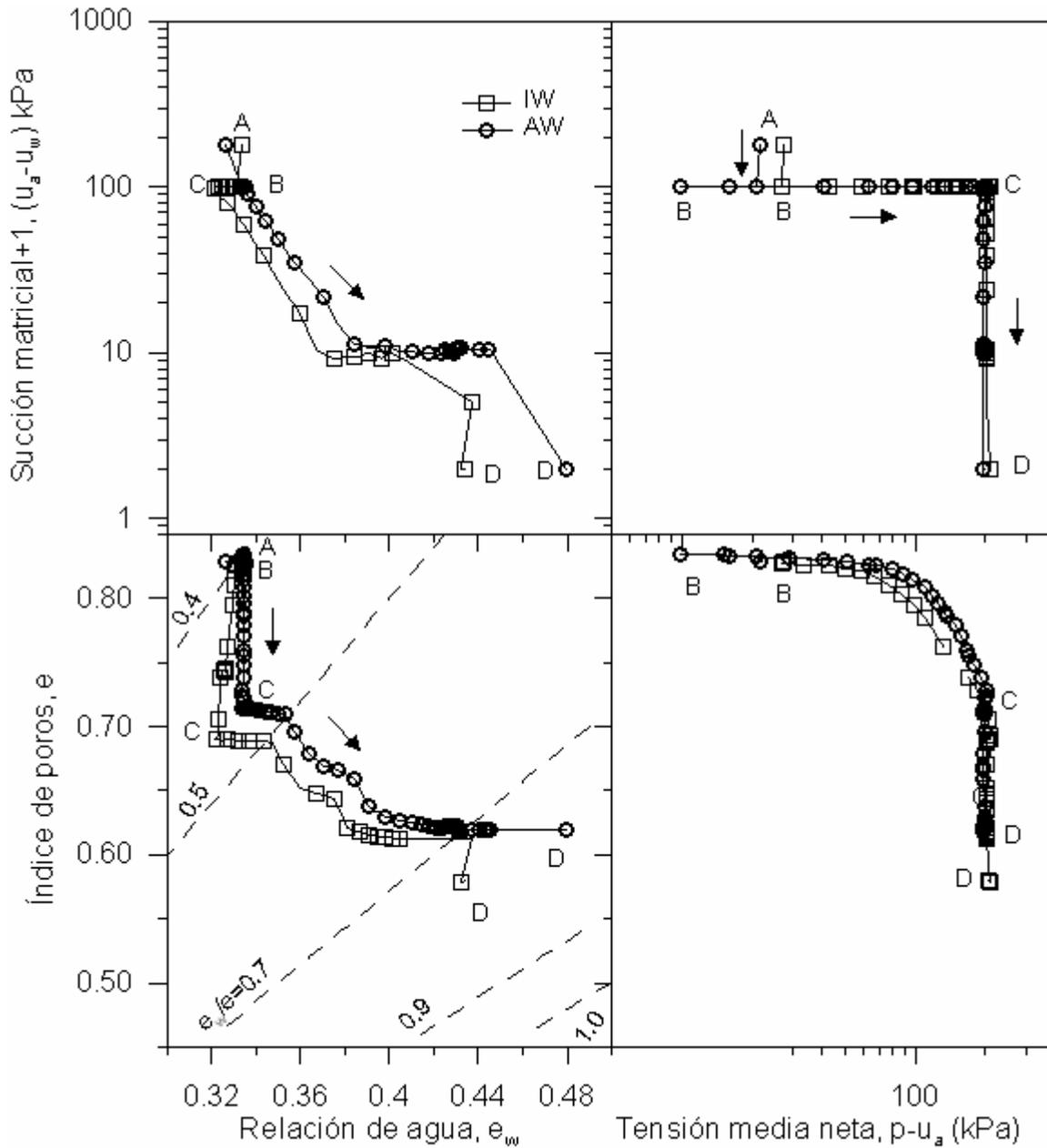


Figura 6.70 Resultados de las etapas de equilibrio, consolidación isotropa con succión constante y mojado de los ensayo IW y AW, representados en los planos $\log(p-u_a)$ - $\log(s)$, $\log(p-u_a)$ - e , $\log(s)$ - e_w y e - e_w .