



Departamento de Ingeniería del Terreno,
Cartográfica y Geofísica

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DEL
COMPORTAMIENTO HIDROMECÁNICO 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

7. RESULTADOS EXPERIMENTALES DE CORTE TRIAXIAL.

7.1 Introducción.

Este capítulo contiene los resultados y análisis de las etapas de compresión triaxial drenada en condiciones saturadas y con succión constante, 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 (capítulo 5). Los resultados de las primeras etapas fueron presentados y analizados en el capítulo 6. Para la determinación del estado de tensiones, las deformaciones y la variación de humedad se usaron las mismas variables descritas en los capítulos 5 y 6.

Un objetivo específico del programa de ensayos presentado en este capítulo fue evaluar el efecto de la succión matricial y de la trayectoria de tensiones previa sobre el comportamiento hidromecánico del suelo sometido a pruebas de corte triaxial, incluyendo el comportamiento de la relación entre las deformaciones volumétricas y las de corte. Otro objetivo específico fue evaluar los parámetros intrínsecos de resistencia de las muestras en condiciones saturadas y parcialmente saturadas.

7.2 Ensayos de compresión triaxial sobre muestras saturadas.

En los ensayos SI1, SI2 y SI3 se impuso la rotura drenada de la muestra siguiendo una trayectoria de compresión triaxial drenada convencional, sobre muestras saturadas, después de realizarse una etapa de consolidación isotrópica. Para ello se usó el equipo triaxial convencional para suelos saturados descrito en el capítulo 3. En estos ensayos la tensión axial es incrementada mientras que la tensión radial es mantenida constante, con lo cual se sigue una trayectoria de tensiones efectivas de $\Delta p' = \Delta q/3$ desde las condiciones de tensión inicial. La etapa rotura se realizó lo suficientemente lenta como para garantizar excesos de presión intersticial de agua (δu_w) por debajo de 10 kPa.

En la Figura 7.1 se presentan las trayectorias de tensiones seguidas en los ensayos SI1, SI2 y SI3, en el plano (p', q) , donde sus tensiones iniciales del corte triaxial son de $p'=200, 400$ y 600 kPa respectivamente. Los ensayos son realizados hasta llegar a la rotura de la muestra. Se consideró como criterio de rotura que la muestra falla cuando alcanza el “estado crítico” con la tensión media efectiva p' , la tensión de corte q y la deformación volumétrica ε_v , permaneciendo constantes o cambiando muy lentamente, mientras la deformación de corte sigue incrementándose. Este criterio de falla es conveniente ya que todas las muestras saturadas tuvieron fallas del tipo dúctil. La tensión de corte inicial fue de 3 kPa para estos ensayos. En todos los casos la tensión de fluencia fue alcanzada durante la consolidación, con lo cual las muestras están normalmente consolidadas al iniciarse la etapa de compresión triaxial.

En la Figura 7.2 se presentan los resultados de tensión de corte q , deformación de corte ε_s y deformación volumétrica ε_v con la deformación axial ε_a , de los ensayos SI1, SI2 y SI3. La evolución de las curvas tensión de corte con deformación axial crece en forma monótona, sin presentar evidencia de un pico. En todos los ensayos, al final se tiende alcanzar el estado crítico. El estado crítico se alcanzó en deformaciones axiales (ε_a) por arriba del 18%. A medida que la tensión media neta inicial del ensayo es mayor, se alcanza el estado crítico con una mayor tensión de corte. Todas las muestras mostraron fallas del tipo por abarrilamiento. Las curvas tensión de corte-deformación axial tienden a seguir una respuesta normalmente consolidada, donde no hay un apreciable punto de fluencia, generando deformaciones plásticas desde el inicio del corte.

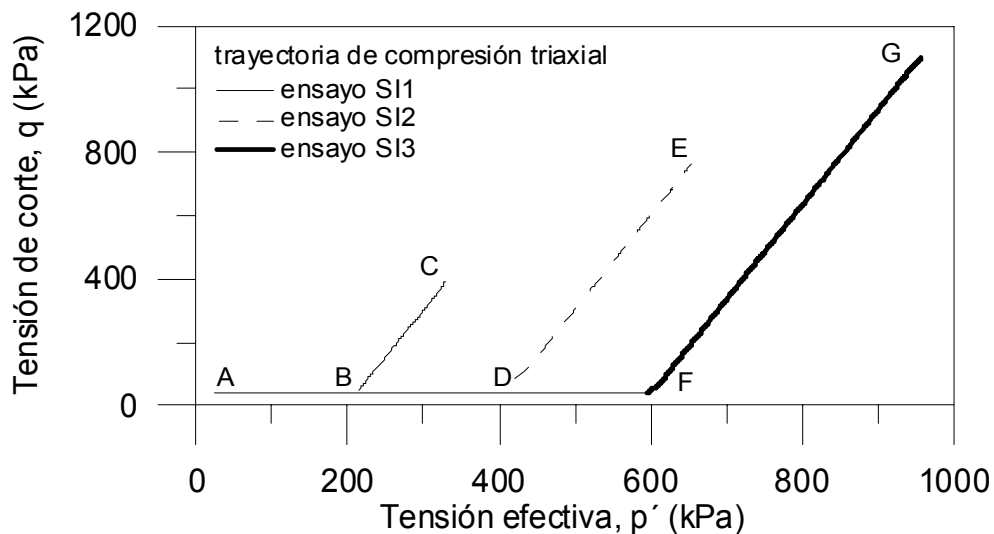


Figura 7.1 Etapa de compresión isotrópica y etapa de corte, en el espacio $(p'-q)$, para los ensayos SI1, SI2 y SI3.

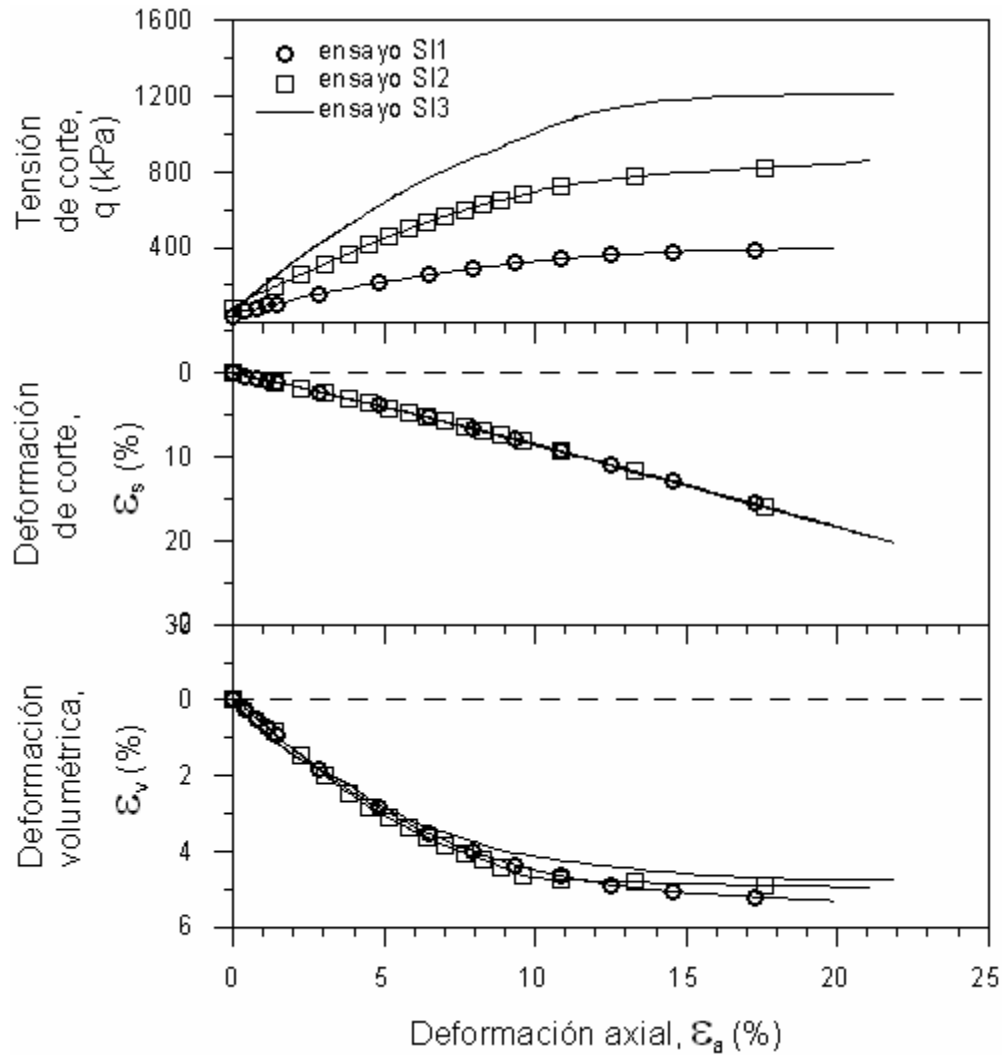


Figura 7.2 Gráfica de tensión de corte q , deformación de corte ϵ_s y deformación volumétrica ϵ_v con la deformación axial ϵ_a , de los resultados en los ensayos S1, S2 y S3.

En la Figura 7.3 se presenta la gráfica de tensión de corte q normalizada con la tensión media efectiva (p') impuesta al iniciar la compresión triaxial con la deformación axial ϵ_a , de los resultados en los ensayos S1, S2 y S3. Como se describió anteriormente, esta tensión media efectiva inicial corresponde a la tensión de fluencia (o presión de preconsolidación). Las curvas normalizadas presentan comportamientos muy similares, siguiendo aproximadamente el mismo camino en el tramo inicial, aunque apartándose muy ligeramente el ensayo S1 (con p' inicial de 200 kPa) sobre deformación axial de 10%. En Wheeler y Sivakumar (2000) se muestran curvas tensión-deformación de ensayos de compresión triaxial en succión cero y $p-u_a$ inicial de 150 kPa, que muestran un comportamiento cercanamente similar, con forma normalmente consolidada, a pesar de tener diferentes historias de tensión durante la compactación. Dichos autores sugieren

que lo anterior se genera debido a que, en todos estos ensayos, durante la etapa de consolidación isotrópica se alcanzó, y posteriormente se arrastró, la tensión de fluencia, causando una respuesta de la forma de suelo normalmente consolidado. Lo anterior es consistente con las curvas tensión-deformación de suelos saturados presentados en este trabajo.

En la figura 7.2 se observa que en todos los ensayos se presenta un comportamiento contractante, donde el volumen de las muestras decrece en forma monótona durante toda la etapa de corte, alcanzando el estado crítico al final. No se presenta algún comportamiento dilatante. A medida que la tensión media neta inicial del ensayo es mayor, se presenta una menor deformación volumétrica final, pero estas diferencias son muy pequeñas. Los resultados son consistentes con el comportamiento mecánico sugerido por el modelo Cam Clay (desarrollado dentro de un contexto elastoplástico de estado crítico) para suelos normalmente consolidados, sometidos a compresión triaxial. Los tres ensayos en cuestión están en condiciones de normalmente consolidados al iniciar la compresión triaxial, encontrándose sobre la superficie de fluencia, ya que, como se describió en el capítulo 6, se alcanzó y desplazó la tensión de fluencia durante la etapa de consolidación isotrópica. Por lo tanto, cuando la etapa de corte comienza, únicamente se generaran deformaciones plásticas de contracción y no se aprecia algún punto de fluencia en la curva tensión-deformación.

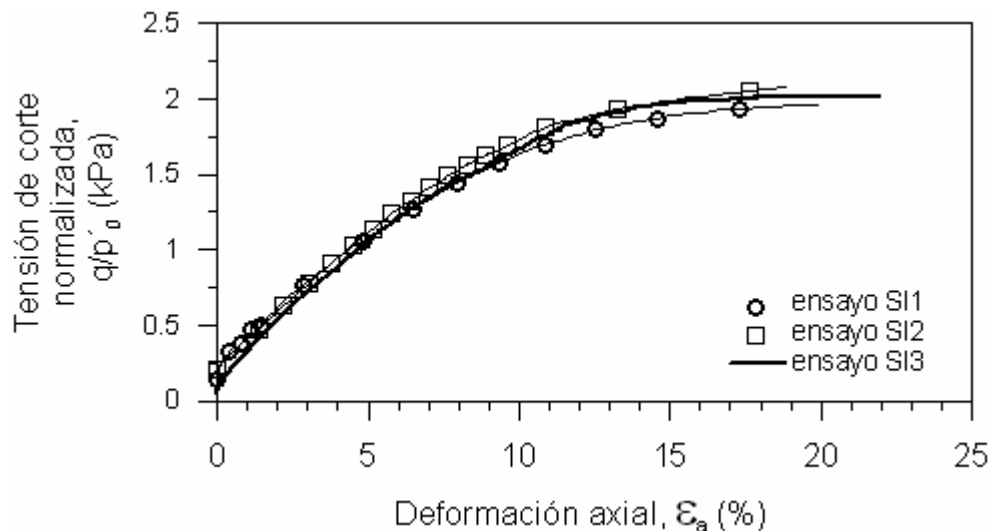


Figura 7.3 Gráfica de tensión de corte q normalizada con la tensión media efectiva impuesta al iniciar la compresión triaxial (tensión de fluencia o presión de preconsolidación) con la deformación axial ϵ_a , de los resultados en los ensayos SI1, SI2 y SI3.

En las Figuras 7.4a) y 7.4b) se presenta la evolución la dirección de incremento de deformación plástica $\delta\varepsilon_v/\delta\varepsilon_s$ y $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ respectivamente, con la relación $\eta=q/p'$, obtenidos de los ensayos SI1, SI2 y SI3. Donde $\delta\varepsilon_v$ y $\delta\varepsilon_s$, en esta tesis, son respectivamente los incrementos de deformación plástica volumétrica y de corte respectivamente. En las Figuras 7.4c) se presenta ampliada la evolución de $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ con $\eta=q/p'$. Estas gráficas van acompañadas con relaciones teóricas, ya sea de $\delta\varepsilon_v/\delta\varepsilon_s$ o $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ con $\eta=q/p'$, usando la ecuación 6.5. Esta ecuación corresponde a la regla de flujo asociada del modelo Cam Clay. Se presentan diversas gráficas de la evolución estas relaciones con el fin de observar más detalladamente las etapas inicial y final. Para determinar las deformaciones plásticas se consideran despreciables las deformaciones elásticas, que generalmente son mucho más pequeñas que la deformaciones plásticas (Cui et al., 1996), como ya se describió en el capítulo 6.

En la Figura 7.4a) se observa que en todos los ensayos, al cambiar el estado de tensiones a valores más grandes de $\eta=q/p'$, se genera una reducción monótona de $\delta\varepsilon_v/\delta\varepsilon_s$ con los valores finales tendiendo a cero cuando se alcanza aproximadamente $\eta=M=1.2$ (la obtención del valor de M es descrita en párrafos posteriores). En las Figuras 7.4b) y 7.4c) se muestra un incremento progresivo de $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ tendiendo hacia infinito cuando $\eta=1.2$. No se graficaron datos en valores muy bajos y altos de η debido a que se dan relaciones $\delta\varepsilon_v/\delta\varepsilon_s$ muy fluctuantes debido a los pequeños errores en la medición de deformaciones muy pequeñas (son magnificados al obtener las relaciones). En la etapa inicial se presentan deformaciones de corte pequeñas, mientras que en la etapa final se presentan grandes deformaciones de corte y las deformaciones volumétricas tienden a cero.

Los resultados obtenidos en todos los ensayos muestran una gran concordancia, lo cual es otra constatación del comportamiento típico de un suelo normalmente consolidado que se describió en los párrafos anteriores. También, una buena correlación entre los resultados experimentales y la regla de flujo asociada del modelo Cam Clay, aunque se aparta de manera significativa en los valores iniciales de $\eta=q/p'$, por debajo de $\eta=0.5$, lo que se muestra de manera más marcada con la relación $\delta\varepsilon_v/\delta\varepsilon_s$. Esto podría indicar un comportamiento experimental algo separado del teórico.

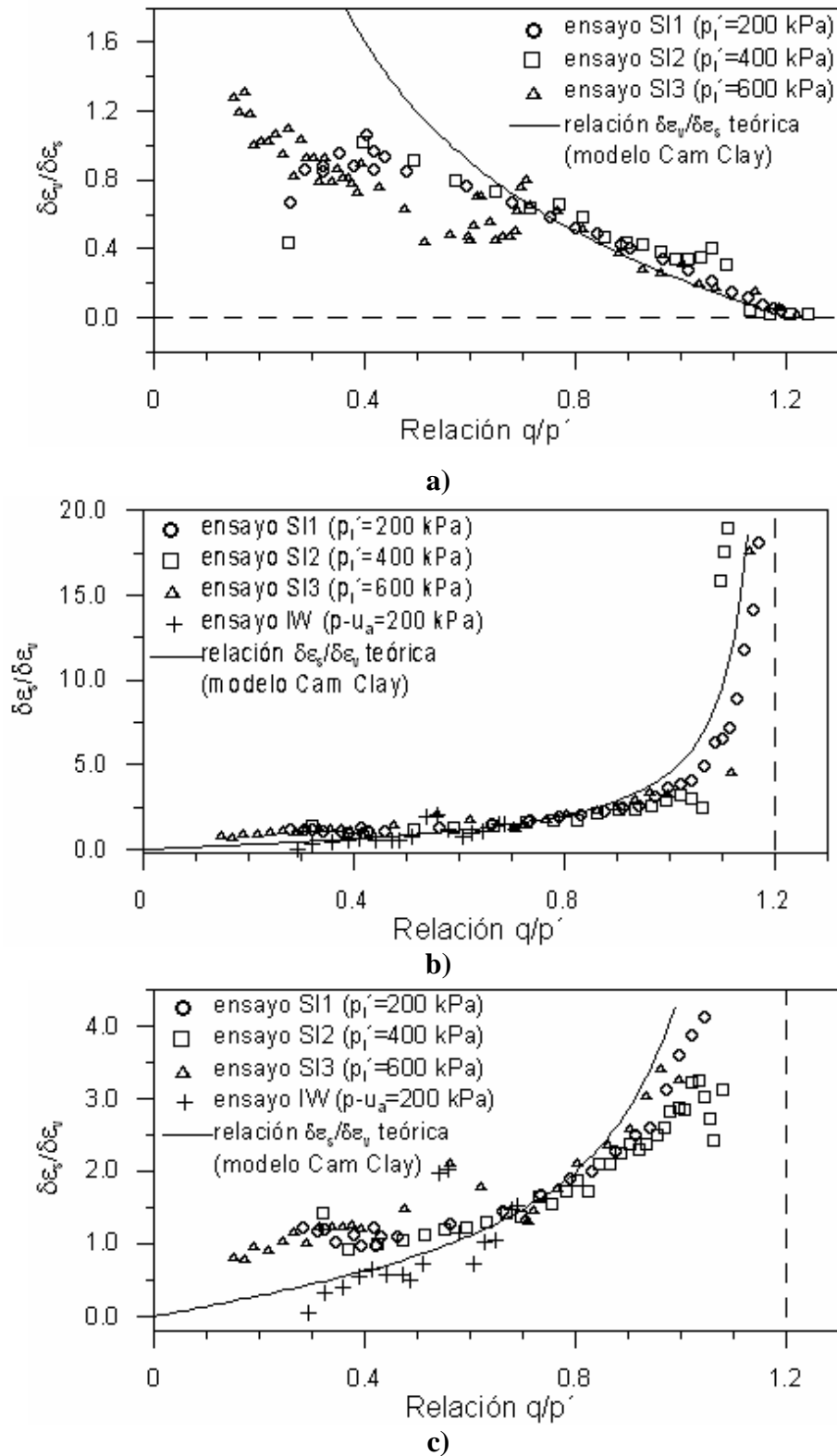


Figura 7.4 Gráficas de la evolución de: a) la dirección de incremento de deformación plástica $\delta\epsilon_v/\delta\epsilon_s$ con la relación $\eta=q/p'$; b) dirección $\delta\epsilon_s/\delta\epsilon_v$ con la relación $\eta=q/p'$; y c) dirección $\delta\epsilon_s/\delta\epsilon_v$ con la relación $\eta=q/p'$ ampliada; obtenidos de los ensayos SI1, SI2 y SI3.

En las Figura 7.4 b) y 7.4 c) se graficó, también el resultado de la etapa de corte triaxial del ensayo IW, realizado con el equipo triaxial con succión controlada (descrito en el capítulo 3), con la muestra del suelo en condiciones cercanas a succión matricial de cero aunque no totalmente saturada (con un grado de saturación de 75% al inicio del corte). En este ensayo se obtuvieron valores más cercanos a la curva teórica (usando medidas locales de deformación radial). Estos resultados no se muestran en la Figura 7.4a) debido a que muestran una mayor dispersión de valores (mayor variabilidad que en los ensayos SI1, SI2 y SI3). Desafortunadamente este ensayo no se terminó debido a una falla (no determinada) del equipo triaxial.

También se realizó una rotura drenada por medio de una trayectoria de compresión triaxial en el ensayo SM1. Antes de realizarse este corte triaxial se ejecutaron varias trayectorias de tensiones (véase la Figura 7.5 y Tabla 5.4). Primeramente, la muestra se consolidó ejecutando una rampa de incrementos de presiones bajo una condición de $\eta = q/p' = 0.36$ hasta alcanzar la tensión media de 200 kPa (punto B de la Figura 7.5), después se siguió una trayectoria de descarga anisótropa bajo la misma condición de $\eta = 0.36$ hasta alcanzar la tensión media de 100 kPa (punto C). Posteriormente, la muestra se consolidó bajo condición isotrópica hasta alcanzar la tensión media de 300 kPa (punto D) y seguidamente, la muestra se descargó bajo condición isotrópica hasta alcanzar de nuevo la tensión media de 100 kPa con $q=38$ kPa (punto C). Finalmente se lleva a rotura drenada por medio de una trayectoria de compresión triaxial (tramo C-E). Los resultados de las trayectorias anteriores a la compresión triaxial fueron mostrados en el capítulo 6.

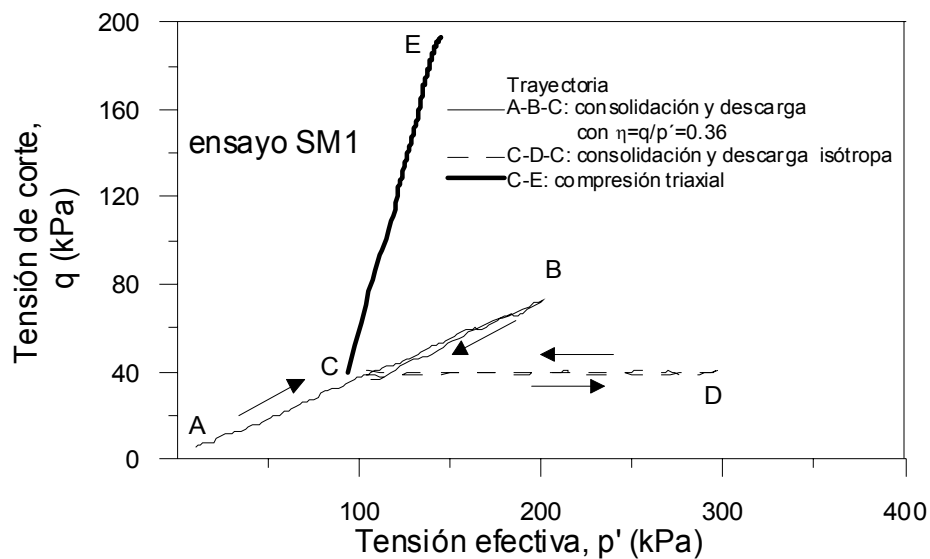


Figura 7.5 Etapas de compresión isotrópica y anisótropa, y etapa de corte, en el espacio ($p'-q$), para el ensayo SM1.

En la Figura 7.6 se presentan los resultados de tensión de corte q , deformación de corte ϵ_s y deformación volumétrica ϵ_v con la deformación axial ϵ_a , del ensayo SM1. La curva tensión de corte con deformación axial muestra una evolución quasi-lineal en una primera etapa y posteriormente se presenta un incremento en forma progresiva, sin presentar evidencia de un pico, para eventualmente alcanzar el estado crítico. En esta curva se aprecia claramente el punto de fluencia en el comportamiento de corte, en $q=115$ kPa, con un valor de $p'=126$ kPa, presentándose respuesta más rígida antes de tocar el punto de fluencia. En la Figura 7.7 se presenta la gráfica de tensión de corte q normalizada con la tensión media efectiva (p') impuesta al iniciar la compresión triaxial con la deformación axial ϵ_a , de los resultados en los ensayos SII y SM1. Al contrario que lo observado en la Figura 7.3, las curvas se apartan bastante el tramo inicial, donde no se observa la evolución quasi-lineal en el ensayo SII. Al final, ambas curvas convergen hacia un valor crítico.

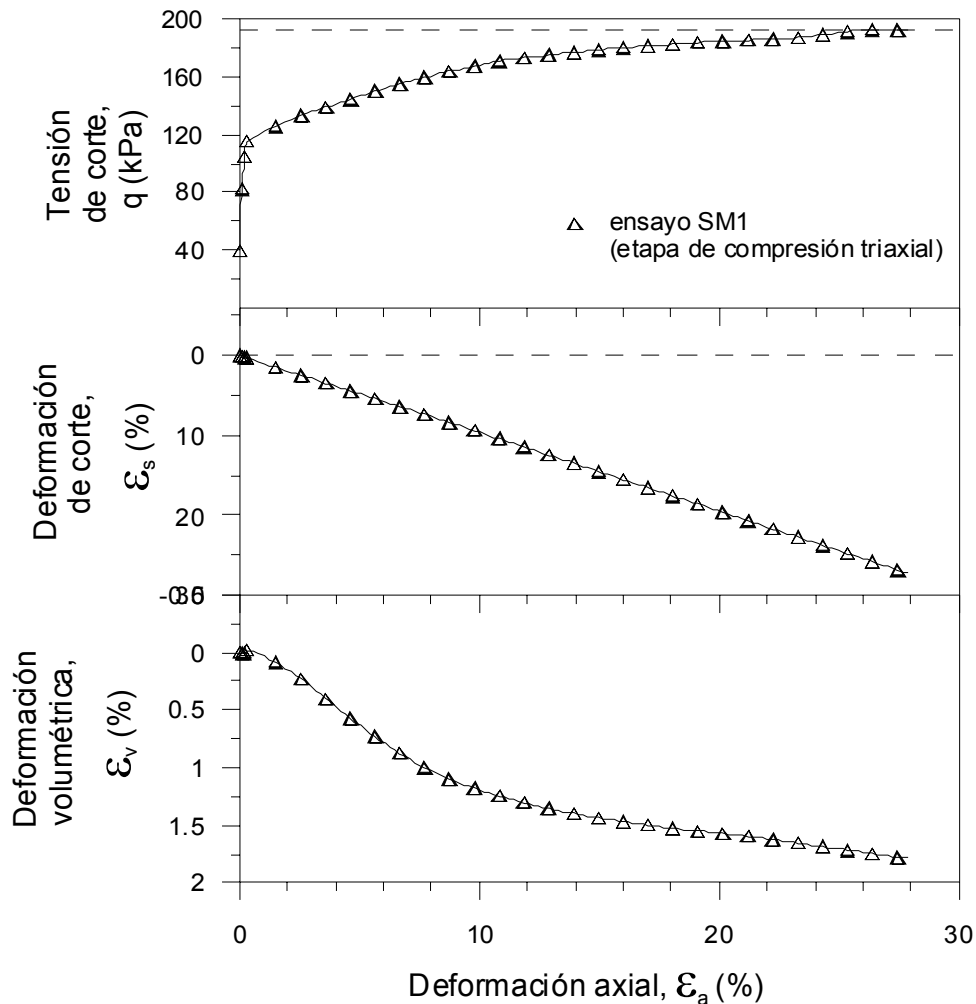


Figura 7.6 Gráfica de tensión de corte q , deformación de corte ϵ_s y deformación volumétrica ϵ_v con la deformación axial ϵ_a , de los resultados en el ensayo SM1.

En la figura 7.6 se presenta un comportamiento contractante, donde el volumen de las muestras decrece en forma monótona durante la etapa de corte. Sin embargo, no se aprecia que se llegue al estado crítico, con una reducción continua del volumen de la muestra a pesar de alcanzarse una deformación axial de 28%. Se consideró el estado de falla, para este caso, en esta deformación axial. La etapa inicial, correspondiente al tramo de comportamiento quasi-lineal en la curva tensión-deformación, no presenta cambios de volumen significativos. Tampoco se observa algún comportamiento dilatante de la muestra. La muestra falló por abarrilamiento, sin presentar un plano de deslizamiento.

El ensayo puede ser analizado dentro de un contexto elastoplástico de estado crítico desarrollado en el modelo Cam Clay. Se observa un comportamiento característico de suelos ligeramente sobreconsolidados (Word, 1990), que es consistente con la trayectoria de tensión realizada. En el ensayo un punto de fluencia es alcanzado y arrastrado por la trayectoria de compresión isotropa en $q=38$ kPa (tramo C-D en la Figura 7.5), para después descargar la tensión (regresando al punto C) e iniciar la compresión triaxial dentro de la zona elástica. Durante la compresión triaxial, la trayectoria está inicialmente dentro de la zona elástica, y una vez que la trayectoria alcanza el punto de fluencia el suelo se comprime plásticamente. El punto crítico en la curva tensión deformación lo alcanza en $q=195$ kPa, que corresponde a $p'=152$ kPa. La muestra falló por abarrilamiento.

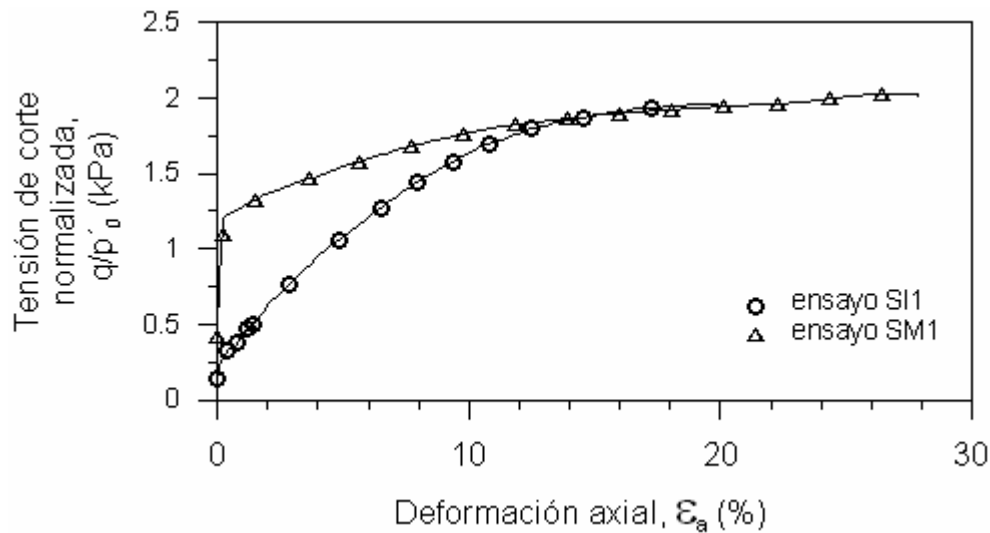


Figura 7.7 Gráfica de tensión de corte q normalizada con la tensión media efectiva impuesta al iniciar la compresión triaxial (tensión de fluencia o presión de preconsolidación) con la deformación axial ϵ_a , de los resultados en los ensayos SI1 y SM1.

En la Figura 7.8 se muestran los valores finales, al alcanzar el estado crítico, de la tensión de corte (q) graficados con la tensión media efectiva (p'), de los ensayos SI1, SI2, SI3 y SM1. Los datos graficados representan el estado crítico para suelos saturados. El patrón de comportamiento observado en la Figura 7.8 es consistente con el modelo Cam Clay, sugiriendo la existencia de una única línea de estado crítico. Esta línea parece ser independiente de la historia de tensiones ejecutada sobre la muestra, previa al ensayo de corte triaxial (muestras normalmente consolidadas en SI1, SI2 y SI3, y ligeramente sobreconsolidada en SM1). La pendiente de la línea recta (M) que mejor ajusta a los datos es de 1.2. Este valor de $M=1.2$ corresponde a aproximadamente a un ángulo de fricción de $\phi=30^\circ$.

En todos los ensayos saturados, al finalizar la etapa de compresión triaxial se observa la estabilización de las variables q y e , sugiriendo que las muestras alcanzan un estado crítico.

En la Figura 7.9 se presentan los valores de estado crítico de índice de poros, e , con la tensión media efectiva, p' , de los ensayos SI1, SI2, SI3 y SM1. Una línea de estado crítico (en el plano e - $\log p'$) parece ajustar los valores de estado crítico de los ensayos (símbolos blancos). Esto es consistente con el modelo Cam Clay.

Con los datos de inicio de trayectoria de corte en los ensayos SI1, SI2 y SI3 (símbolos oscuros en la Figura 7.9), correspondientes al final de las trayectorias de consolidación isotrópica, puede ser representada la línea de consolidación normal mediante una línea recta (con p' en escala logarítmica). Esto es consistente con el modelo Cam Clay. Sin embargo, las curvas e - $\log p'$ obtenidas en los ensayos de consolidación isotrópica no presentan la forma de una línea recta, con la pendiente $de/d(\log p')$ reduciéndose a medida que se incrementa p' . La línea de compresibilidad normal del ensayo SI1 se presenta en la Figura 7.9, para señalar lo anterior (las líneas de compresión normal de los ensayos SI2 y SI3 siguen caminos muy semejantes, casi sobrepuestos). Se evidencia paralelismo entre la línea de estado crítico con la línea de compresibilidad normal, representada con una línea recta (correspondientes al final de las trayectorias de consolidación isotrópica). Este paralelismo, también, es consistente con el comportamiento de suelos saturados reconstituidos y con lo observado por Sivakumar (1993) en un suelo compactado en condiciones de succión cero.

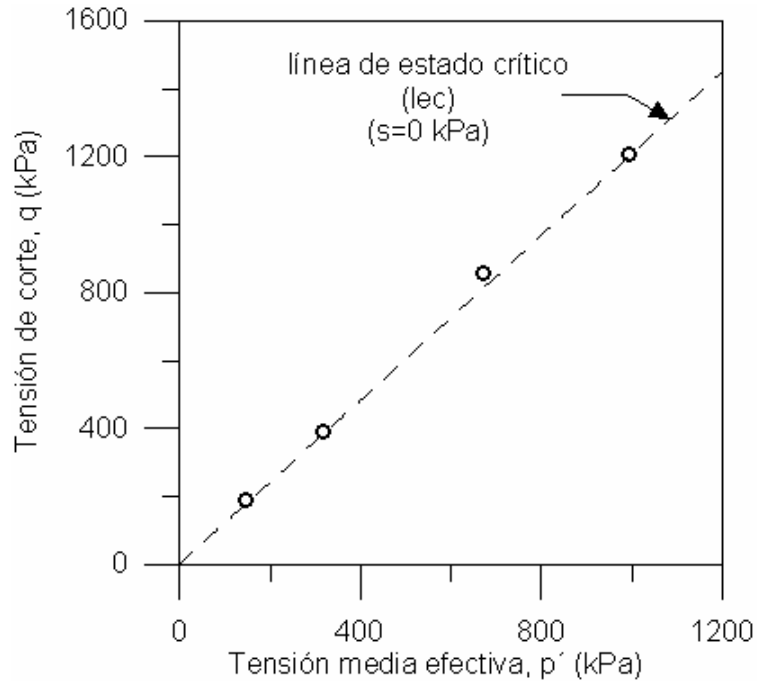


Figura 7.8 Valores de estado crítico para suelos saturados, en el plano tensión de corte (q)- tensión media efectiva (p'). Ensayos SI1, SI2, SI3 y SM1.

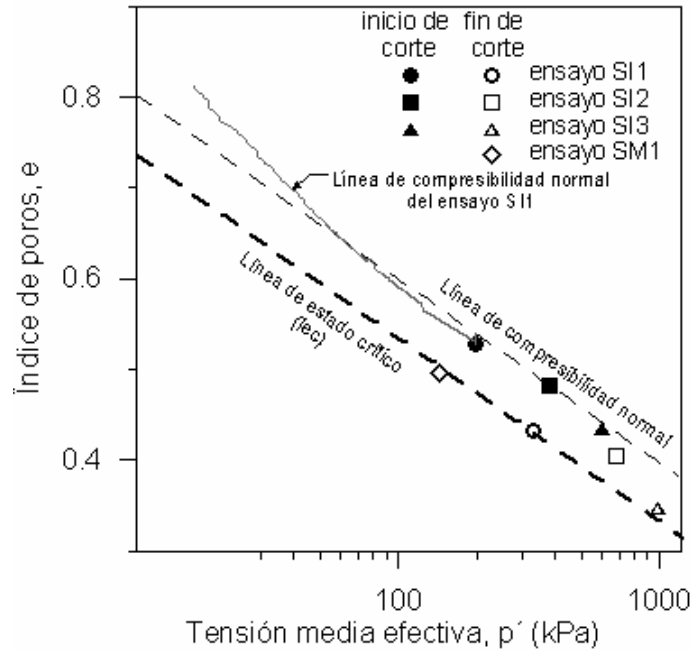


Figura 7.9 Valores de estado crítico de índice de poros, e , con la tensión media efectiva, p' , para muestras saturadas. Ensayos SI1, SI2, SI3 y SM1.

7.3 Ensayos de compresión triaxial con succión controlada.

Las trayectorias de compresión triaxial se realizaron con control de tensión mediante incrementos de carga cuasi-continuos a una velocidad constante predefinida, bajo condiciones de succión matricial ($s=u_a-u_w$) y tensión media neta constante ($p-u_a$). La velocidad seleccionada fue de 1 Pa/s (0.06 kPa/min).

Al realizarse todos los ensayos con control de tensión, se obtienen datos de muy buena calidad durante el estado inicial de la prueba pero en existen algunos inconvenientes durante el estado final, cerca de la falla (o estado crítico) del espécimen. En estados cercanos a la falla se producen grandes deformaciones con incrementos pequeños de carga, generando cambios importantes en el área de la sección central del espécimen y variaciones de la succión matricial (por incrementos de la presión de agua intersticial). La deformación de falla asumida fue de 20 %. En algunos ensayos, al llegar la tensión de corte a un determinado valor, la muestra presentó grandes deformaciones y un aumento considerable su área central. En ese caso, se ha asumido que ha ocurrido la falla de la muestra, y entonces se detiene el ensayo. En ambos casos, la aplicación de la tensión de corte se para, y se asume la terminación de la etapa cuando el contenido de agua y las deformaciones en el espécimen llegan a estabilizarse.

7.3.1 Medidas de cambios de volumen local y global de la muestra durante compresión triaxial.

Como ya se describió, anteriormente (en el capítulo 6 y con mayor detalle en el capítulo 3), en los ensayos con control de succión, las deformaciones volumétricas de los especímenes se obtienen de dos diferentes formas: a) Medidas locales y continuas: combinando las deformaciones locales axial y radial (con el desplazamiento lateral obtenido en el punto central del espécimen, en dos lados opuestos); y b) Medidas globales, realizadas en puntos, prefijados del estado de tensiones, a partir de los perfiles del espécimen (contando con medidas de desplazamiento lateral a lo largo del espécimen sobre dos lados opuestos).

En los ensayos realizados con control de succión la deformación volumétrica (ϵ_v) de la muestra se estimó, principalmente, usando las medidas obtenidas mediante instrumentación local. Basada sobre la suposición, usual, de presentarse una deformación del tipo cilindro recto, la deformación volumétrica fue calculada como: $\epsilon_v = \epsilon_a + 2\epsilon_r$.

Las medidas locales se consideran más representativas, al no ser afectadas las medidas radial y axial locales por la no uniformidad de las tensiones a lo largo de la altura de la muestra (causado por los efectos de fricción presentes en los bordes de la muestra), evitar los errores de apoyo en los bordes y los causados por la deformación del sistema de aplicación de carga del triaxial. Sin embargo, en grandes deformaciones (presentes en la etapa final en los ensayos de compresión triaxial) no es posible obtener valores confiables de deformación axial, usando medidas locales internas, debido a que en estas deformaciones se supera el rango de trabajo de los LVDTs internos. En estos casos, las medidas obtenidas con el LVDT externo (corregidas por deformación del equipo) se utilizan para obtener las deformaciones axiales. Por tanto, cuando las deformaciones axiales son grandes para la estimación de la deformación volumétrica local se utilizan la deformación axial externa y la deformación radial medida localmente (en el capítulo 3 se dan más detalles).

En ensayos de compresión triaxial se presenta un progresivo abombamiento de la muestra. En grandes deformaciones el grado de abombamiento de la muestra es muy grande (con una deformación radial pronunciada cerca del punto medio de su altura), por lo que la suposición de una deformación del tipo cilindro recto es errónea. Adicionalmente, cuando el grado de abombamiento es grande, también, se afectan significativamente las medidas de desplazamiento radial local por los errores generados por el desplazamiento vertical del punto monitoreado localmente (originado por la deformación axial de la muestra) y la existencia de arrugas en la membrana. Estos errores pueden minimizarse utilizando medidas locales para deformaciones axiales pequeñas y globales para deformaciones axiales grandes (en el capítulo 3 se dan más detalles). En algunos ensayos, al finalizar el ensayo, después de la falla, no fue posible obtener los perfiles de la muestra (y por lo tanto, el volumen global) debido a que se generaron muchas arrugas y se despegó la pintura.

Las Figuras 7.10 y 7.11, donde se presentan resultados de la etapa de compresión triaxial en $s=10$ kPa del ensayo I3 (ver características del ensayo en apartado 7.3.2.1), son útiles para comparar los valores obtenidos con medidas locales (usando un LVDTs internos o externo) y globales. Adicionalmente, en la Figura 7.12 se presentan resultados de la etapa de compresión triaxial en $s=100$ kPa del ensayo I2. En la Figura 7.10 se presenta la evolución de las deformaciones y variación de agua (en e_w) con el tiempo, y en la Figura 7.11 y Figura 7.12 se presenta la evolución de la tensión de corte, las deformaciones local (interna y externa) y global, y variación de agua con respecto a la deformación axial externa. En las figuras se muestran las deformaciones volumétricas y grados de saturación, calculadas con la deformación local lateral y, tanto la deformación axial interna como la deformación axial externa. En esta misma figura se muestran las deformaciones volumétricas estimadas globalmente, obtenidas de los perfiles de los desplazamientos laterales de la muestra. Las deformaciones, así como el valor del grado de saturación (e_w/e), obtenidas de forma global se representan en los gráficos por medio de una línea discontinua con símbolos, donde cada símbolo corresponde a los diferentes intervalos que fueron seleccionados para medir la deformación radial del perfil de la muestra.

En las Figuras 7.13a y 7.13b se presenta la evolución de los perfiles de los desplazamientos laterales y deformaciones radiales de la muestra durante la trayectoria de compresión triaxial, bajo una succión matricial de 10 kPa (mismo ensayo I3). En la Figura 7.13a se presentan a escala horizontal 1:1 con la vertical, la Figuras 7.13b con escala horizontal de aproximadamente 10 veces la vertical.

En la Figura 7.10 se observa que las deformaciones axial, volumétrica y de corte estimadas con las medidas locales internas y externas coinciden, en etapas tempranas del ensayo, pero divergen apreciablemente cuando se alcanza aproximadamente los 3000 minutos, que corresponde aproximadamente a la deformación axial de 7% (véase la figura 7.11). En el ensayo I2, divergen en aproximadamente una deformación axial de 8% (véase la figura 7.12). Después de este tiempo, aunque es posible todavía registrar medidas de los LVDTs internos, estas ya no son confiables debido a que se supera su rango de trabajo (y los errores son grandes, tal como se observaron en las calibraciones). Por otra parte, puede observarse que las medidas radiales obtenidas con ambos láser muestran ser consistentes.

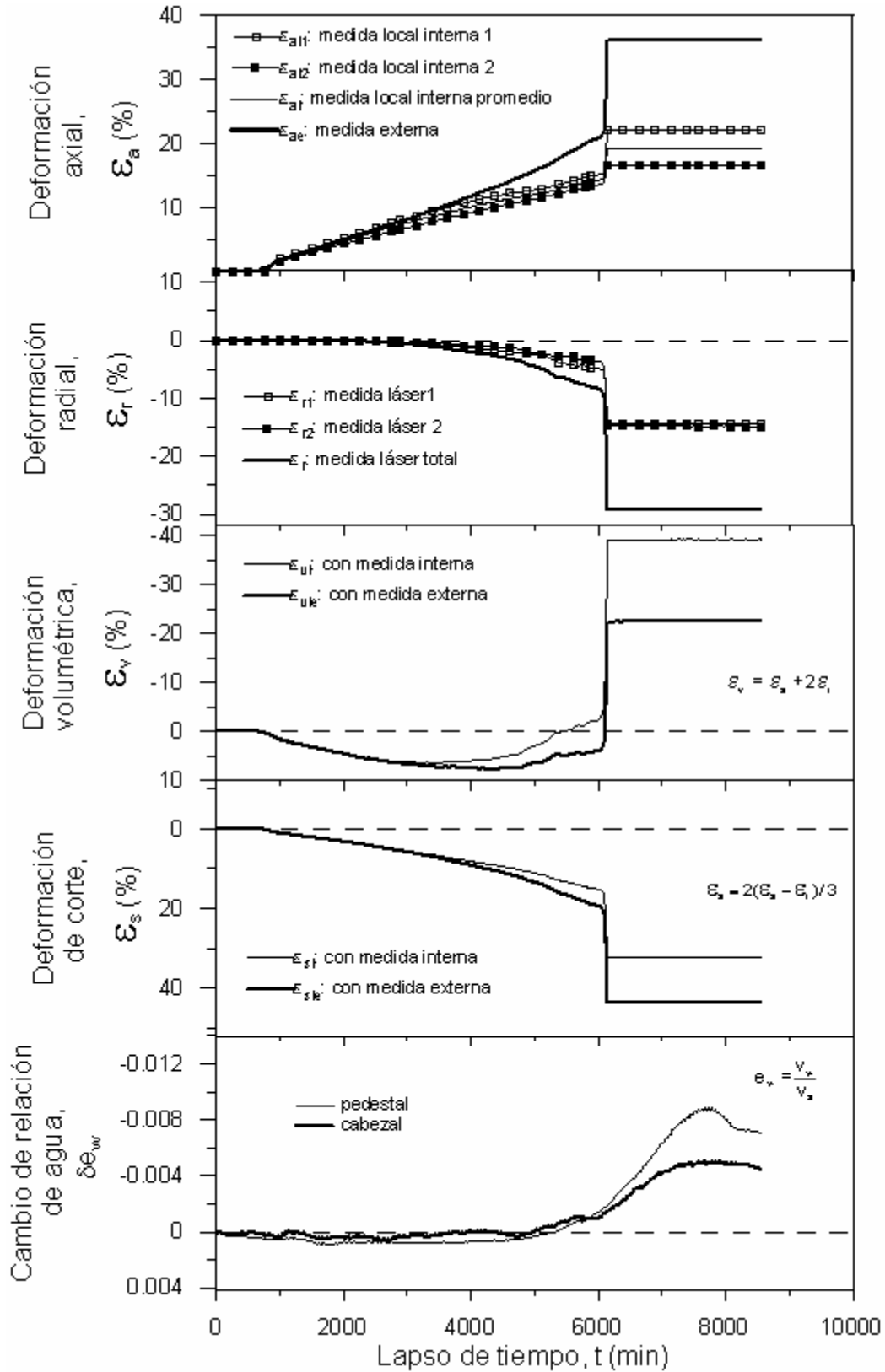


Figura 7.10 Evolución de las tensiones y variación de agua (en e_w) con el tiempo, en la etapa de compresión triaxial en $s=10$ kPa. Ensayo I3.

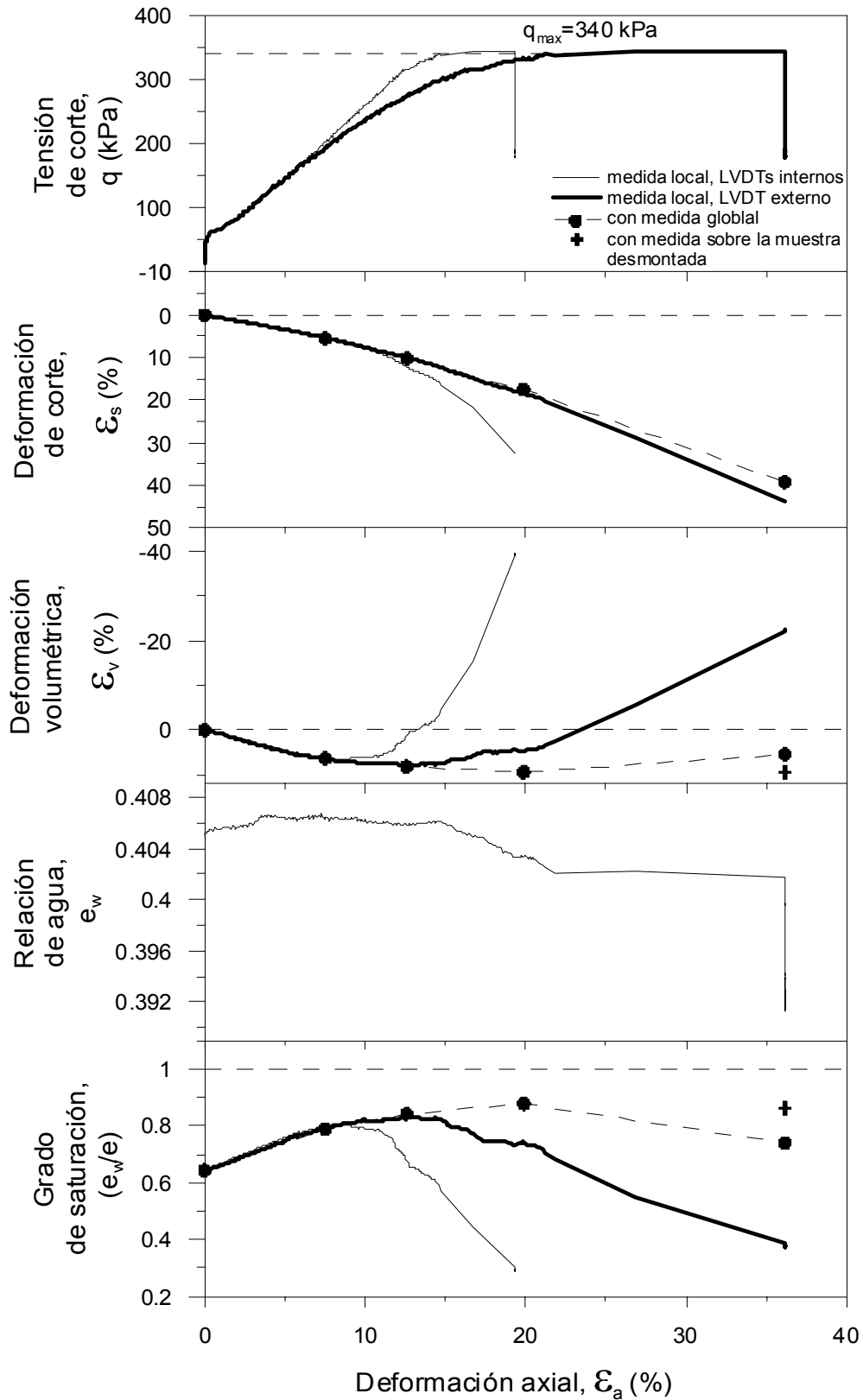


Figura 7.11 Evolución de la tensión de corte, las deformaciones local y global, y variación de agua con respecto a la deformación axial, durante las trayectorias de compresión triaxial, bajo una succión matricial de 10 kPa. Ensayo I3.

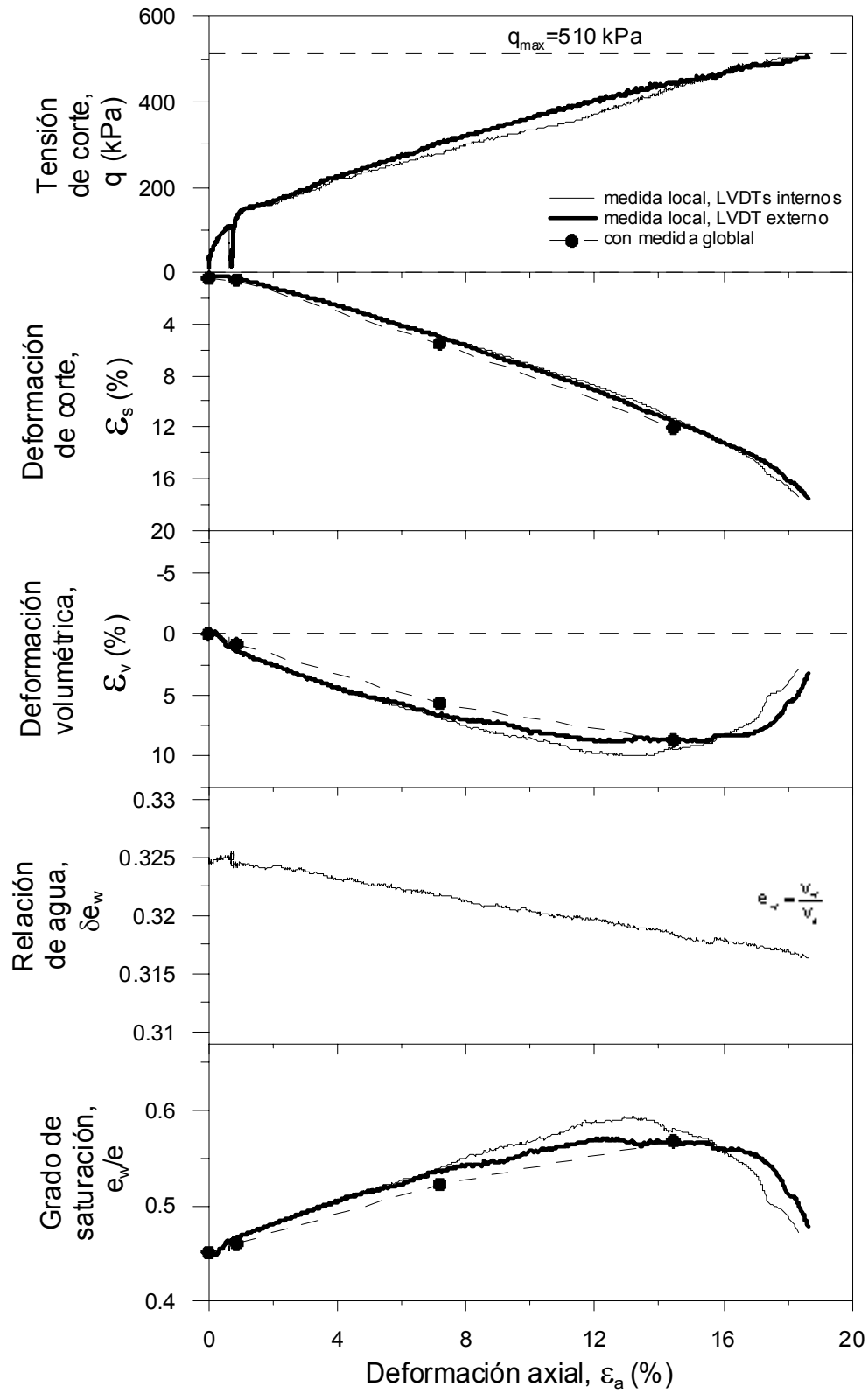
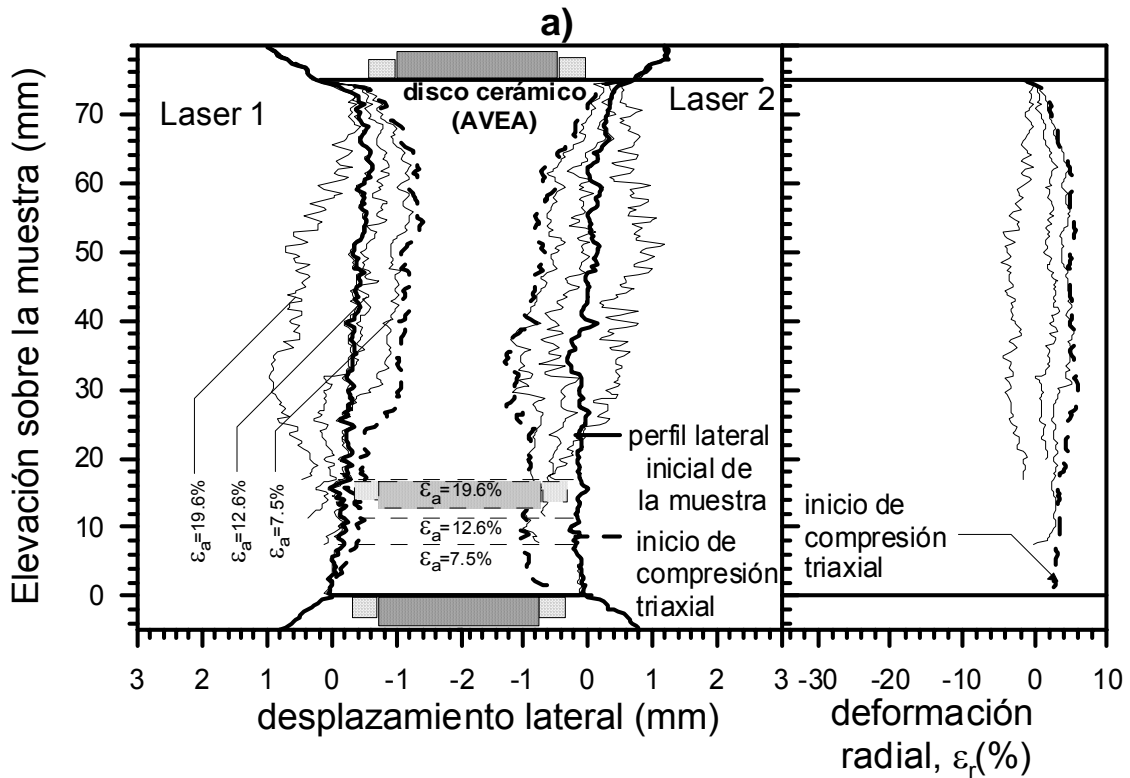
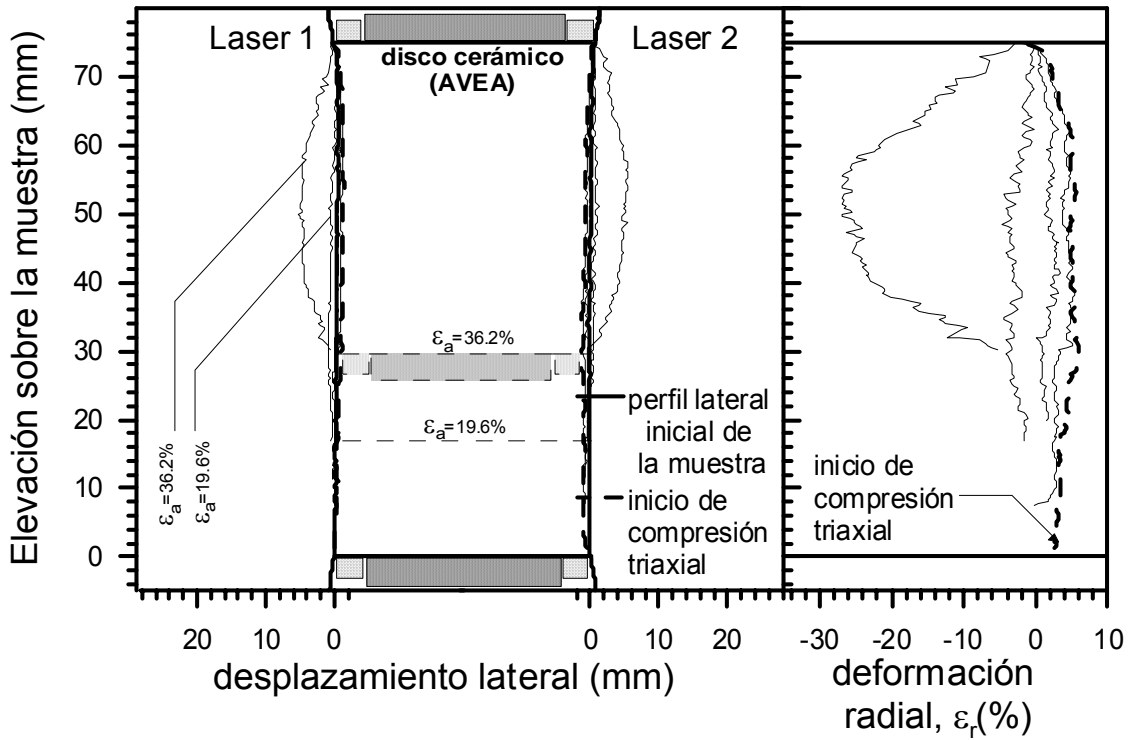


Figura 7.12 Evolución de la tensión de corte, las deformaciones local y global, y variación de agua con respecto a la deformación axial, durante las trayectorias de compresión triaxial, bajo una succión matricial de 100 kPa. Ensayo I2.



b)

Figura 7.13 Evolución de los perfiles de los desplazamientos laterales y deformaciones radiales de la muestra durante la trayectoria de compresión triaxial, bajo una succión matricial de 10 kPa. Ensayo I3. a) Con la escala horizontal 1:1 con la escala vertical; b) Con la escala horizontal aproximadamente 10 veces la escala vertical (no es representado el diámetro real de la muestra).

En las curvas $q-\varepsilon_a$, $\varepsilon_s-\varepsilon_a$, $\varepsilon_v-\varepsilon_a$ y $S_r-\varepsilon_a$ presentados en la Figura 7.11 y Figura 7.12 se observa que las medidas locales y globales muestran un buen acuerdo en un amplio rango de deformación axial pero presentan grandes discrepancias en grandes deformaciones, cuando la muestra sufre un significativo abombamiento. Este abombamiento es visible en los perfiles presentados en las Figuras 7.13a y 7.13b observándose mejor en esta última (aunque no se muestra el perfil en $\varepsilon_a=36.2\%$). En estas figuras se presenta el desarrollo progresivo de las deformaciones laterales del perfil de la muestra durante la etapa de corte del ensayo I3. En la Figura 7.13a, con escala horizontal 1:1 con la vertical, el abombamiento solo es notorio en $\varepsilon_a=36.2\%$.

El acuerdo entre las medidas locales y globales es mejor cuando se usa la medida externa de deformación axial para estimar la medida local. En el ensayo I3 (Figura 7.11), las curvas graficadas con deformación local (con medida externa) y con deformación global empiezan a divergir al alcanzar, aproximadamente, una deformación axial, de aproximadamente, el 12.6 %. En la Figura 7.13b se observa que el abombamiento se presenta después de $\varepsilon_a=12.6\%$, alcanzando una importante notoriedad en $\varepsilon_a=19.6\%$. En el ensayo I2 (Figura 7.12), las medidas locales y globales todavía convergen en deformaciones axiales grandes, debido a que el abombamiento se presentó en la etapa final del corte. En I2, no se tuvieron medidas de globales al finalizar el ensayo, debido a que se desprendió la pintura de la membrana. En la Figura 7.13b se observan las arrugas de la membrana que se presentan en grandes deformaciones, que dificultan la obtención de medidas de desplazamiento lateral y provocan la caída de la pintura. En Barrera (2002) se observaron que las diferencias entre la deformación global y local iniciaron entre de $\varepsilon_a=2\%$ y 9% .

En etapas finales del ensayo I3 (Figura 7.11), con las medidas locales, la muestra presenta un comportamiento dilatante a partir de una $\varepsilon_a=7\%$ usando medidas internas y en 15% con medidas externas (con medidas internas se aprecia una mayor dilatancia). Mientras que con medidas globales, se presenta un comportamiento contractante hasta una deformación axial de 19.6% . Se sugiere que la dilatancia observada al final del ensayo con el sistema de medida local es errónea, dado que la muestra, por sus características mecánicas, no puede presentar un comportamiento tan dilatante. En Cui y Delage (1996) se presentan resultados donde la muestra tiene un comportamiento contractante seguido por uno dilatante, pero es acompañado por un tensión pico en la curva tensión de corte- deformación axial (similar al comportamiento de un suelo

sobreconsolidado en condiciones saturadas). En I2, el comportamiento dilatante observable con medidas locales se presenta después de una $\epsilon_a=14\%$ (Figura 7.11a).

Los resultados con medidas globales en el ensayo I3 (Figura 7.11), presentan un comportamiento dilatante (con $e=0.531$) después de la falla de muestra ($\epsilon_a=36.2\%$), que no es consistente con lo estimado usando las medidas al finalizar la prueba (véase símbolo en forma de cruz en la Figura 7.11; estimado a partir del valor de $e=0.460$). La diferencia entre ambos valores muestran una significativa discrepancia que no es congruente con las diferencias observadas en el resto de ensayos (véase la Tabla 7.5; una descripción más detallada de medidas finales se presenta en secciones posteriores); y por lo contrario, el valor estimado usando las medidas al finalizar la prueba es semejante al valor obtenido (de $e=0.459$) mediante medidas globales en $\epsilon_a=19.9\%$ (poco antes de fallar la muestra). Lo anterior sugiere que las arrugas en la membrana (observada en los perfiles) podrían generar errores importantes en la medida global cuando se presentan grandes deformaciones, como en el caso de la medidas obtenida en $\epsilon_a=36.2\%$ en este ensayo. Por lo tanto, se decidió no considerar esta última medida global en el análisis de los resultados.

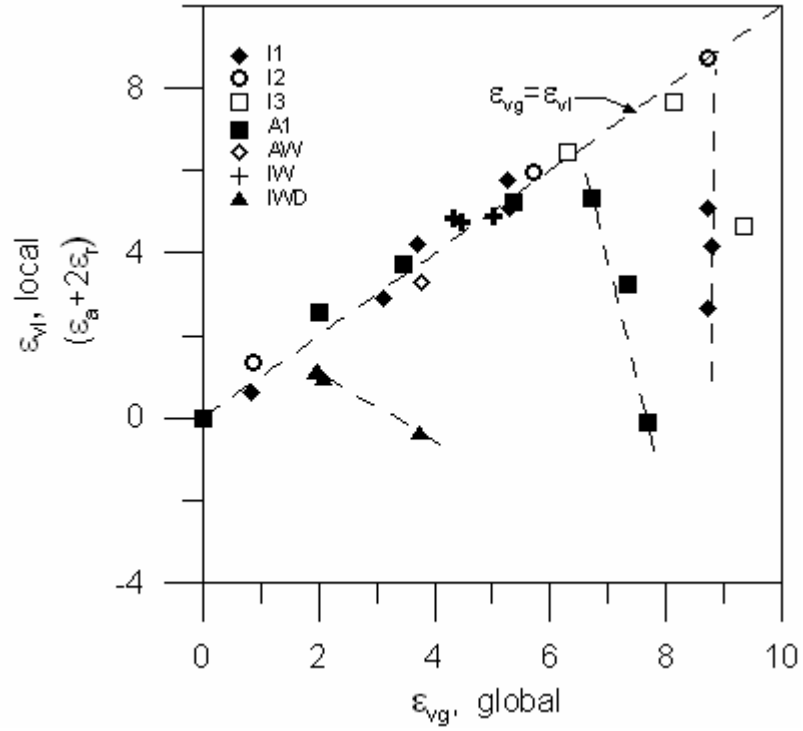
Sin embargo, en el ensayo 13, aún considerando medidas realizadas directamente sobre la muestra, se presenta un aparente comportamiento dilatante, después de su falla, Tal resultado puede ser atribuido a los errores propios del sistema de medición y procedimientos usados, pero este hinchamiento también podría ser originado por una caída de la tensión de corte, al incrementarse súbitamente el área transversal durante la falla. Se consideró que la muestra falló cuando se dieron grandes cambios súbito en la deformación axial y de corte ($\epsilon_a=22\%$ en la medida local externa). En la Figura 7.10 se observa que la muestra presenta un cambio súbito en las deformaciones axiales, pasando de ϵ_a de 14% a 19% con medidas locales internas y de 22% a 36% con externas. Tal cambio se genera debido a que el ensayo se realiza con control de tensión. La deformación volumétrica estimada con medidas locales, también presenta un incremento súbito, lo cual no es el comportamiento esperado (como se describió en el párrafo anterior). En este estado, el cambio súbito hizo imposible que se controla adecuadamente la aplicación de la tensión de corte. La tensión de corte aplicada es constantemente actualizada, corrigiendo el área transversal en forma automática (con las medidas de desplazamiento radial). En grandes deformaciones se desactiva la actualización automática y la corrección del área se realiza

manualmente dos veces al día, pero al ocurrir una falla súbita ya no puede ser actualizada. El cambio súbito alteró de manera considerable el área y la posición vertical en que se tomaban las medidas radiales, y se presentó una caída de la tensión de corte de 343 kPa a 190 kPa. Después, se mantiene constante la tensión de corte, y se concluye el ensayo hasta que se establezca la relación de agua, que (como puede observarse en la Figura 7.10) es la variable que más tarda en alcanzar la estabilización.

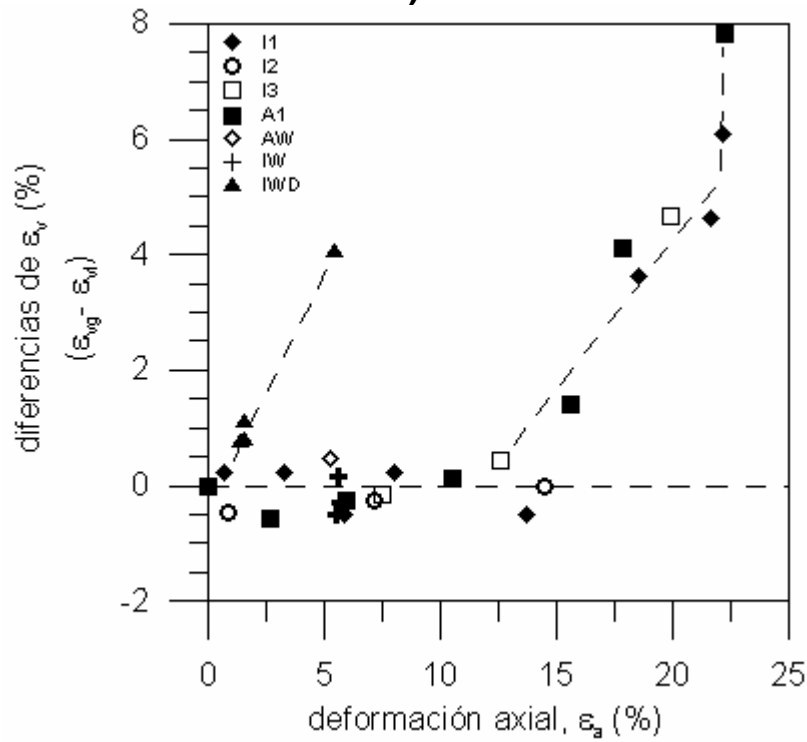
En la mayoría de los ensayos se detectó el comportamiento dilatante con la medida local pero no cuando se usa la medida global. Barrera (2002) observó el comportamiento dilatante tanto con medidas locales como globales.

En la curva e_w - ϵ_a se observa, inicialmente, entrada de agua y posteriormente expulsión de agua. Al fallar la muestra se presenta el cambio súbito en las deformaciones, mientras que no se detecta cambio en la relación de agua, al ser su movimiento de naturaleza más lenta (línea horizontal en la gráfica). Durante la estabilización, se dan cambios en la relación de agua (salida) mientras que permanece constante la deformación axial (línea vertical de la gráfica). La curva S_r - ϵ_a presenta un comportamiento análogo al la curva ϵ_v - ϵ_a , obteniéndose un mayor grado de saturación con medidas volumétricas globales que con las locales. El grado de saturación con deformación volumétrica global se considera más representativo ya que las medidas locales de deformación deberían ser relacionados con el grado de saturación ya que los cambios de humedad solo pueden ser obtenidos de forma global (Barrera et al., 2002).

En la Figura 7.14 se presentan relaciones entre las deformaciones volumétricas locales (con medida externa de ϵ_a) y globales obtenidas en todos los ensayos de compresión triaxial. Se observa una buena correlación entre las deformaciones volumétricas obtenidas de forma local (ϵ_{vl}) y global (ϵ_{vg}), pero al llegar a determinada deformación axial las medidas empiezan a divergir, presentando una menor contracción con valores de ϵ_{vl} que con ϵ_{vg} , y pasando, después, a tener un marcado comportamiento dilatante con ϵ_{vl} .



a)



b)

Figura 7.14 Gráfica de a) deformación volumétrica local ϵ_{vl} con la global ϵ_{vg} ; b) Diferencias $\epsilon_{vl} - \epsilon_{vg}$ con la deformación axial ϵ_a .

En el ensayo IWD (descrito en 7.3.3.1), la divergencia en las medidas ocurre en valores muy bajos de (ϵ_a). Este ensayo presenta un comportamiento muy rígido al inicio de la compresión triaxial y la rotura ocurre en bajos valores de deformación axial (con un comportamiento propio al de un suelo sobreconsolidado, que son descritos en secciones posteriores). Lo anterior sugiere que el valor de la deformación axial (o volumétrica) en la que se deja de tener un buen acuerdo entre las medidas, depende de lo apartado que la muestra esté de la forma de cilindro recto al iniciarse la compresión triaxial. La forma de la muestra al inicio de la compresión triaxial depende de la historia de tensiones previa).

Sin considerar el ensayo IWD, la diferencia entre medidas ($\epsilon_{v1}-\epsilon_{vg}$), son menores a $\pm 0.60\%$, en deformaciones axiales debajo de aproximadamente 15 % (véase la Figura 7.12a). La distribución de estas diferencias no presenta un patrón definido, mostrando más bien una dispersión aleatoria. Esto es diferente a lo observado en la etapa de consolidación, donde aunque el acuerdo entre ambas medidas es satisfactorio, con la medida global se obtienen menores cambios de volumen que con la “medida local”. El distinto patrón de comportamiento entre medidas puede ser originado por la desviación la forma cilíndrica de la muestra durante la compresión triaxial.

Con base a lo descrito, en la etapa de compresión triaxial, se optó por usar las medidas locales, con instrumentación externa de ϵ_a , para estimar las deformaciones volumétricas iniciales y las medidas globales en grandes deformaciones. La deformación axial se obtiene con el LVDT externo (con corrección por deformación del equipo). Por otra parte, se estima posible comparar sus resultados de los ensayos saturados con los de los ensayos no saturados, aunque en los ensayos saturados únicamente se realizan medidas globales de los cambios volumétricos.

7.3.2 Ensayos de compresión triaxial a distinta succión matricial e igual tensión media neta.

7.3.2.1 Trayectoria de tensiones.

En esta sección se presentan los resultados de ensayos de compresión triaxial bajo succión matricial constante, donde u_a y u_w son mantenidos constantes mientras $\Delta q/\Delta(p-u_a)=3$. Se comparan resultados de ensayos realizados a distinta succión matricial con la misma tensión

media neta inicial (o tensión media efectiva en suelos saturados) o realizados a igual succión matricial y variando la tensión media neta inicial. En la mayoría de los casos, se compara un ensayo compresión triaxial realizado en una determinada succión, con otro realizado en la misma tensión media neta (o efectiva) pero en condiciones saturadas de la muestra. Los ensayos saturados se realizan en un equipo triaxial convencional y los ensayos con succión constante en el equipo triaxial con control de succión (descrito en el capítulo 5). Las Figuras 7.15, 7.16, 7.17 y 7.18 muestran las trayectorias de los ensayos tratados en esta sección.

En los ensayos SI1 e I2 se realizaron etapas de compresión triaxial bajo succión matricial de cero (condición saturada de la muestra) y 100 kPa respectivamente, bajo una tensión media neta (o tensión media efectiva en SI1) inicial de 200 kPa, después de efectuarse etapas de consolidación isótropa. En la Figura 7.15 se presenta la trayectoria de tensiones seguida en los ensayos SI1 e I2. La trayectoria A1-B1 y A2-B2 corresponde a la etapa de equilibrio en I2 y la saturación de la muestra en SI1, respectivamente. Los tramos B1-C1 y B2-C2 muestran las trayectorias de consolidación isótropa (hasta alcanzar la tensión media neta, o tensión media efectiva en SI1, de 200 kPa), y los tramos C2-D2 y C1-D1 las trayectorias de compresión triaxial, en succión matricial constante.

En el ensayo IW se realizó la etapa de compresión triaxial en forma similar al ensayo SI1, bajo succión matricial cercana a cero (aproximadamente de 0.4 kPa) y bajo una tensión media neta inicial de 200 kPa; pero con una trayectoria de tensiones previa diferente, y en condiciones no saturadas (S_r inicial de 75%). En la Figura 7.16 se presenta la trayectoria de tensiones seguida en el ensayo IW. El ensayo IW se realizó en el equipo triaxial con control de succión (descrito en el capítulo 5). La trayectoria A3-B3 corresponde a la etapa de equilibrio, B3-C3 la etapa de consolidación isótropa (hasta alcanzar la tensión media neta de 200 kPa), C3-D3 la etapa de mojado bajo tensión media constante y D3-E3 la trayectoria de compresión triaxial, en succión matricial constante. En esta última etapa, la succión matricial es impuesta con la técnica de columna de agua negativa.

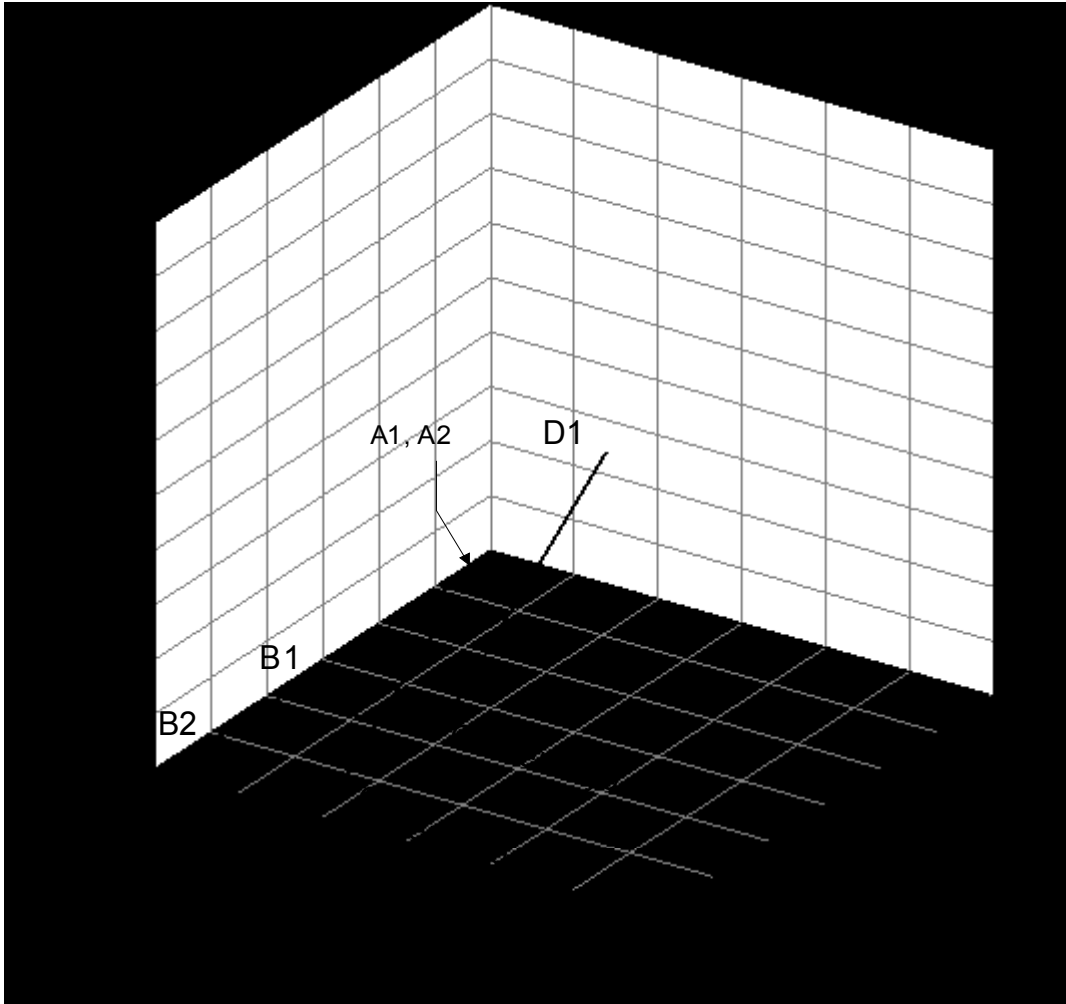


Figura 7.15 Trayectoria de tensiones seguida en los ensayos SI1 e I2.

En la Figura 7.17 se presenta la trayectoria de tensiones seguida en los ensayos SI2 e A1. En los ensayos SI2 e A1 se realizaron etapas de compresión triaxial bajo succión matricial de cero (condición saturada de la muestra) y 100 kPa respectivamente, bajo una tensión media neta (o tensión media efectiva) inicial de 400 kPa, después de efectuarse etapas de consolidación isótropa. Las trayectorias previa a la compresión triaxial son similares a efectuadas en los ensayos SI1 y I2, pero alcanzando durante la consolidación una tensión media neta de 400 kPa; y en el caso de A1, la trayectoria de consolidación inicial no es isótropa. En A1 se realiza inicialmente una consolidación anisótropa, con relación de tensiones $\eta=0.38$, hasta una presión media neta ($p-u_a$) de 200 kPa. Posteriormente se realiza una descarga anisótropa hasta ($p-u_a$) de 115 kPa (y una tensión de corte q de 10 kPa), seguida de una recarga isótropa a succión constante hasta una tensión media neta ($p-u_a$) de 400 kPa (véase tramo B1-C1 de la Figura 7.17). En SI2 la

consolidación fue siempre isotrópica. Los tramos C1-D1 y C2-D2 muestran las trayectorias de compresión triaxial, en succión matricial constante. Se sugiere que durante la consolidación anisótropa, del ensayo A1, no se producen cambios apreciables sobre la inclinación de la superficie de fluencia, modificando únicamente su tamaño. Se realiza la comparación entre la trayectoria de compresión triaxial en A1 con la efectuada en SI2, pero considerando la diferente historia de tensiones sufrida durante la consolidación.

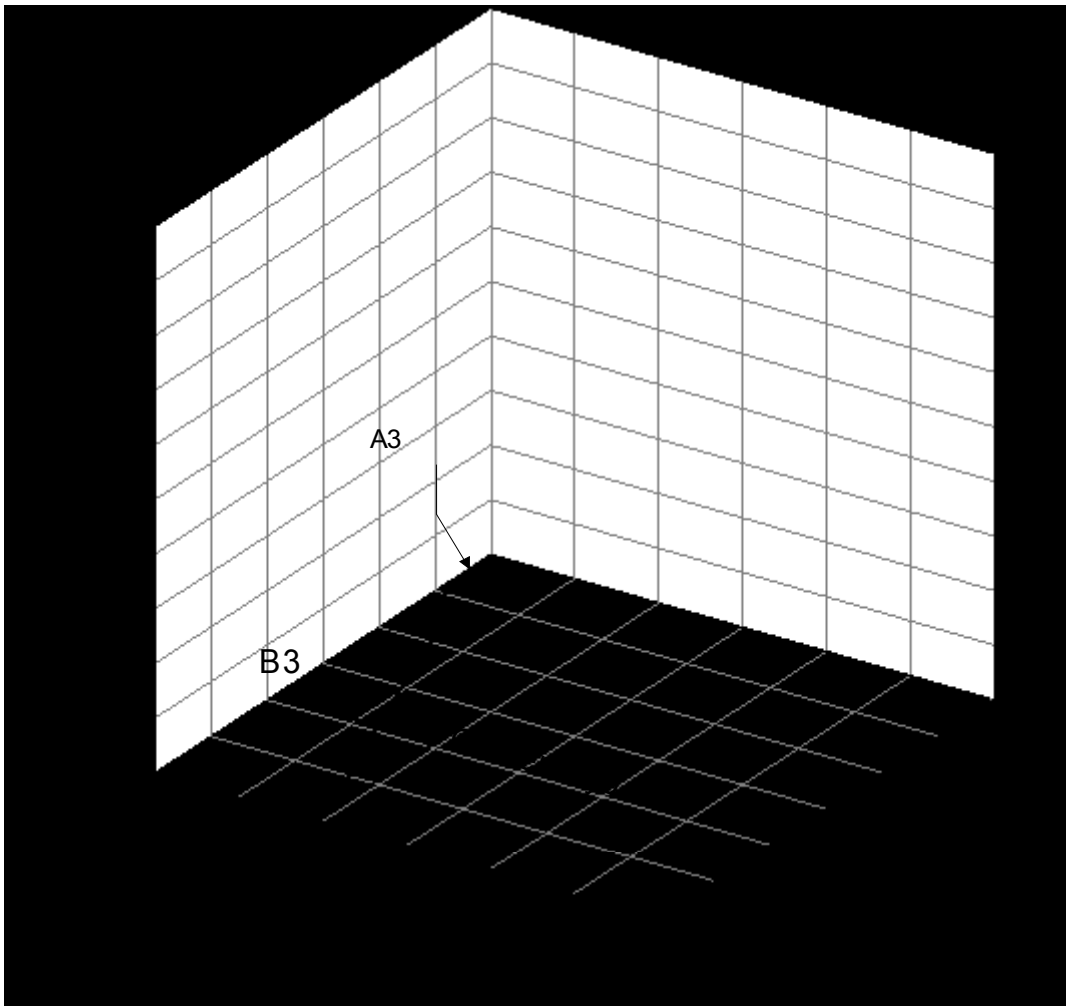


Figura 7.16 Trayectoria de tensiones seguida en el ensayo IW.

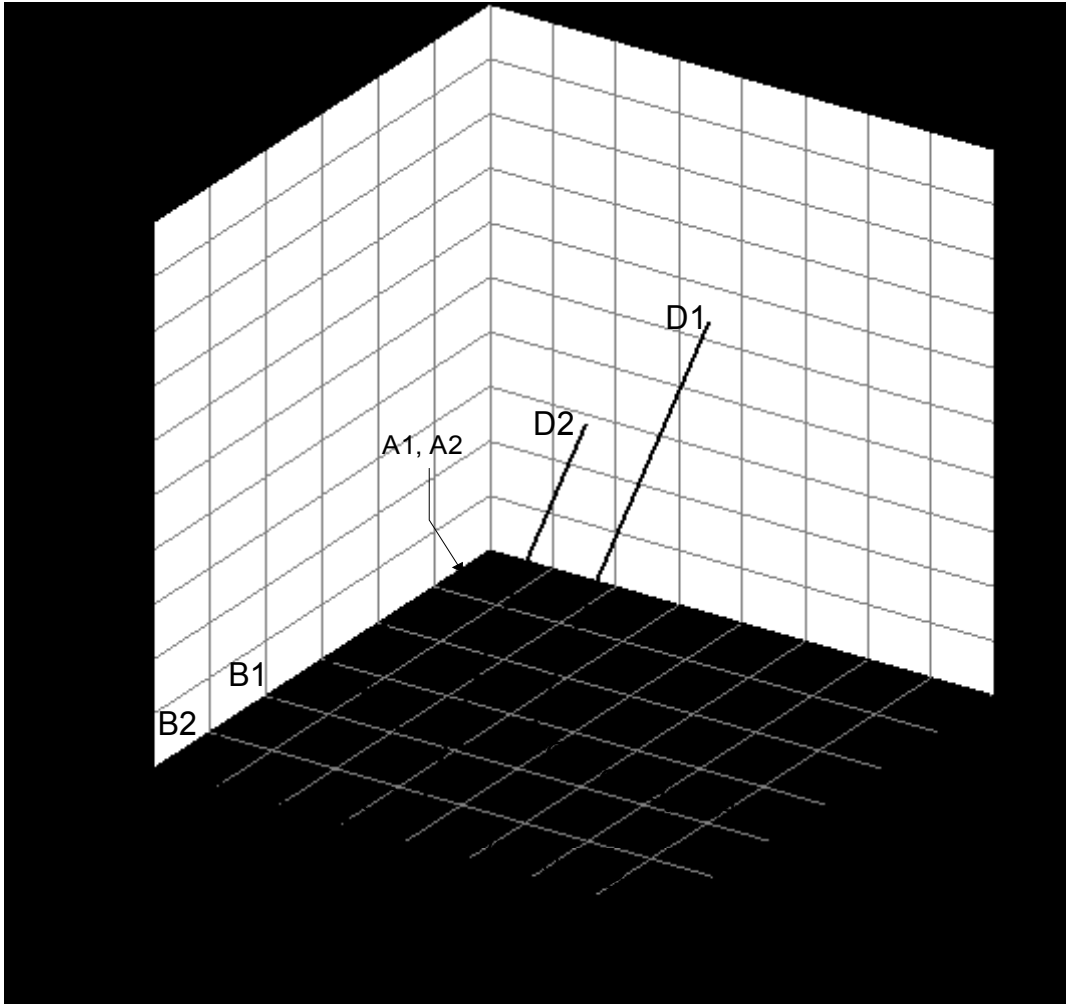


Figura 7.17 Trayectoria de tensiones seguida en el ensayo A1 y SI2.

En la Figura 7.18 se presenta la trayectoria de tensiones seguida en los ensayos SI3 e I1. En los ensayos SI3 e I1 se realizaron etapas de compresión triaxial bajo succión matricial de cero (condición saturada de la muestra) y 600 kPa respectivamente, bajo una tensión media neta (o tensión media efectiva) inicial de 600 kPa, después de efectuarse etapas de consolidación isótropa. Las trayectorias previa a la compresión triaxial son similares a efectuadas en los ensayos SI1 y I2.

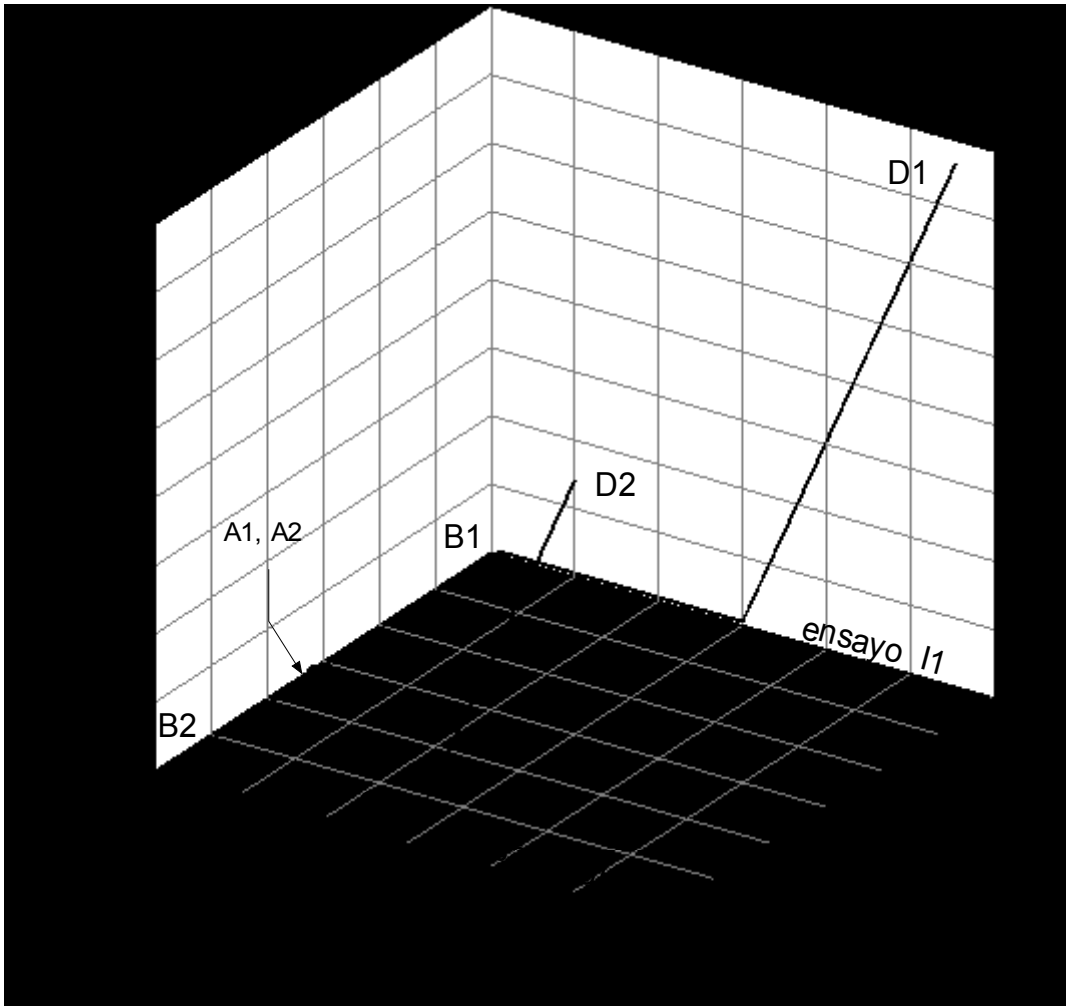


Figura 7.18 Trayectoria de tensiones seguida en el ensayo I1 y SI3.

7.3.2.2 Resultados experimentales.

Las Figuras 7.19, 7.20, y 7.21 muestran los resultados de la compresión triaxial (en los planos ε_a - q , ε_a - ε_s , ε_a - ε_v , ε_a - e_w y ε_a - S_r) en los ensayos SI1, IW e I2; SI2 y A1; y SI3 y I1. Las deformaciones, así como el valor del grado de saturación (e_w/e), obtenidas de forma global se representan en los gráficos por medio de una línea discontinua con símbolos (unidos por líneas continuas), donde cada símbolo corresponde a los diferentes valores que fueron seleccionados para medir la deformación radial del perfil de la muestra.

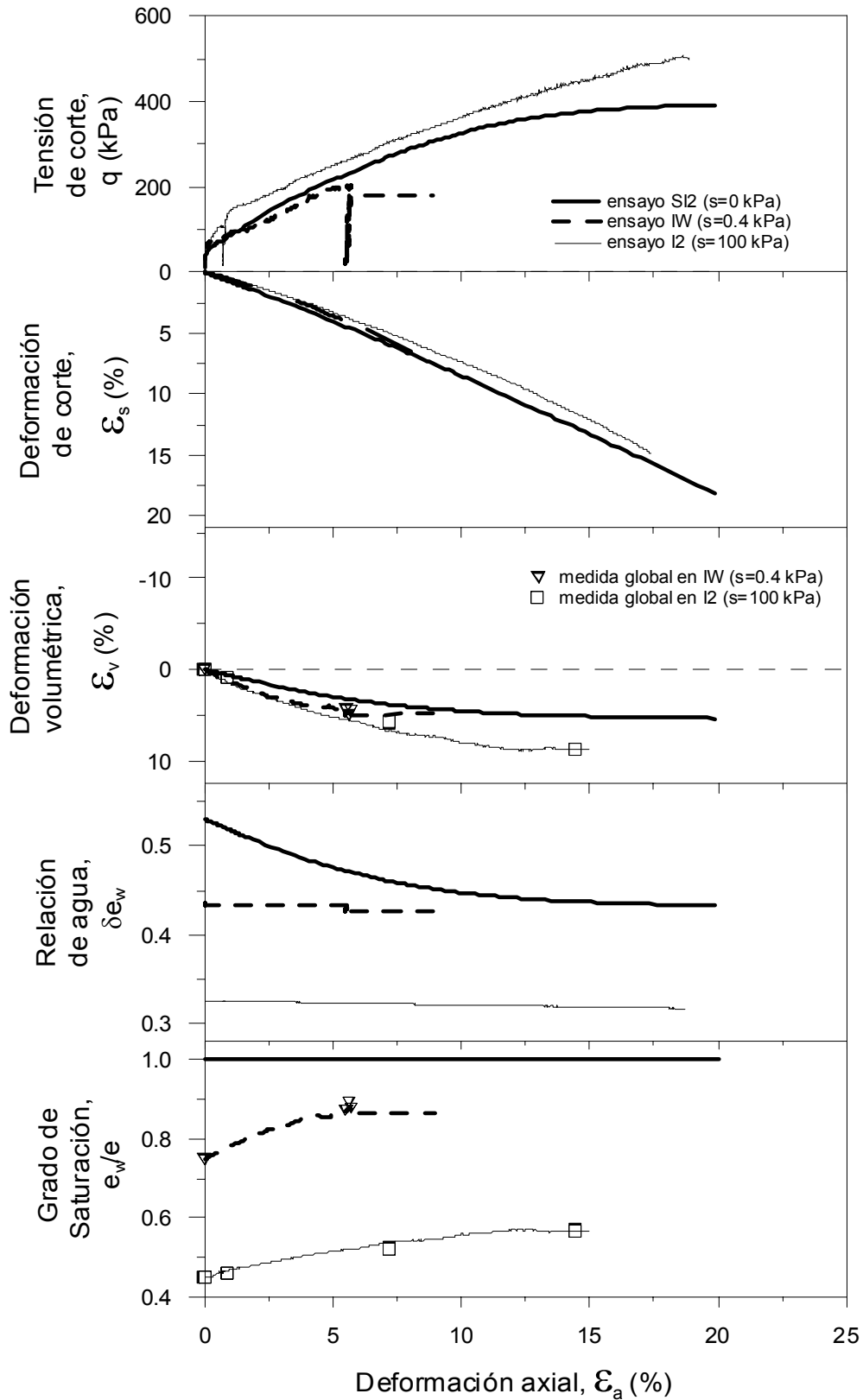


Figura 7.19. Resultados de la compresión triaxial en los ensayos SI1 ($s=0$ kPa), IW ($s=0.4$ kPa) e I2 ($s=100$ kPa), en una $(p-ua)=200$ kPa. Gráficas ϵ_a-q , $\epsilon_a-\epsilon_s$, $\epsilon_a-\epsilon_v$, $\epsilon_a-\delta e_w$ y ϵ_a-S_r .

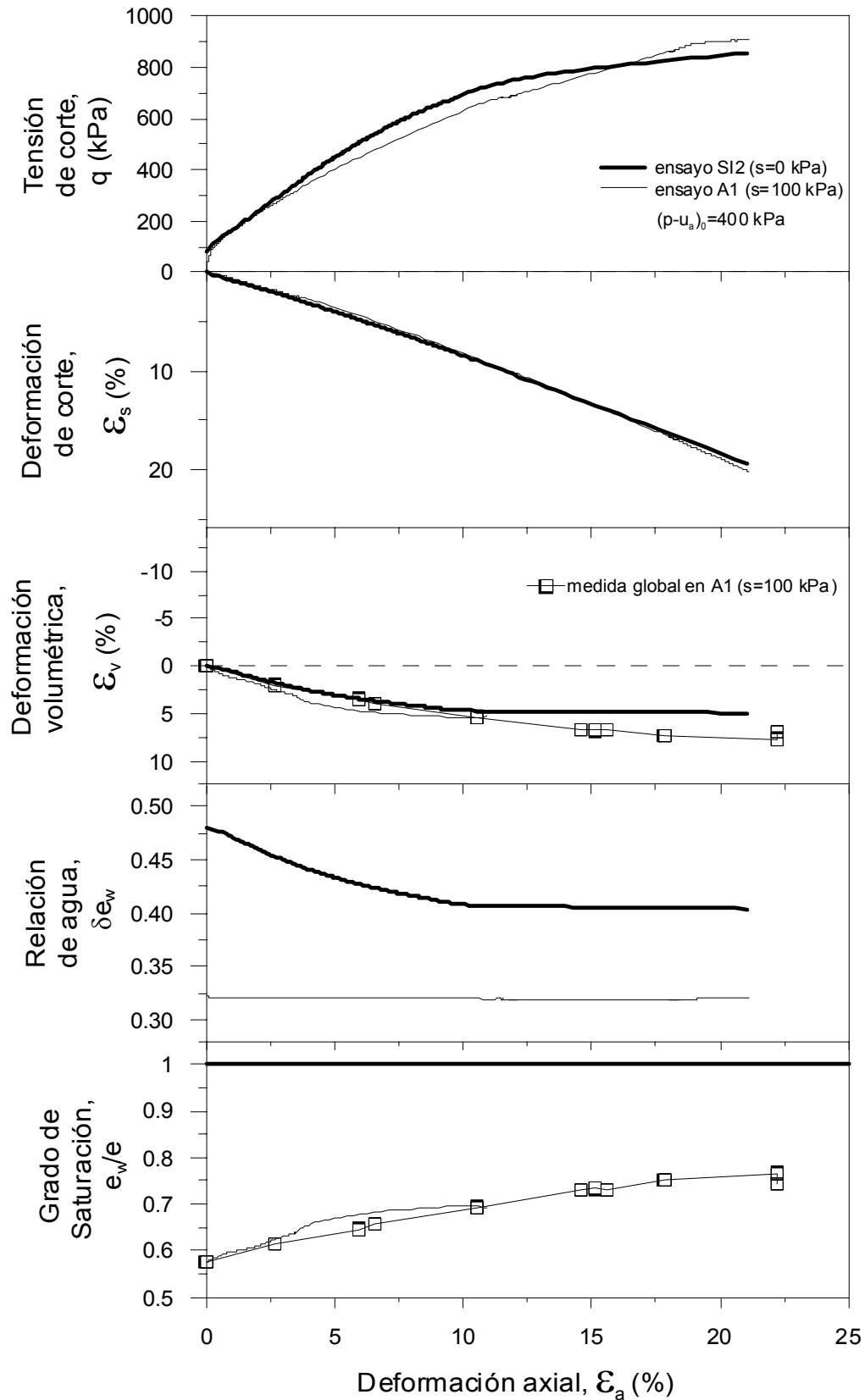


Figura 7.20 Resultados de la compresión triaxial en los ensayos SI2 ($s=0$ kPa), y A1 ($s=100$ kPa), en una $(p-u_a)=400$ kPa. Gráficas ϵ_a - q , ϵ_a - ϵ_s , ϵ_a - ϵ_v , ϵ_a - $\delta\epsilon_w$ y ϵ_a - S_r .

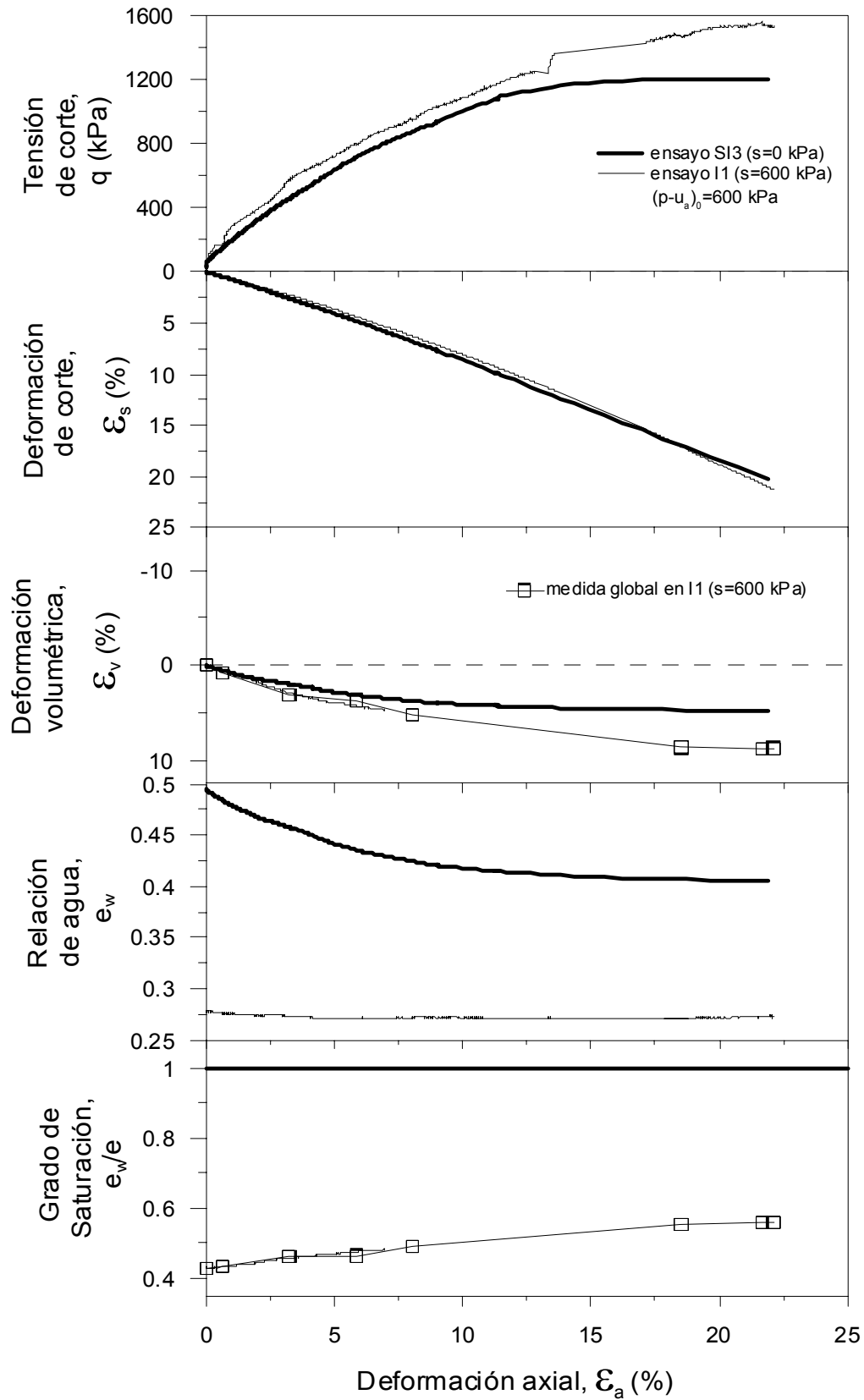


Figura 7.21 Resultados de la compresión triaxial en los ensayos SI3 ($s=0$ kPa) e I1 ($s=600$ kPa), en una $(p-u_a)=600$ kPa. Gráficas ϵ_a-q , $\epsilon_a-\epsilon_s$, $\epsilon_a-\epsilon_v$, ϵ_a-e_w y ϵ_a-S_r .

En todos los ensayos, en cuestión, la evolución de las curvas tensión de corte con deformación axial (ε_a - q) crece en forma monótona, sin presentar evidencia de un pico, con tendencia a seguir una respuesta normalmente consolidada, donde no hay un apreciable punto de fluencia, y generando deformaciones plásticas desde el inicio del corte. En el ensayo I2 (en la Figura 7.19) se observa un ligero comportamiento rígido en deformaciones axiales pequeñas, por debajo de 1%, aunque esta rigidez es mucho menor al observado en el tramo de descarga-recarga, por lo cual se considera que no existe un punto de fluencia.

En todos los ensayos, se tiende alcanzar el estado crítico en (ε_a - q), aunque, en forma menos clara en I2. En este ensayo se detectó un comportamiento que mostraba el inicio de un estado crítico (los resultados se analizaron cada 12 horas), cerca de la deformación asumida de falla (20 %), y se decidió parar el ensayo antes de que ocurriera un falla súbita (esto no se pudo evitar en la mayoría de los ensayos).

El estado crítico se alcanzó en deformaciones axiales (ε_a) por arriba del 18% en los ensayos saturados, y cerca o por arriba del 20% en los suelos parcialmente saturados. En todas los casos, en condiciones iguales de tensión media neta (o tensión media efectiva) inicial (200 kPa en SI1 e IW e I2; 400 kPa en SI2 y A1; y 600 kPa en SI3 y I1), a medida que la succión es mayor, el estado crítico se alcanza a una mayor tensión de corte. Esto es consistente con el modelo elastoplástico de estado crítico desarrollado por Alonso et al. (1990). Todas las muestras presentaron el tipo de falla por abarrilamiento.

En la Figura 7.20, se observa un cruce entre la curvas ε_a - q de los ensayos SI2 y A1, mostrándose un mayor endurecimiento de la muestra en SI2 que en A1, entre una ε_a de aproximadamente 3 y 12%, pero alcanzando antes la falla en SI2. El comportamiento observado en el rango inicial de deformación axial es atípico, ya que se espera que la muestra no saturada presente mayor rigidez inicial.

La curva ε_a - q del ensayo I1 (en la Figura 7.21) presenta algunas irregularidades, que muestran etapas de suspensión de la trayectoria de carga, con el estado de tensiones siendo mantenido constante por un cierto tiempo. En este ensayo (que fue el primero realizado con control de

succión) se detuvo la aplicación de la carga, en algunas tensiones predeterminadas, por un lapso de tiempo, con el fin comprobar que la velocidad de corte (1 Pa/s ó 0.06 kPa/min) no generara cambios importantes en la succión matricial (presiones de poro) aplicada en la muestra

En la Figura 7.22 se muestran los resultados de las estabilizaciones experimentadas cuando se paró el ensayo II en $q=150$ kPa, 1250 kPa y al finalizar (en $q=1539$ kPa). Se asume la finalización de estas etapas cuando el contenido de agua, y las deformaciones volumétricas en el espécimen llegan a estabilizarse. Lo anterior ocurrió en menos de 30 minutos cuando se efectuó la interrupción en $q=150$ kPa y 1250 kPa. En el caso de la estabilización después de la falla, se revisaron los cambios cada 12 horas, encontrándose que la estabilidad se alcanzó a las 68 horas. El tiempo considerado después de fallar la muestra fue más tardío, debido a que la salida de agua demoró en estabilizarse. Al parar la aplicación de la carga, la variación de la cantidad de agua con el tiempo es despreciable, con excepción de la estabilización observada después de fallar. El máximo cambio de agua fue de $e_w=0.013$ ($w=-0.21\%$). Las deformaciones presentadas en la figura son obtenidas de forma local, con el fin de tener lecturas continuas en el tiempo para evaluar su estabilización. El comportamiento dilatante observado, durante la estabilización en $q=1250$ y 1539 kPa, es consistente con la tendencia mostrada en el ensayo de compresión triaxial II (con medidas de deformación local) en valores mayores de, aproximadamente, $q=1000$ kPa (en $\varepsilon_a \approx 10\%$). Los cambios más importantes en las deformaciones ocurrieron antes de 16 horas. En todos los casos, al final de las estabilizaciones las deformaciones volumétrica y de corte fueron menores a ± 0.50 , con valores máximos de $\varepsilon_v = -0.25\%$ (con una relación $|\varepsilon_v \text{ en estabilización} / \varepsilon_v \text{ en la carga aplicada}| = 0.05$) y $\varepsilon_s = 0.48\%$ (con una relación $|\varepsilon_s \text{ en estabilización} / \varepsilon_s \text{ en la carga aplicada}| = 0.04$). Las variaciones de las deformaciones volumétricas (ε_v) durante las estabilizaciones pueden considerarse despreciables con respecto a las observadas por incremento de carga. Las deformaciones de corte (ε_s), también, pueden ser consideradas pequeñas, sin embargo, estas continúan, siguiendo una relación lineal, aun después de alcanzarse el equilibrio en deformaciones volumétricas. Como se describió en el capítulo 5, este comportamiento podría ser atribuido más a un fenómeno de fluencia continua bajo una carga sostenida (creep), que a una velocidad inadecuada de aplicación de tensión de corte. Al reiniciar la carga, se observa un pequeño endurecimiento de la muestra. En las recargas se observa un incremento de rigidez, para después seguir con un comportamiento acorde con el anterior a la suspensión. La rigidez en la

recarga puede ser atribuida a un ligero incremento de la preconsolidación debido a la deformación de fluencia o en la presión de agua dentro de los poros de la muestra, originado por que la velocidad de aplicación de carga no es suficientemente lenta. Al terminar la estabilización de agua y deformaciones, se restablece la succión de ensayo y, de acuerdo con el modelo de Alonso et al. (1990), al aumentar la succión matricial se incrementa la rigidez de la muestra. Se consideró que las deformaciones en la estabilización y el incremento de rigidez observado, con esta velocidad de aplicación de carga, no generó cambios apreciables en la curva tensión-deformación. En las demás curvas de la Figura 7.21 el efecto es despreciable. Se considera que la velocidad utilizada es adecuada para obtener resultados precisos del comportamiento hidromecánico del suelo, con una duración conveniente del ensayo (en este caso fue de aproximadamente 28 días, con una duración de la etapa de compresión triaxial de aproximadamente 19 días).

En los ensayos SI1 e IW, las curvas ε_a-q , se siguen trayectorias de corte semejantes. En estos ensayos se realizaron etapas de compresión triaxial en condiciones similares de tensión media neta (o tensión media efectiva) inicial, de 200 kPa, y succión matricial (SI1 en estado saturado e IW bajo succión matricial de cercana a cero, $s \approx 0.4$ kPa). Pero con trayectorias de tensiones previa diferentes (véase las Figuras 7.15, 7.16 y 7.20). Además, en IW se tienen condiciones no saturadas (S_r inicial de 75%). El ensayo IW se realizó en el equipo triaxial con control de succión y SI1 en un triaxial convencional. El resultado es consistente con modelo de Alonso et al. (1990), donde en ambos casos la etapa de compresión triaxial se inicia con el estado de tensiones ($(p-u_a)$, s , q) ubicado sobre la curva de fluencia LC y la curva de fluencia en el espacio ($(p-u_a)$, q). Por lo tanto, en ambos casos el modelo sugiere que la muestra presentará un una curva tensión-deformación típica para un comportamiento normalmente consolidado bajo condiciones de s igual (o cercano) a cero.

Desafortunadamente, el ensayo IW no pudo ser completado debido a que la muestra falló durante una trayectoria de recarga. Puede observarse en la Figura 7.23 que durante la compresión triaxial en el ensayo IW, en el momento previo a la falla, se alcanzó la curva $(p-u_a)-e$ del ensayo en condiciones saturadas, (SI1) y se llegó a un grado de saturación del 90% (las líneas discontinuas

en el plano e_w - e muestran estados de igual grado de saturación, e_w/e). No se tiene una explicación para la falla temprana de la muestra.

Las curvas ε_a - ε_v para muestras no saturadas, de las Figuras 7.19, 7.20, y 7.21, se realizaron usando medidas locales, con instrumentación externa, para estimar las deformaciones volumétricas iniciales y las medidas globales en grandes deformaciones, por lo indicado en la sección anterior, y para poder comparar resultados entre los ensayos saturados y los no saturados. Se observa que en todos los ensayos se presenta un comportamiento contractante, donde el volumen de las muestras decrece en forma monótona durante toda la etapa de corte, alcanzando el estado crítico al final. El comportamiento contractante observado, es consistente con lo sugerido por el modelo de Alonso et al. (1990) para suelos no saturados, normalmente consolidados, sometidos a compresión triaxial bajo succión matricial constante. Al igual que en el caso de ensayos saturados, en todos los ensayos no saturados, en cuestión, el estado de tensiones se encuentran sobre la superficie de fluencia al iniciar la compresión triaxial. Como se describió en el capítulo 6, en estos ensayos, durante la etapa de consolidación isotrópica se alcanzó y desplazó la tensión de fluencia.

En todos los casos, a medida que la succión matricial es mayor, se presenta una mayor deformación volumétrica final. Este es un comportamiento que no es consistente con el modelo de Alonso et al. (1990), ya que este sugiere que la succión matricial contribuye a incrementar la rigidez en la muestra. La menor compresibilidad de la muestra saturada, en estos ensayos, es consistente con lo observado en la etapas de consolidación isotrópica, donde la pendiente de la línea de compresión normal $\lambda(s)$ en $s=0$ ($\lambda(0)=-0.11$) es menor que la mostrada para $s=100$ kPa ($\lambda(100)=-0.15$) y $s=600$ kPa ($\lambda(0)=-0.14$). Sin embargo, en el modelo la relación entre las deformaciones axial y volumétrica se relaciona con la regla de flujo y no con la compresibilidad volumétrica. En Sivakumar (1993) y Futai y Almeida (2005), también, se observa una menor compresibilidad en ensayos de consolidación de la muestra saturada que en las no saturadas.

En las Figuras 7.23, 7.24, 7.25 y 7.26 se muestran los resultados de la trayectoria total de los ensayos descritos en los párrafos anteriores, en los planos $\log(p-u_a)$ - $\log(s)$, $\log(p-u_a)$ - e , $\log(s)$ - e_w y e - e_w .

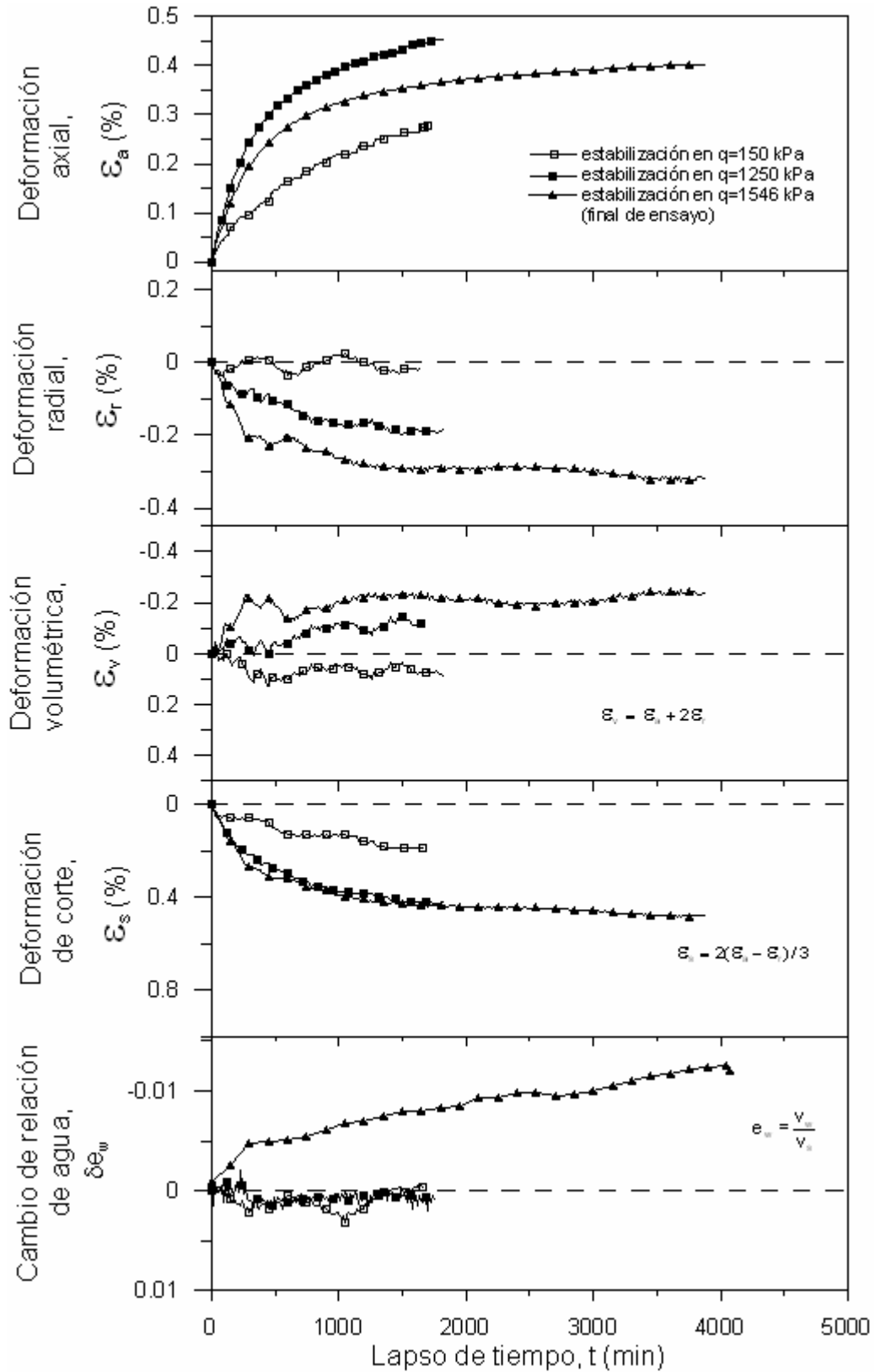


Figura 7.22 Resultados de la estabilización de las deformaciones y cambios de humedad de la muestra, después de interrumpir el incremento de tensiones durante el ensayo triaxial en I1 ($s=600$ kPa).

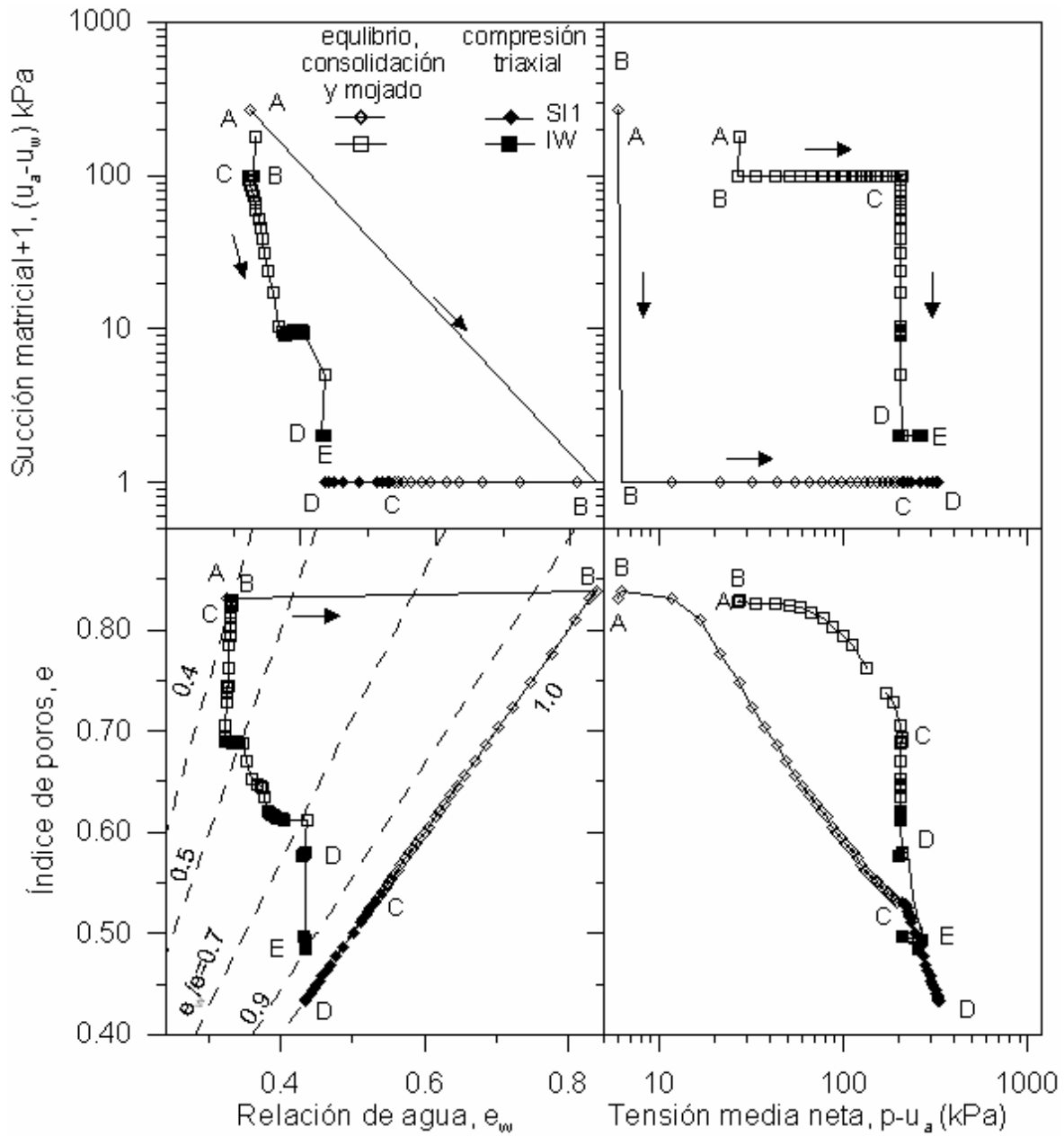


Figura 7.23 Resultados de la trayectoria total en los ensayos SI1 (consolidación y compresión triaxial $s=0$ kPa) e IW (compresión triaxial $s=0.4$ kPa). Resultados representados en los planos $\log(p-u_a)-\log(s)$, $\log(p-u_a)-e$, $\log(s)-e_w$ y $e-e_w$.

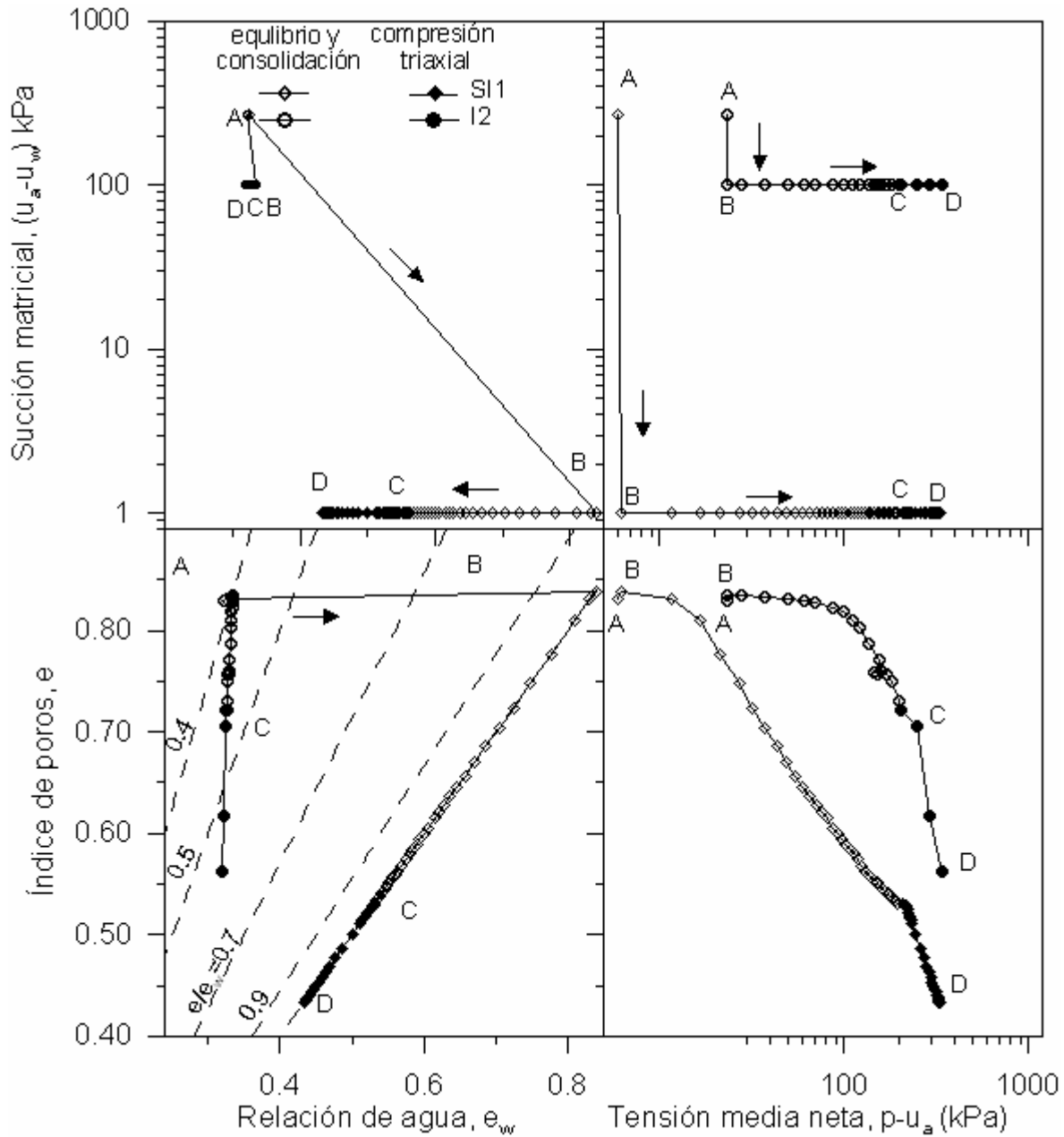


Figura 7.24 Resultados de la trayectoria total en los ensayos SI1 (consolidación y compresión triaxial en $s=0$ kPa) e I2 (consolidación y compresión triaxial $s=100$ kPa). Resultados representados en los planos $\log(p-u_a)-\log(s)$, $\log(p-u_a)-e$, $\log(s)-e_w$ y $e-e_w$.

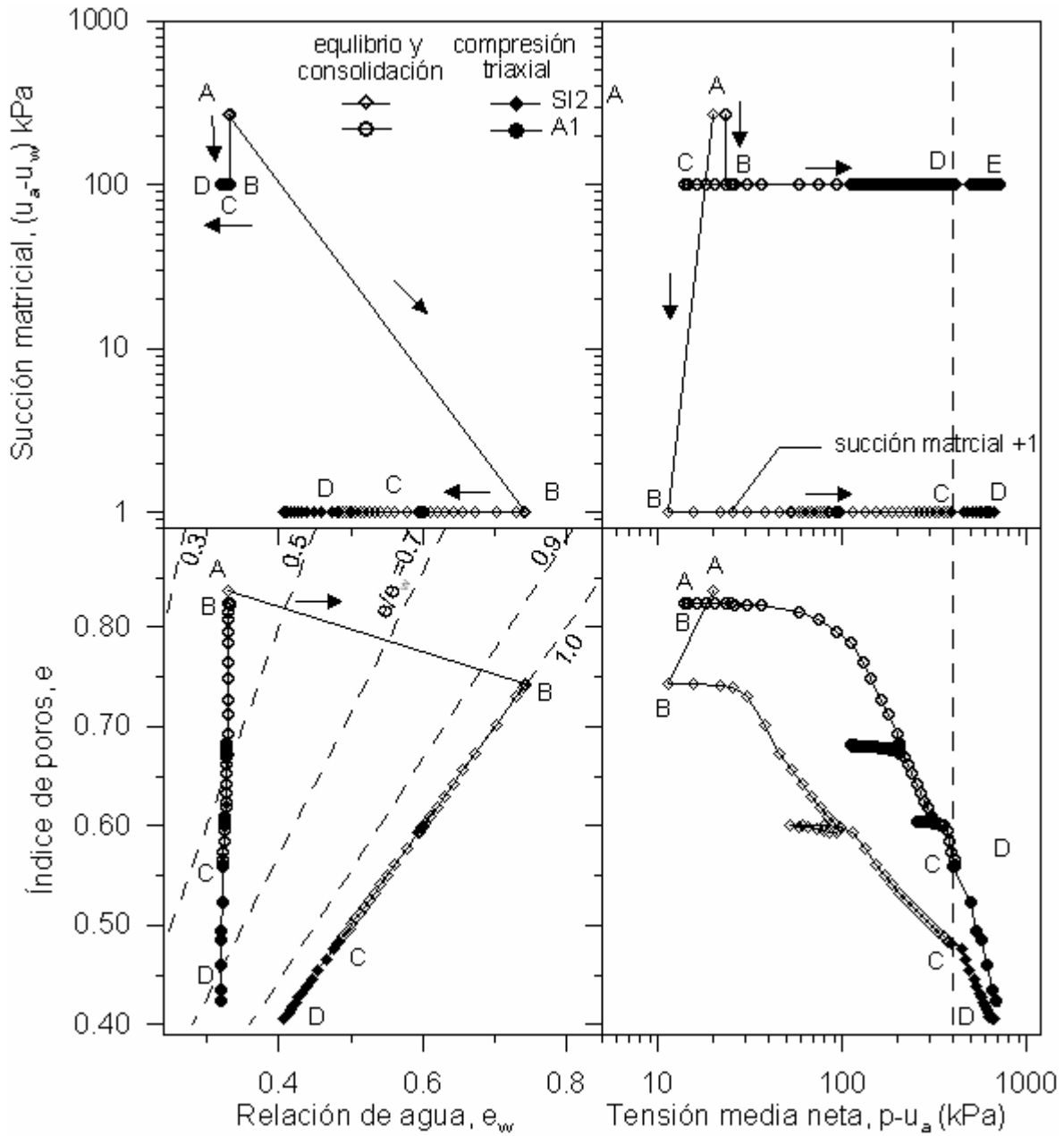


Figura 7.25 Resultados de la trayectoria total en los ensayos SI2 (consolidación y compresión triaxial en $s=0$ kPa) y A1 (consolidación y compresión triaxial $s=100$ kPa). Resultados representados en los planos $\log(p-u_a)-\log(s)$, $\log(p-u_a)-e$, $\log(s)-e_w$ y $e-e_w$.

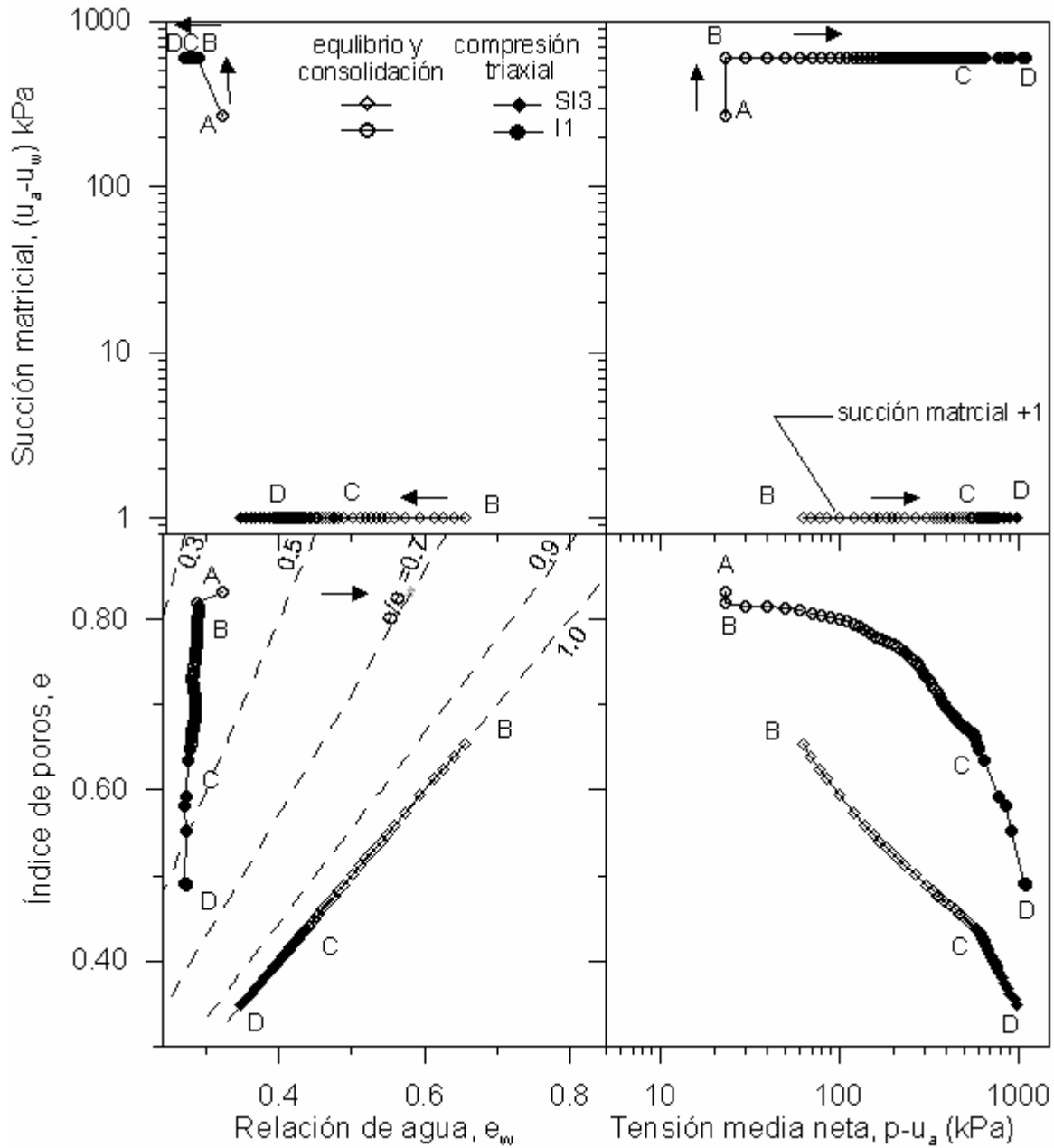


Figura 7.26 Resultados de la trayectoria total en los ensayos SI3 (consolidación y compresión triaxial en $s=0$ kPa) y I3 (consolidación y compresión triaxial $s=600$ kPa). Resultados representados en los planos $\log(p-u_a)-\log(s)$, $\log(p-u_a)-e$, $\log(s)-e_w$ y $e-e_w$.

En estas figuras 7.23, 7.24, 7.25 y 7.26 se observa que las etapas de compresión triaxial en muestras saturadas iniciaron con mayores valores de índices de poros que los realizados con control de succión sobre muestras parcialmente saturadas. El plano $\log(p-u_a)-e$ muestra que en las etapas de compresión triaxial con control de succión, se generan mayores cambios de índice de poros, y sus curvas $\log(p-u_a)-e$ tienden a converger con las de los ensayos saturados.

Durante las etapas de compresión triaxial bajo succión matricial de 100 kPa y 600 kPa se presenta la salida de pequeñas cantidades de agua, que siguen la tendencia observada durante las etapas de consolidación. En los ensayos I2 y A1, realizados con succión de 100 kPa, la tendencia seguida en el plano e_w-e (véase las Figuras 7.24 y 7.25) se mantiene cercanamente constante, desde las condiciones de inicio de ensayo. En el caso de I1 (véase la Figura 7.26), con succión matricial de 600 kPa, se tiene una salida apreciable de agua acompañada de una pequeña contracción del suelo durante la etapa de equilibrio (secado), para sufrir la salida de pequeñas cantidades de agua durante la consolidación y compresión triaxial. Mientras que los ensayos saturados se generan importantes salidas de agua, por la reducción de volumen de poros.

Estos resultados son compatibles con lo señalado en la sección 6.3.2, acorde al modelo propuesto por el modelo hidro-mecánico propuesto por Vaunat et al. (2000). Con base a lo señalado en la sección 6.3.2, se sugiere que durante la etapa de compresión triaxial en I1, al igual que en la de consolidación, se genera el movimiento de la curva de secado principal (por la reducción de vacíos durante la compresión triaxial), causando una pequeña reducción en la relación de agua en succión constante, debido a que el estado de la muestra en el plano $\log(s)-e_w$, se debe encontrar siempre sobre o dentro de las curvas de retención principales. Pero lo sugerido, no puede ser afirmado al carecerse de las curvas de mojado principal, relacionados con los índices de poros generados durante los ensayos.

En I2, aunque se genere el movimiento de las curvas principales, el estado del suelo permaneció dentro de la zona de scanning entre ambas curvas principales. Dentro de ésta zona, Romero & Vaunat (2000) y Vaunat et al. (2000) asumieron 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 de compresión triaxial en I2 y A1. Al igual que en el caso anterior, lo sugerido no puede ser afirmado al carecerse de las curvas de mojado principal.

En las mismas figuras se observa que durante las etapas consolidación y compresión triaxial, bajo succión matricial de 100 kPa y 600 kPa, el grado de saturación se incrementa, de aproximadamente 40% un máximo cercano a 75% (en A1). El grado de saturación se ve principalmente afectado por la reducción de vacíos, siendo poco influido por cambios en el contenido de agua.

7.3.3 Ensayos de compresión triaxial a distinta tensión media neta e igual succión matricial de 100 kPa.

7.3.3.1 Trayectoria de tensiones.

En esta sección se van a comparar los resultados de la etapa de compresión en los ensayos I2 y A1, que se realizaron bajo una succión matricial constante de 100 kPa, bajo una tensión media neta de 200 kPa y 400 kPa respectivamente. En la Figura 7.15 y Figura 7.17 se presentan las trayectorias de tensiones seguidas en los ensayos I2 y A1, respectivamente; y son descritas en la sección 7.3.2.1. En ambos casos se sigue una trayectoria de consolidación isótropa, en $q=10$ kPa, previa a la compresión triaxial. Pero en el ensayo A1 se realiza inicialmente una consolidación anisótropa, con relación de tensiones $\eta=0.38$ seguida posteriormente por una descarga hasta $(p-u_a)=115$ kPa y una tensión de corte q de 10 kPa (véase la Figura 7.17). Se analiza la comparación entre la trayectoria de compresión triaxial en A1 con la efectuada en I2 pero, como en el apartado anterior, considerando la diferente historia de tensiones sufrida durante la consolidación.

7.3.3.2 Resultados experimentales.

En la Figura 7.27 se muestran los resultados de la compresión triaxial, bajo succión matricial de 100 kPa, en los ensayos I2 y A1. En ambos ensayos, como se describió en la sección anterior, las curvas tensión de corte-deformación axial (plano ϵ_a-q) tienden a seguir una respuesta normalmente consolidada, donde no hay evidencia de un pico, generando deformaciones plásticas desde el inicio del corte, y al final se tiende alcanzar el estado crítico. Como se comentó, el

estado crítico es menos evidente en I2. En el ensayo A1, con mayor $(p-u_a)$ inicial (400 kPa), el estado crítico se alcanza a una mayor tensión de corte. Esto es consistente con el modelo de Alonso et al. (1990). Ambas muestras mostraron fallas del tipo por abarrilamiento.

En ambos ensayos las curvas $\varepsilon_a - \varepsilon_v$ (Figura 7.27) presentan un comportamiento contractante, donde el volumen de las muestras decrece en forma monótona durante toda la etapa de corte, alcanzando el estado crítico al final. Lo cual es consistente con lo observado en las curvas tensión de corte-deformación axial (plano $\varepsilon_a - q$). Al encontrarse el estado de tensiones sobre la superficie de fluencia al iniciar la compresión triaxial, en ambos ensayos (como se describió en el capítulo 6), el comportamiento observado es consistente con lo sugerido en el modelo de Alonso et al. (1990) para suelos no saturados, normalmente consolidados, sometidos a compresión triaxial bajo succión matricial constante.

En el ensayo A1, con mayor $(p-u_a)$ inicial (400 kPa) se presenta deformación volumétrica final casi igual a la del ensayo I2. En las Figuras 7.24 y 7.25 se muestran los resultados de la trayectoria total de los ensayos descritos en los párrafos anteriores, en los planos $\log(p-u_a) - \log(s)$, $\log(p-u_a) - e$, $\log(s) - e_w$ y $e - e_w$. En los planos $\log(p-u_a) - e$ y $e_w - e$ de estas figuras, se observa que la etapa de compresión triaxial en el ensayo I2 se inició con un valor más grande de índices de poros (menos densificación) que el realizado en A1.

Durante ambas etapas de compresión triaxial bajo succión matricial de 100 kPa se presenta salida de pequeñas cantidades de agua, que siguen la tendencia observada durante las etapas de consolidación (véase sección 6.3.2), siguiendo similares tendencias en el plano $e_w - e$ (Figuras 7.24 y 7.25); sin embargo, en la Figura 7.27 puede apreciarse que en el ensayo A1 la salida de agua es muy pequeña. Similarmente a lo descrito en la sección anterior, se sugiere (con base al modelo hidro-mecánico propuesto por Vaunat et al. (2000)) que durante la etapa de compresión triaxial, en ambos ensayos, el estado de la muestra en el plano $\log(s) - e_w$, se encuentra siempre dentro de la zona de scanning entre ambas curvas principales. Pero no puede ser afirmado al carecerse de las curvas de mojado principal, relacionadas con los índices de poros generados durante los ensayos. Durante la consolidación en los ensayos I2 y A1, las trayectorias seguidas en el plano $e_w - e$ son similares.

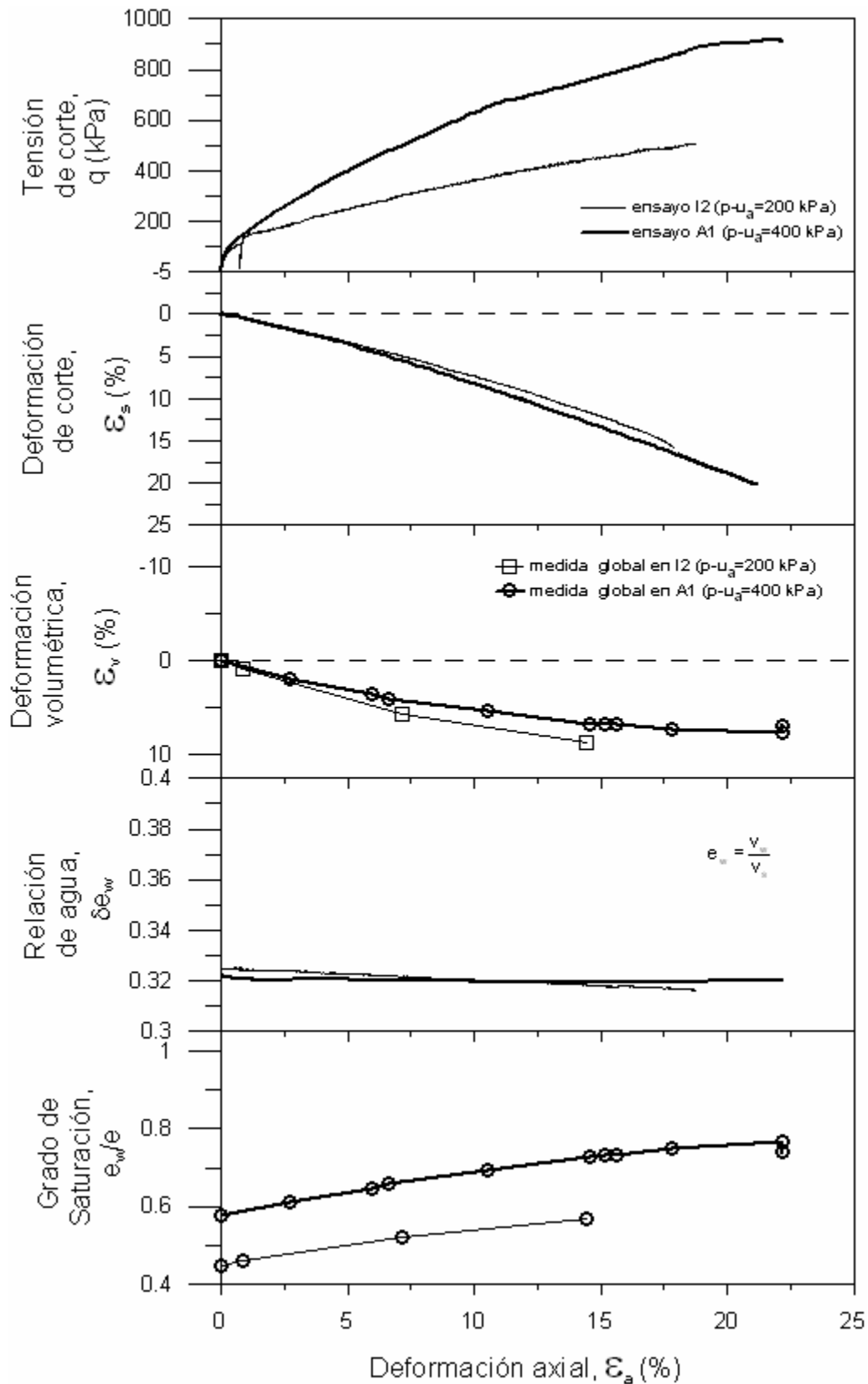


Figura 7.27 Resultados de la compresión triaxial bajo succión matricial de $s=100$ kPa en los ensayos I2 ($p-u_a=200$ kPa) y A1 ($p-u_a=400$ kPa). Gráficas ϵ_a-q , $\epsilon_a-\epsilon_s$, $\epsilon_a-\epsilon_v$, $\epsilon_a-\delta e_w$ y ϵ_a-S_r .

En las mismas figuras se observa que al final de la compresión triaxial, bajo succión matricial de 100 kPa, se alcanza un grado de saturación de aproximadamente 60% en el ensayo I2 y cercano a 75% en A1. El grado de saturación se ve principalmente afectado por la reducción de vacíos, siendo poco influido por cambios en el contenido de agua.

7.3.4 Ensayo IWD. Humedecimiento y secado, previo a trayectorias de consolidación y compresión triaxial bajo succión matricial de 100 kPa.

7.3.3.1 Trayectoria de tensiones.

En el ensayo IWD, se siguió una trayectoria de compresión isotrópica y una posterior compresión triaxial, en condiciones de succión matricial constante de 100 kPa, después de un ciclo inicial de humedecimiento y secado, a tensión media neta ($p-u_a$) constante. La trayectoria completa del ensayo se muestra en la Figura 7.28. La primera etapa del ensayo IWD (tramo A-B-C de la Figura 7.28 y A-B-C-D-E-F en la Figura 7.29) consiste en mojado de la muestra, por escalones de succión ($s=200, 100, 10, 0$ bajo una tensión media neta constante de $(p-u_a)=23$ kPa) hasta saturarla, y después secarla hasta una succión matricial de 100 kPa, previo a la realización de una trayectoria de compresión isotrópica (tramo C-D en la Figura 7.28, y F-G en la Figura 7.29). Una descripción detallada del procedimiento aplicado durante ésta trayectoria de mojado- secado se presenta en el apartado 5.3.5. La etapa de compresión triaxial con control de succión se realiza después de la etapa de compresión isotrópica. Tanto la consolidación isotrópica (tramo C-D en la Figura 7.28) como la etapa de compresión triaxial (tramo D-E) son realizadas bajo una succión matricial constante de 100 kPa. La compresión triaxial se ejecuta bajo una tensión radial (presión de confinamiento) constante de 200 kPa que corresponde a la condición final de la consolidación isotrópica.

7.3.3.2 Resultados experimentales.

En el capítulo 6 se presentaron los resultados de la primera fase del ensayo IWD, que corresponde a la aplicación de la etapa de equilibrio en $s=200$ kPa, y posterior reducción, por escalones de la succión matricial en la muestra de succión ($s=100, 10, 0$ bajo una $(p-u_a)=23$ kPa) hasta saturarla (tramo A-B de la Figura 7.28 y A-B-C-D-E en la Figura 7.29). Estos resultados se presentan en la Tabla 7.1 y Figura 7.30. Debido a que durante las etapas de saturación y de

secado se presentaron grandes deformaciones, en esta figura las medidas con LVDTs internos solo se presentan hasta el tramo D-E. En esta sección se presentan los resultados correspondientes al resto de las etapas. En la Figura 7.30, en la etapa de compresión triaxial se presentan los resultados estimados con las medidas globales.

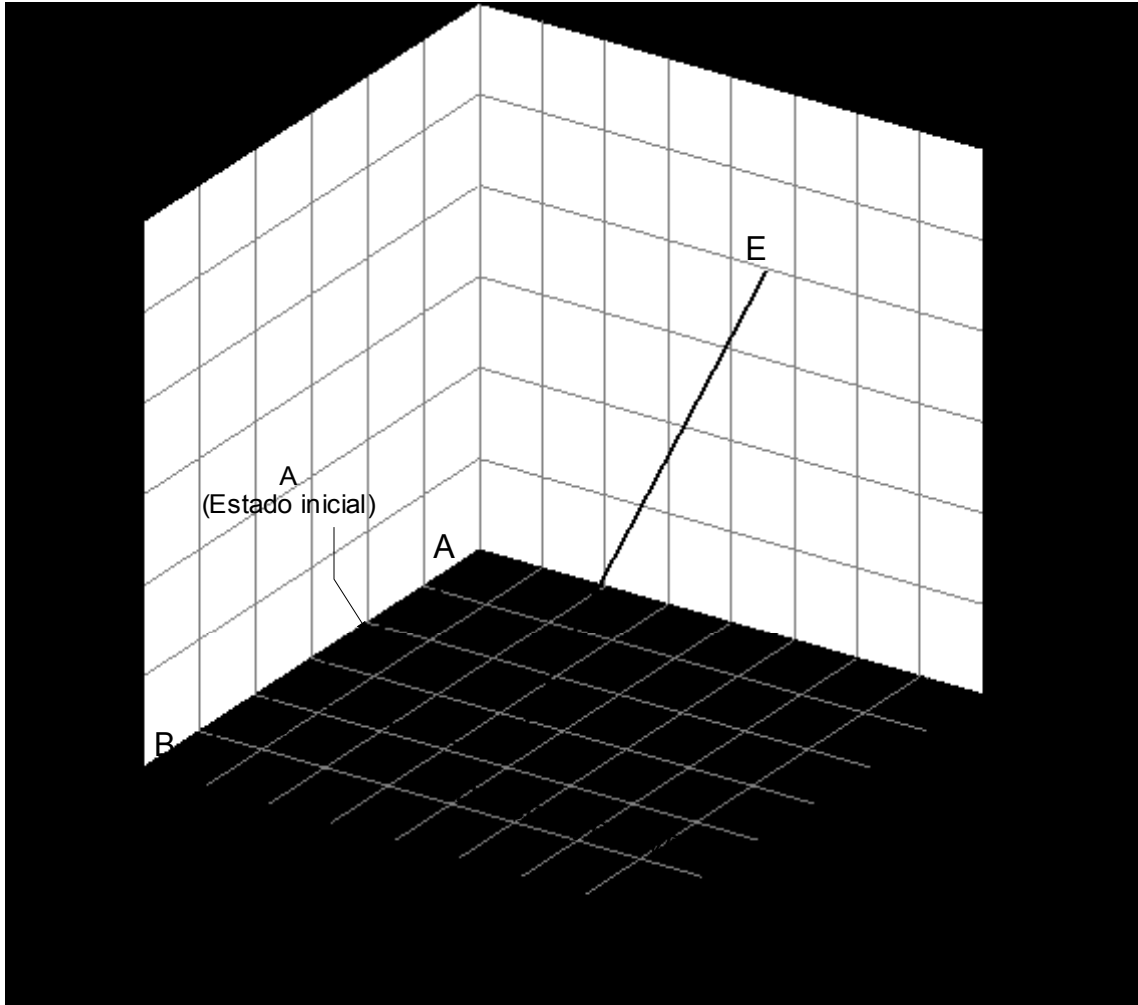


Figura 7.28 Trayectoria de tensiones del ensayo IWD con un ciclo de humedecimiento y secado a presión neta media constante, compresión isotrópica y una posterior compresión triaxial, en condiciones de succión matricial constante de 100 kPa.

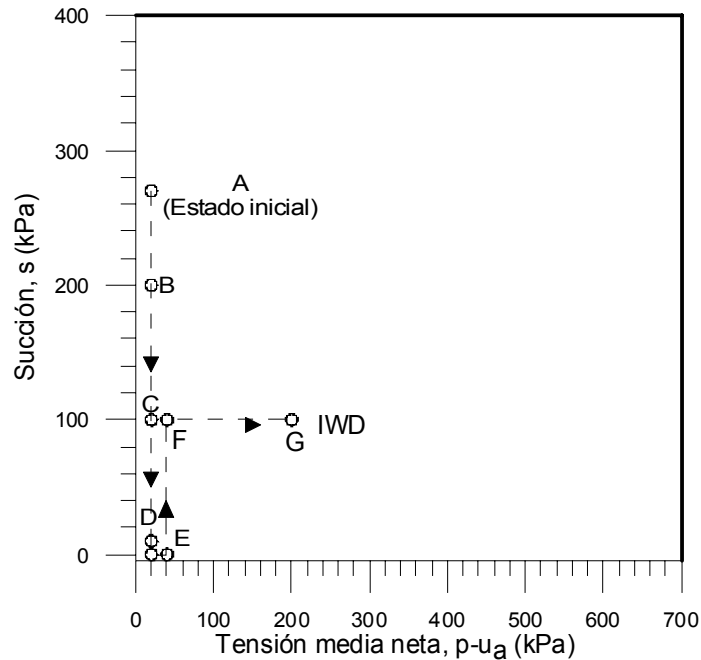


Figura 7.29 Etapa de equilibrio (A-B); mojado y secado por etapas (B-C-D-E-F); y trayectoria de compresión isótropa bajo condiciones de succión controlada (F-G) para el ensayo IWD.

Posteriormente, la muestra se satura mediante una carga hidráulica de agua (de 70 cm) y con la presión de aire igual a la atmosférica (tramo D-E de la Figura 7.29, con trayectoria $s=10$ kPa a 0 kPa). Para ello, en forma similar a los ensayos IW y AW, tanto la presión de confinamiento (σ_r) como las presiones de aire (u_a) y agua (u_w) son reducidas gradualmente hasta obtener un estado de tensiones final de $(p-u_a)=20$ kPa y $q=10$ kPa pero con $u_a=0$. Al igual que en los ensayos IW y AW, durante la reducción gradual de presiones, el estado de tensiones de la muestra se mantiene dentro de la región elástica reduciendo las presiones mediante pequeños escalones de 5 kPa, para evitar la ocurrencia de deformaciones permanentes.

Después, se abrió la llave que permite el paso de agua al anillo metálico (de alta permeabilidad, que usualmente se usa para aplicar la presión de aire en la técnica de traslación de ejes) del pedestal, y 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. Una mejor descripción del equipo y procedimientos usados se da en los capítulos 3 y 6. Se permite la salida de agua por el anillo metálico ubicado en el cabezal de la muestra. Se consideró que la muestra está saturada cuando el volumen de agua que entra a la muestra es igual a la que sale (medido con

un sistema de buretas colocado en la entrada y salida del flujo de agua). Los resultados se presentaron en el capítulo 6 y en la Tabla 7.1.

Tabla 7.1 Condiciones iniciales y finales en las etapas de cambio de succión matricial en el ensayo IWD.

Ensayo	condiciones iniciales de cada etapa					final de cada etapa				
	e	e_w (w_{0s} ,%)	Sr (%)	$p-u_a$ kPa	u_a-u_w kPa	e	e_w (w ,%)	Sr (%)	u_a-u_w kPa	ε_v (%)*
IWD	0.828	0.324 (12.0)	39.1	23	270**	0.822	0.314 (11.6)	38.3	200	0.333
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
IWD	0.725	0.725 (26.8)	100	23	0	0.492	0.413 (15.8)	97.1	100	20.395

*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).

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

Al finalizar la saturación del espécimen, las presiones de confinamiento (σ_r), de aire (u_a) y de agua (u_w) son incrementadas gradualmente (mediante pequeños escalones de 5 kPa) para alcanzar un estado de tensiones final de $(p-u_a)=20$ kPa, $q=10$ kPa y succión matricial de $s=0$ pero con $u_a=u_w=220$ kPa, con el fin de realizar una trayectoria de secado usando la técnica de traslación de ejes. Posteriormente, se aplica una succión matricial de 100 kPa, reduciendo la presión de agua hasta 120 kPa (el tramo E-F de la Figura 7.29 representan estas dos acciones). Durante la aplicación de los escalones se generaron reducciones de volumen, a pesar que durante el incremento gradual de presiones, el estado de tensiones de la muestra se mantiene dentro de la región elástica (tramo E-E' de la Figura 7.30 y tramo C-C' de la Figura 7.31). En los resultados (en el tramo E'-F de la Figura 7.30 y C'-D de la Figura 7.31) se observa que la reducción en el índice de poros es bastante mayor a la usualmente se genera al contraerse la muestra por secado.

No se puede dar una explicación clara sobre la causa de esta atípica deformación, en ambas acciones. Pueden haber existido varias condiciones que la generaron. En primer lugar hay que considerar las deformaciones de contracción por secado (en el tramo E'-F de la Figura 7.30). Otra, podría ser la aplicación de la traslación de ejes bajo la condición de fase de aire no interconectada, existente durante el inicio de esta trayectoria, en la muestra saturada. Durante el

inicio del secado, el comportamiento mecánico es gobernado por la tensión efectiva (p'), debido a que la muestra está saturada en los primeros incrementos de succión. A medida que se presenta la reducción de vacíos, la muestra permanece saturada en mayores valores de succión, debido al incremento del valor de entrada de aire de la muestra. Por lo tanto, es de esperarse que la muestra se encuentre saturada en gran parte de la aplicación de traslación de ejes y de la trayectoria de secado. Sin embargo, puede haber dificultad para que penetre el agua libre durante la saturación, bajo pequeños gradientes hidráulicos, en los espacios reducidos de poro llenos de aire (Pereira y Fredlund, 2000), por la presencia de aire atrapado dentro de la microestructura del suelo. Esta presencia de aire ocluido (con fase de aire no interconectada) genera fluidos de poro compresibles. Resultados teóricos presentados por Bocking y Fredlund (1980) sugieren que, cuando el suelo contiene cantidades significativas de aire ocluido, la traslación de ejes genera cambios de volumen permanentes. Gallipoli et al. (2003) sugiere que bajo condiciones saturadas los cambios de succión corresponden a un cambio equivalente de la tensión efectiva. En la figura 7.32 se presenta la ubicación del índice de poros, que corresponde al final de la etapa ($e \approx 0.49$), sobre la curva de compresión isótropa de la muestra saturada (ensayo S1). La tensión media efectiva (equivalente) que le corresponde sobre la curva de compresión isótropa (saturada) es de 320 kPa.

Al terminar la etapa de secado se inicia la etapa de compresión isótropa bajo una succión matricial de 100 kPa (tramo F-G de la Figura 7.29). La reducción de vacíos en la etapa de consolidación es bastante menor a la generada en la etapa previa (de aplicación de traslación de ejes desde la muestra saturada y secado), tal como se observa en la Figura 7.31 (la etapa de consolidación es indicada en el tramo D-E y la previa en C-D).

En la Figura 7.33 se comparan los resultados de consolidación isótropa en IWD (véase también la Tabla 7.2) con los del ensayo I2, que sigue la misma trayectoria de consolidación en $s=100$ kPa, pero sin la realizarse la trayectoria previa de saturación total y secado. Se observa que las curvas de tensión media neta-deformación axial, radial y volumétrica, siguen caminos semejantes en valores de tensión media neta por debajo de 100 kPa, y se separan después, presentando mayor rigidez el ensayo IWD. En ambas muestras se presenta salida de agua, siendo mayor en el ensayo IWD, que presenta también un mayor grado de saturación final ($S_r=87.1$ % en IWD y 40.0% en I2).

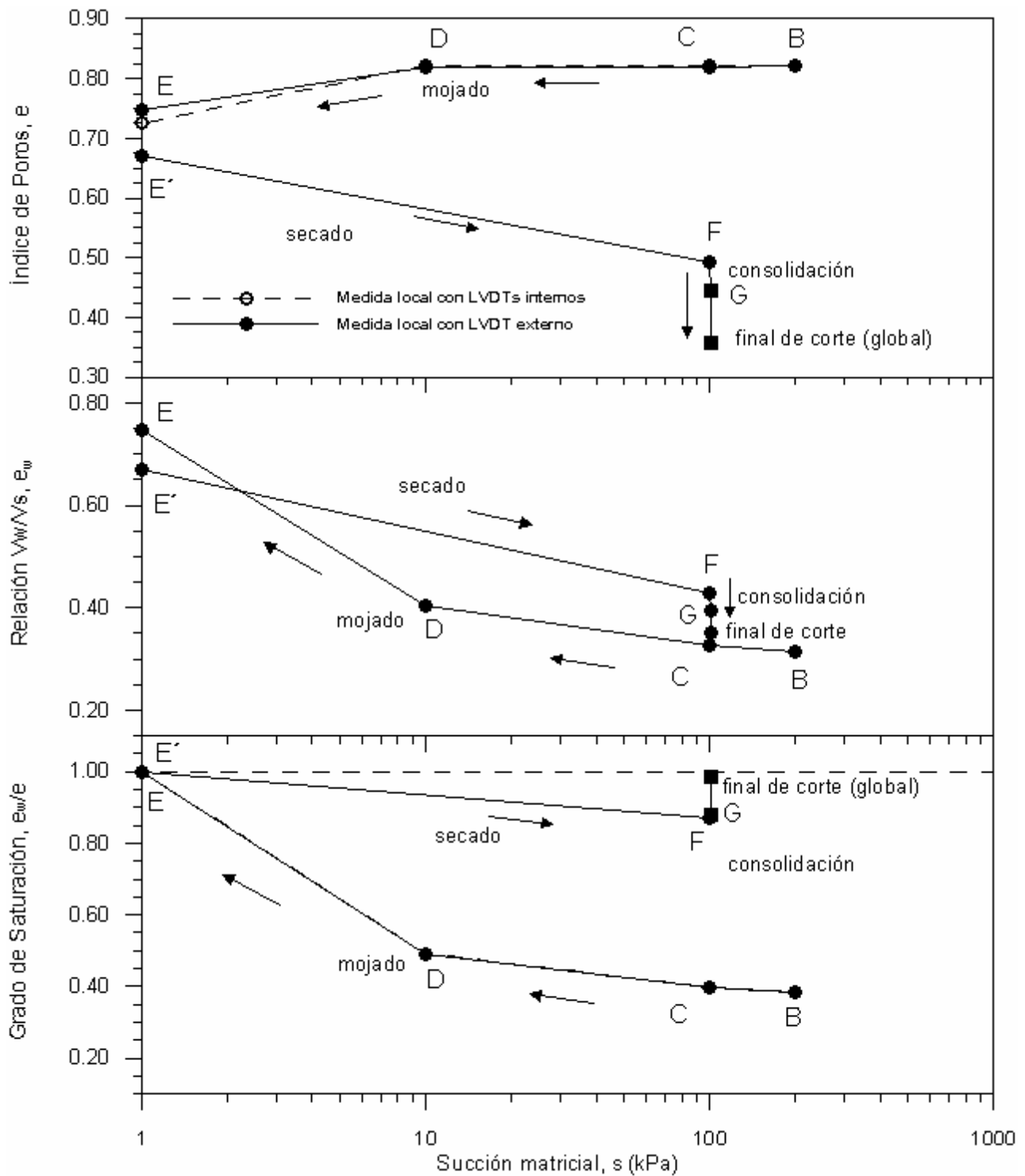


Figura. 7.30 Resultados de la etapa de equilibrio (A-B); mojado y secado por etapas (B-C-D-E-F); y trayectoria de compresión isotropa bajo condiciones de succión controlada (F-G) y compresión triaxial del ensayo IWD.

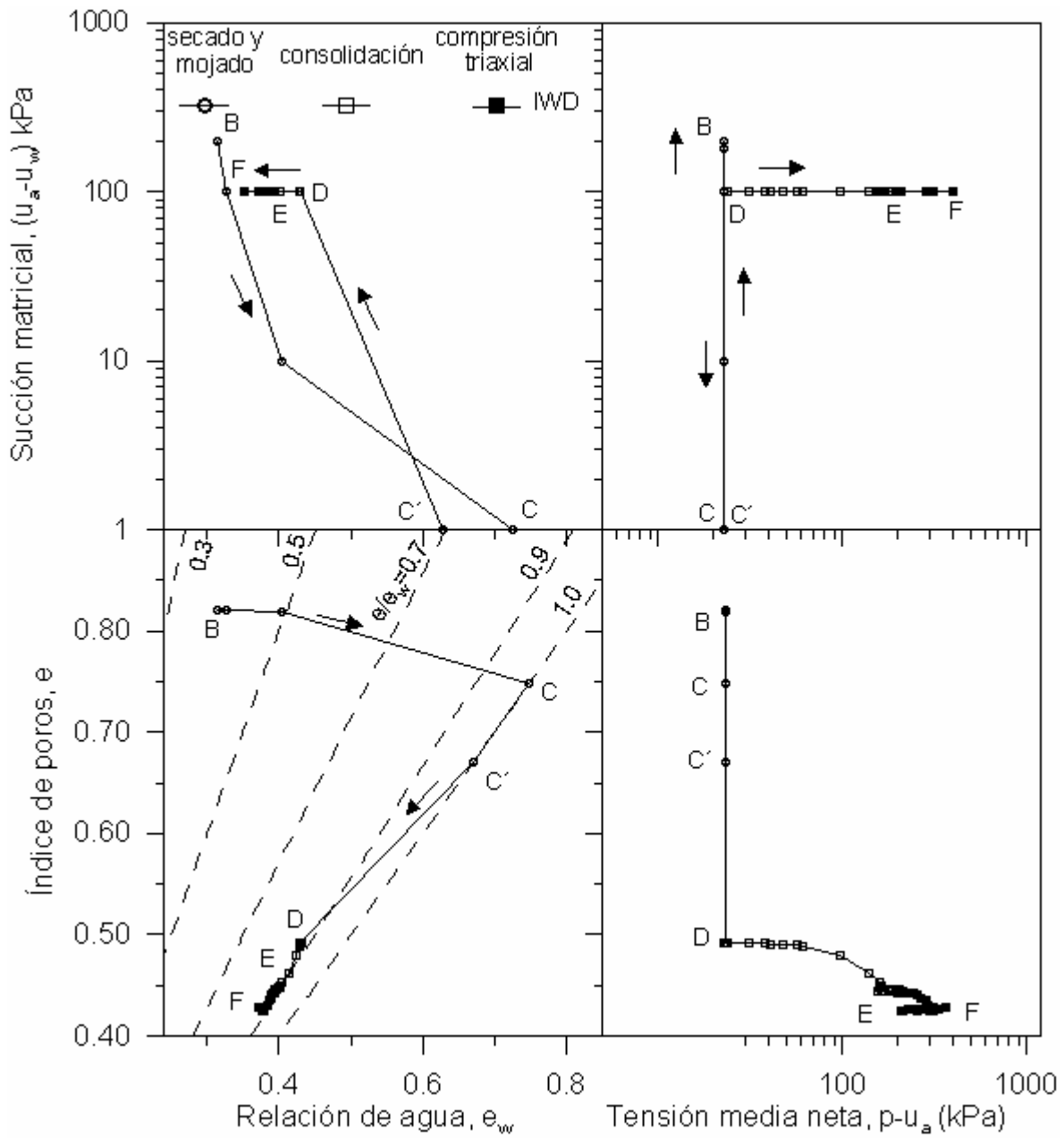


Figura 7.31 Resultados de la trayectoria total en el ensayo IWD. Resultados representados en los planos $\log(p-u_a)$ - $\log(s)$, $\log(p-u_a)$ - e , $\log(s)$ - e_w y e - e_w .

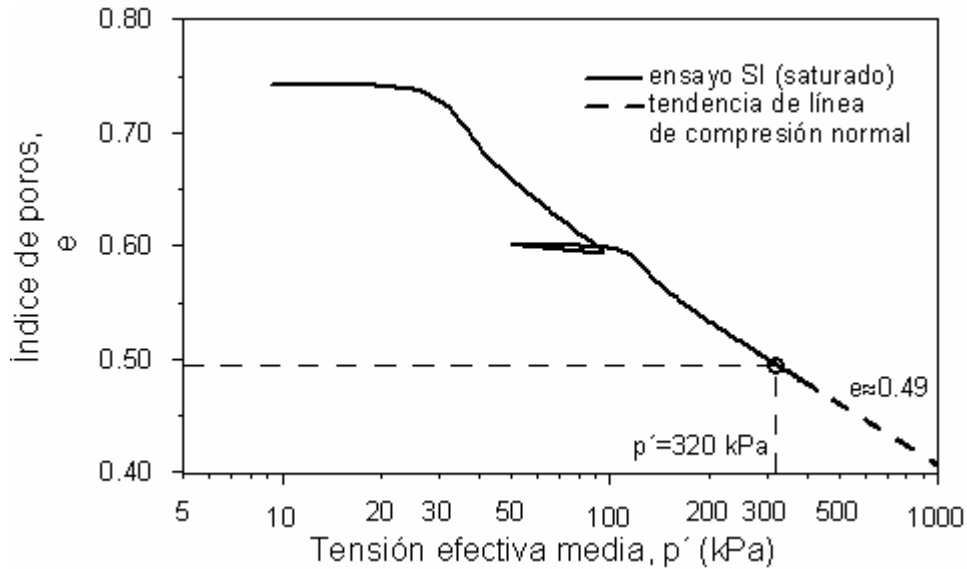


Figura 7.32 Ubicación del estado de tensiones $p' = 460$ kPa en la curva de compresión isotrópica de la muestra saturada (ensayo SI2).

Tabla 7.2 Condiciones iniciales y finales en la etapa de consolidación isotrópica, bajo succión matricial constante de 100 kPa, en el ensayo IWD.

Ensayo	Final de etapa de equilibrio					Final de etapa de consolidación isotrópica				
	e	e_w ($w_0, \%$)	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
IWD	0.492	0.429 (15.8)	87.2	23	100	0.446	0.393 (14.5)	88.1	200	100

Los comportamientos diferentes (a pesar de realizarse a la misma succión matricial y $p-u_a$ inicial) pueden atribuirse al menor índice de poros inicial y mayor grado de saturación que se produce en IWD durante la trayectoria previa. Dentro del contexto de los modelos elastoplásticos, la densificación de un suelo, causada por deformaciones permanentes durante la aplicación de una trayectoria de tensiones, genera el movimiento de la superficie de fluencia, con un aumento de la presión de preconsolidación. Por lo tanto, es de esperarse que el ensayo IWD, que tiene deformaciones permanentes durante el ciclo de mojado-secado, presente una tensión de fluencia mayor a la del ensayo I2 (que es de 108 kPa), y una mayor rigidez. Aunque la gráfica $\log p-u_a-\varepsilon_v$ presenta cierta curvatura, esta es muy pequeña con la que presenta el ensayo I2, lo que sugiere que es posible que la tensión de fluencia no sea alcanzada durante la consolidación isotrópica en IWD. Esto mismo hace que no sea posible observar la influencia del grado de saturación sobre la rigidez de la muestra. Los resultados son consistentes con la teoría elástoplástica.

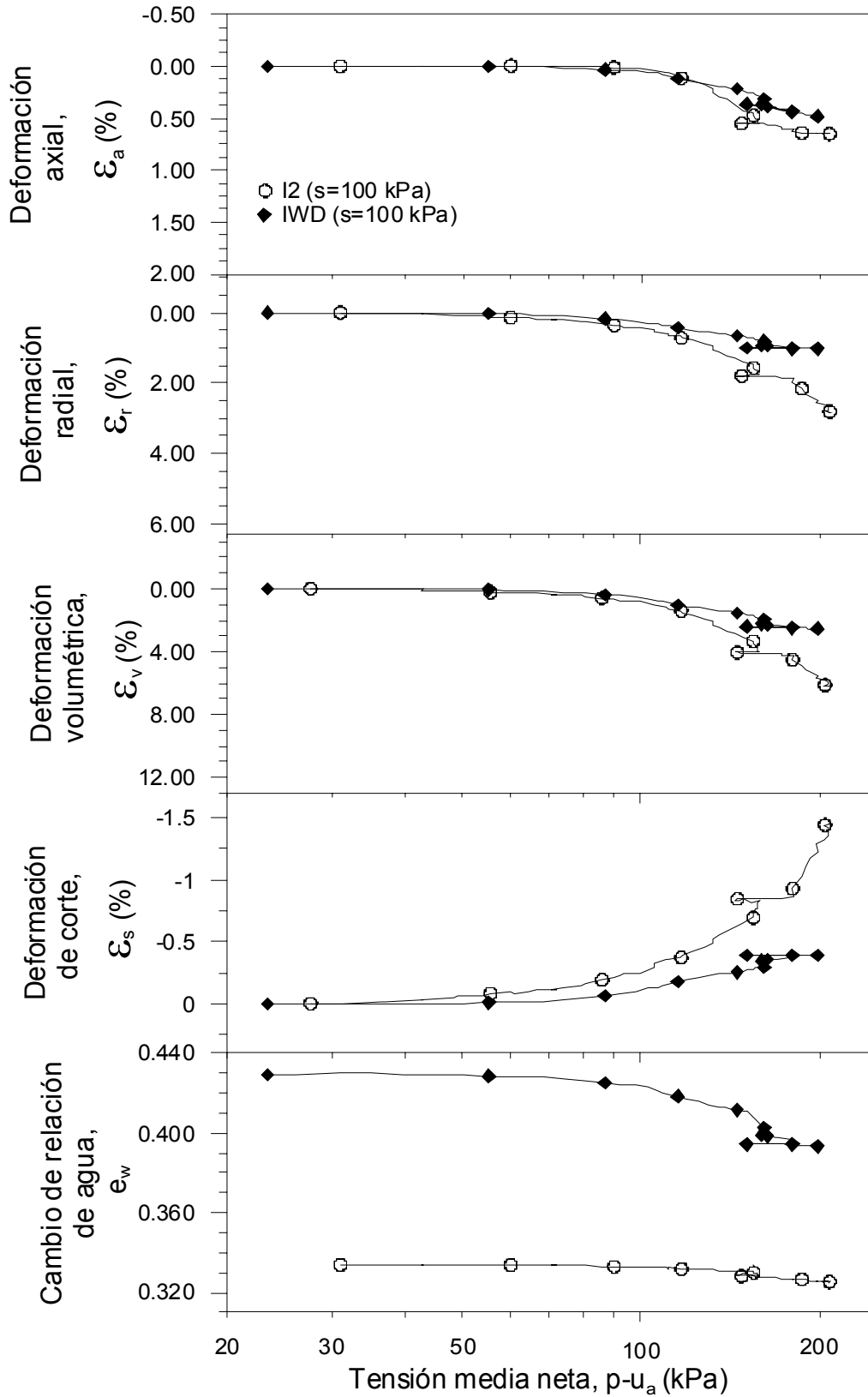


Figura 7.33 Resultados de las trayectorias de consolidación isotrópica de los ensayos I2 e IWD.

En la figura 7.34 se observa que, consistente con lo descrito en el apartado 7.3.1, las medidas globales de deformación volumétrica y grado de saturación divergen de las deformaciones estimadas con medidas locales. En este caso tal divergencia se presenta desde el inicio, causado por las grandes deformaciones generadas durante la trayectoria previa de tensiones, que desvían a la muestra de su forma cilíndrica. Tal como se mencionó anteriormente, se sugiere seleccionar la medidas global como la más representativa del comportamiento de la muestra en este equipo triaxial. Por lo tanto, se considera que se da un comportamiento de cambio volumétrico contractante, y el grado de saturación es incrementado, hasta casi alcanzar el 100%, durante la compresión triaxial. Al igual que en otros ensayos, no se lograron obtener los perfiles de la muestra después de la falla ($\epsilon_a=8.1\%$), debido a la existencia de importantes arrugas en la membrana y la caída de pintura. Sin embargo, el índice de poros estimado con la última medida global obtenida ($e=0.377$ en $\epsilon_a =5.4\%$) es consistente con el estimado con base a las medidas efectuadas directamente sobre la muestra al finalizar el ensayo (véase la cruz en la Figura 7.34; estimado con base a $e=0.357$ en $\epsilon_a =17.5\%$); lo que confirma el comportamiento contractante de la muestra. En la gráfica $q-\epsilon_a$ se observa la presencia de un aparente estado crítico, sin la presencia de reblandecimiento de la muestra. En la Tabla 7.3 se presenta la condición final de la muestra en la etapa de compresión triaxial, medidos después de desmontada del triaxial, bajo succión matricial constante de 100 kPa, en el ensayo IWD.

Tabla 7.3 Condición final de la etapa de compresión triaxial, bajo succión matricial constante de 100 kPa, en el ensayo IWD.

Ensayo	Final de etapa de corte				
	e	e_w (w,%)	Sr (%)	q_{max} kPa	u_a-u_w kPa
IWD	0.357*	0.352* (13.0)	98.4*	620	100

* medidos después de desmontada la muestra del triaxial

En la figura 7.35 se comparan los resultados de las trayectorias de compresión triaxial de los ensayos I2 e IWD. En el plano $q-\epsilon_a$ se observa que el estado crítico aparente que se presenta en IWD (con $q=620$ kPa en $\epsilon_a=8.1\%$) no coincide con el observado en I2 (con $q=501$ kPa en $\epsilon_a=17.5\%$), a pesar de seguir la misma trayectoria de tensiones. Puede sugerirse que en el ensayo IWD la compresión triaxial se aplicó sobre una muestra inicialmente sobreconsolidada, donde se llegó a una tensión de corte máxima pero no se presentó el reblandecimiento de la muestra debido

a que el ensayo se realizó con control de tensiones. En los ensayos triaxiales con control de tensiones no puede ser confirmada la existencia del estado crítico, debido a que los picos en las curvas tensión-deformación pueden ser ocultados (fallando la muestra cuando se alcanza la tensión máxima). El resultado es consistente con los modelos de comportamiento elastoplástico, y lo descrito en las etapas de secado y consolidación del ensayo IWD, donde la aplicación de la traslación de ejes sobre la muestra saturada generó grandes deformaciones permanentes, desplazando de manera importante la tensión de fluencia, y que no fue alcanzada durante la consolidación isótropa. La curva $q-\varepsilon_a$ de IWD es propia de ensayos sobre muestras sobreconsolidadas. Por otra parte, la compresión triaxial sobre el ensayo I2 se realizó sobre una muestra normalmente consolidada.

En ambos casos se presenta un comportamiento contractante de la muestra (plano $q-\varepsilon_a$ de la Figura 7.35), que siguen caminos semejantes, pero con una mayor deformación final en el ensayo I2 (en la Figura se presenta la medida realizada al finalizar el ensayo IWD). También, en ambos casos se produce la salida de agua pero se incrementa el grado de saturación, indicando un predominio en la reducción de volumen sobre el flujo de agua. El ensayo IWD presenta mayor salida de agua. La muestra en IWD tiende a alcanzar la saturación total (llega a $S_r=98.4\%$) a pesar de realizarse la compresión triaxial bajo una succión matricial de 100 kPa.

En la Figura 7.31 se muestra los resultados de la trayectoria total. Se observa que el mayor cambio en la reducción de vacíos se da en la trayectoria de secado (tramo C-D), donde la aplicación de la traslación de ejes sobre la muestra saturada generó grandes deformaciones plásticas. Durante la consolidación y compresión triaxial (tramos D-E y E-F), se producen significativamente menores reducciones de volumen que con la etapa anterior.

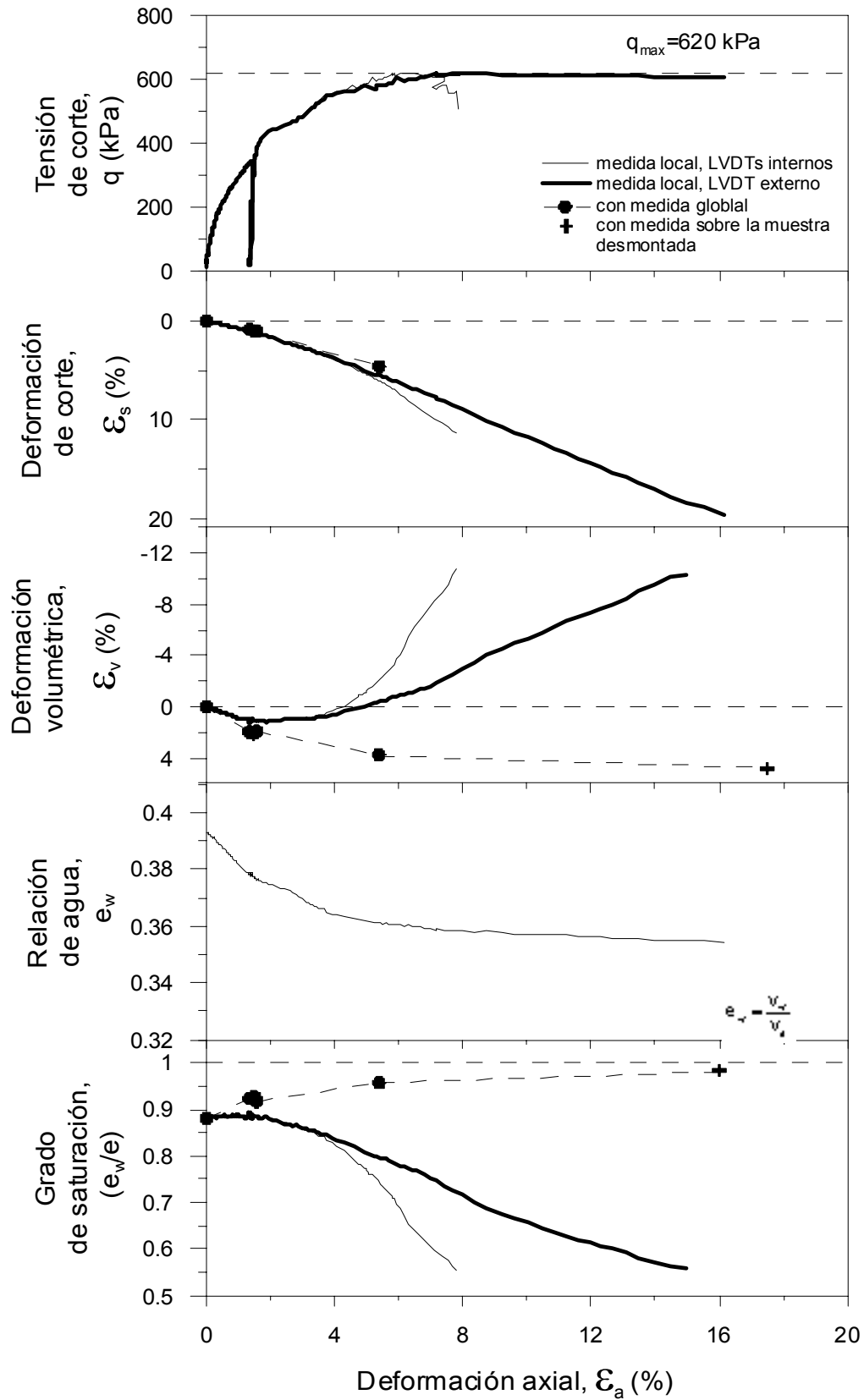


Figura 7.34 Resultados con medidas locales (con LVDTs internos y externos) y globales, de la trayectoria de compresión triaxial del ensayo IWD.

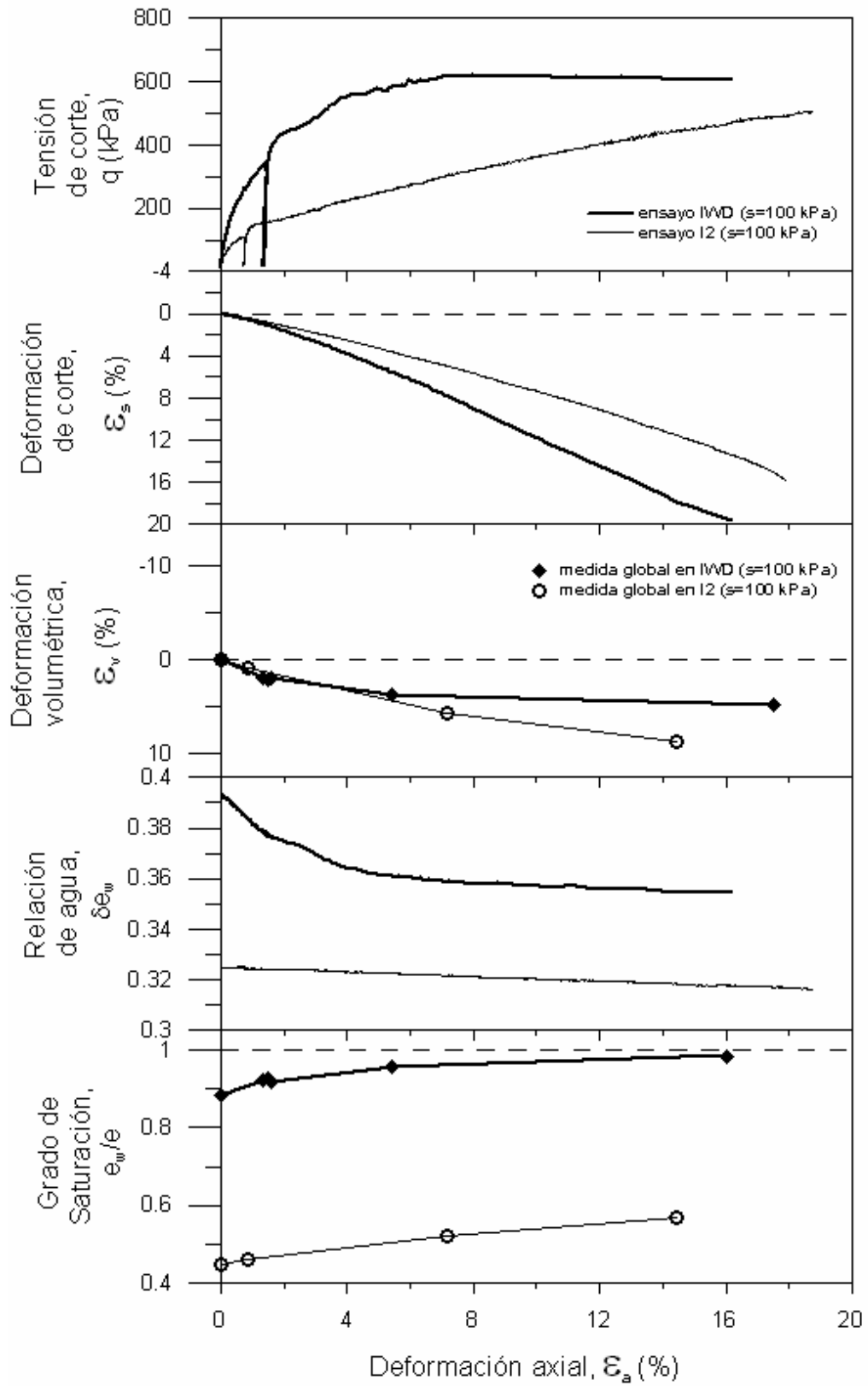


Figura 7.35 Resultados de las trayectorias de compresión triaxial de los ensayos I2 e IVD.

Durante la etapa de saturación, de $s=10$ a 0 kPa, se genera el mayor cambio en la relación de agua, pasando en forma transversal sobre las líneas de igual grado de saturación (véase tramo B-C en el plano $e-e_w$ de la Figura 7.31). Por lo contrario, en las etapas de consolidación y de compresión triaxial (tramos D-E y E-F), la trayectoria $e-e_w$ se mueve sobre, aproximadamente, la línea de $S_r=90\%$ de saturación, y al final de la compresión triaxial tiende a alcanzar la línea de saturación total. El comportamiento hidromecánico acoplado puede observarse mejor en la gráfica 7.36. Se observa, en detalle, una rigidez hidráulica en la zona de carga y descarga de la tensión de corte.

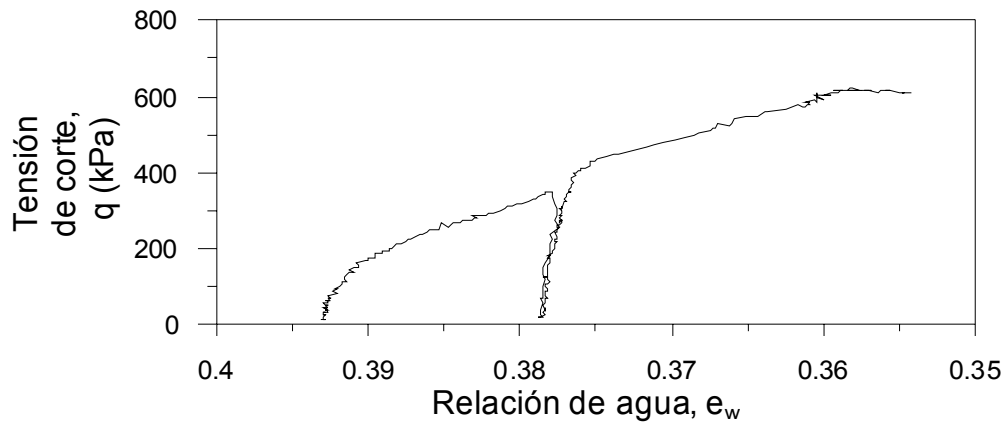


Figura 7.36 Gráfica de relación de agua, e_w , con tensión de corte, q .

7.3.5 Ensayo I3. Compresión triaxial bajo succión matricial de 10 kPa.

En el ensayo I3 la etapa de compresión triaxial con control de succión se realiza después de una etapa de compresión isotrópica. La trayectoria completa en el espacio $p-u_a-s-q$ se muestra en la Figura 5.1. La compresión triaxial (tramo C3-D3), con control de tensión, es llevada a cabo bajo una succión matricial constante de 10 kPa y una tensión radial (presión de confinamiento) inicial de 150 kPa, que corresponden a las condiciones finales de la consolidación isotrópica. Las trayectorias previas, de etapa de equilibrio y la consolidación isotrópica, son mostradas por los tramos A3-B3 y B3-C3, respectivamente.

Las Figuras 7.11 muestran los resultados de la compresión triaxial en el ensayo I3 (en los planos ε_a-q , $\varepsilon_a -\varepsilon_s$, $\varepsilon_a -\varepsilon_v$, $\varepsilon_a -e_w$ y $\varepsilon_a -S_r$). En la sección 7.3.1 se describieron los resultados con respecto a

diferencias entre las medidas locales y globales, estableciendo los criterios para estimar los cambios en las deformaciones y los criterios de falla. En esta parte se evalúan los resultados del comportamiento hidromecánico con base a los criterios establecidos.

La evolución de la curva tensión de corte con deformación axial (ε_a - q) crece en forma monótona, siguiendo una respuesta normalmente consolidada, sin presentar evidencia de un pico, y tendiendo a alcanzar el estado crítico al final. El estado crítico se alcanzó en una deformación axial de $\varepsilon_a=22\%$ (con medida local externa) y tensión de corte $q=340$ kPa. La muestra mostró una falla del tipo por abarrilamiento. Se distingue, en forma apreciable, un punto de fluencia notar al inicio del corte, en $q=60$ kPa ($p-u_a=170$ kPa), generando después deformaciones plásticas. Al igual que en el caso de ensayos no saturados I1, I2, A1 e IW, analizados anteriormente, el estado de tensiones se encuentran sobre la superficie de fluencia al iniciar la compresión triaxial y por lo tanto, no se debería generar ninguna tensión de fluencia (acorde al esquema de comportamiento elastoplástico). Este resultado sólo puede ser explicado, en un esquema de comportamiento elastoplástico, considerando la anisotropía del material inducida por la compactación de la muestra, que genera una superficie de fluencia inclinada en el plano $p-u_a-q$ (véase la Figura 7.37, donde se presenta un esquema “no experimental” de la superficie de fluencia sugerida, acompañada por la trayectoria de tensiones del ensayo). En el resto de ensayos, también se presentó este fenómeno pero fue menos apreciable considerándose, por simplicidad, que siguen un una respuesta normalmente consolidada.

La curvas ε_a - ε_v , de la Figura 7.11, muestran las medidas locales, con instrumentación externa, y las medidas globales. Por lo indicado en la sección 7.3.1, el análisis se realiza considerando las medidas locales en pequeñas deformaciones y medidas globales en grandes deformaciones. Se observa que se presenta un comportamiento contractante, donde el volumen de las muestras decrece en forma monótona durante toda la etapa de corte, tendiendo a alcanzar el estado crítico al final. En el ensayo I3, el estado de tensiones se encuentran sobre la superficie de fluencia al iniciar la compresión triaxial (durante la etapa de consolidación isotropa se alcanzó y desplazó la tensión de fluencia), por lo cual el comportamiento contractante observado, es consistentes con lo sugerido por el modelo de Alonso et al. (1990) para suelos no saturados normalmente consolidados.

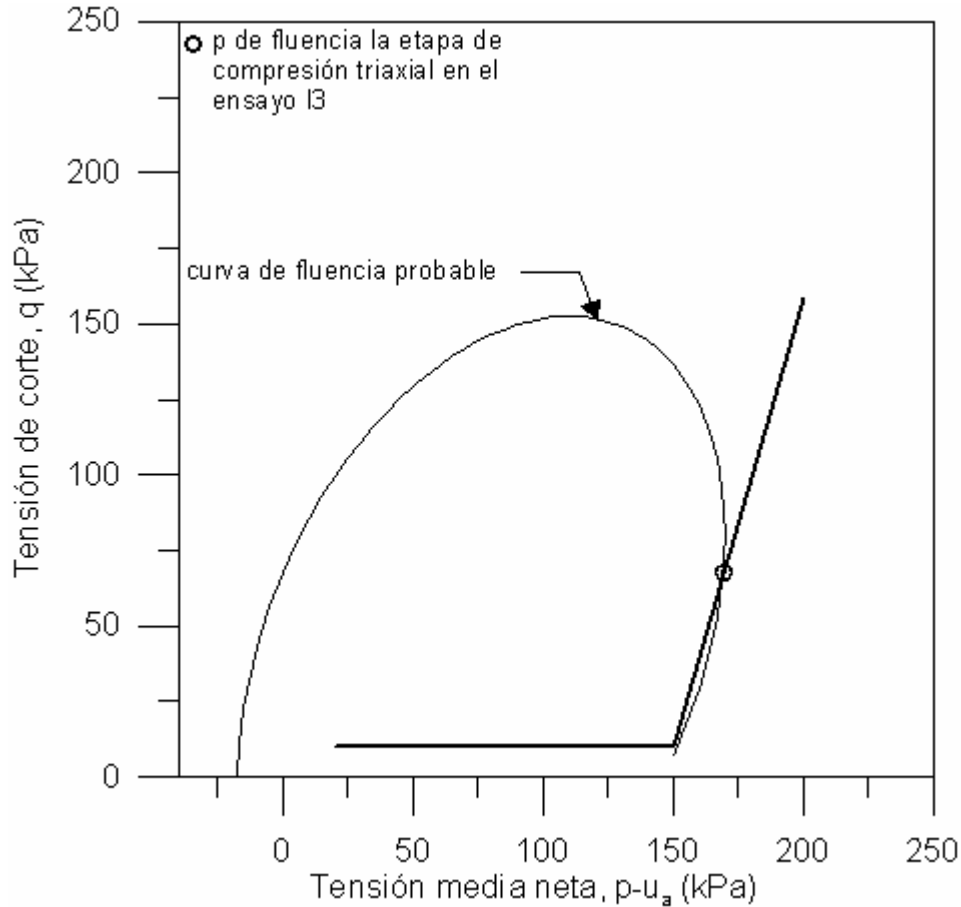


Figura 7.37 Resultados de la trayectoria total en el ensayo I3. Resultados representados en los planos $\log(p-u_a)-\log(s)$, $\log(p-u_a)-e$, $\log(s)-e_w$ y $e-e_w$.

La curva $\varepsilon_a - e_w$, de la Figura 7.11, muestra pequeños cambios de humedad en la muestra. Al inicio se genera la entrada de agua, siguiendo una salida de agua después de $\varepsilon_a=3\%$ pero con cambios casi despreciables, y finalmente se da una mayor salida de agua al superarse $\varepsilon_a=15\%$. Se observa en el plano $e_w - e$ de la Figura 7.37b (la etapa de compresión triaxial se presenta con resultados estimados con las medidas globales) que la entrada de agua detectada en el inicio de la compresión triaxial es consistente con la tendencia mostrada durante la etapa de consolidación isótropa. La descripción y análisis con base al modelo propuesto Vaunat et al. (2000), se presentó en el capítulo 6. Usando el mismo modelo, se deduce que llegará algún momento en que, sobre la succión matricial de 10 kPa, la curva de mojado principal deje de moverse hacia valores más altos de e_w , y cambie de tendencia con los cambios en el índice de poros (e incremento de grado de saturación), moviendo los límites de la zona posible hacia valores más bajos, con la generación de salida de humedad. Esto posiblemente ocurra en este ensayo entre índices de poros

(con medidas globales) de $e=0.514$ (ligado a un grado de saturación de $S_r=78.9\%$) y $e=0.481$ (con $S_r=84.2$). La salida de agua es bastante marcada en $e=0.459$ (con $S_r=87.8\%$). Durante la compresión triaxial el grado de saturación se incrementa hasta casi alcanzar un 90%, y disminuye a 86.1% después de la falla (donde se produce la descarga de tensiones y aumento del índice de poros, como se describió párrafos anteriores). El último valor graficado se estimó con las medidas realizadas directamente sobre la muestra después de desmontarla del equipo.

7.3.6 Ensayo AW.

En el ensayo AW la etapa de compresión triaxial con una succión de aproximadamente 0.4 kPa, aplicada con la técnica de columna negativa de agua, se realiza después de una etapa de mojado. En la Figura 7.38 se muestra la trayectoria completa. El ensayo AW está compuesto por tres etapas: consolidación anisótropa bajo una succión matricial de 100 kPa y una relación de tensiones $\eta = q/(p-u_a)=0.75$ (tramo B-C); una posterior etapa de mojado hasta cerca de una succión de 0 kPa, con la relación de tensión de corte ente presión media neta, $\eta = q/(p-u_a) = 0.75$, constante (tramo C-D); y finalmente la etapa de compresión triaxial bajo succión matricial y tensión radial constantes. La compresión triaxial (tramo D-E) es llevada a cabo bajo una tensión radial (presión de confinamiento) constante de 200 kPa y una succión matricial cercana de 0 kPa, con una tensión de corte inicial $q=150$ kPa.

Los resultados se presentan en la Figura 7.39. Este ensayo falló en el control de la tensión de corte, debido a que no se pudo realizar la corrección automática del área transversal de la muestra por las notorias arrugas de la membrana generadas por las deformaciones de la muestra durante las etapas de consolidación y mojado. Además, en este caso, el control de succión se realizó usando la técnica de columna negativa de agua, en un estado de tensiones: $s=u_a-u_w=10$ kPa; $(p-u_a)=200$ kPa; y q de 150; y como se describió en el capítulo 3, a menor tensión radial se incrementa el efecto de las arrugas sobre las medidas de desplazamiento radial. La corrección se realizó manualmente, aunque en esto también se tiene dificultades para ubicar los rayos del sensor láser en lugares apropiados (en la mitad de la muestra y donde las arrugas no interfieran).

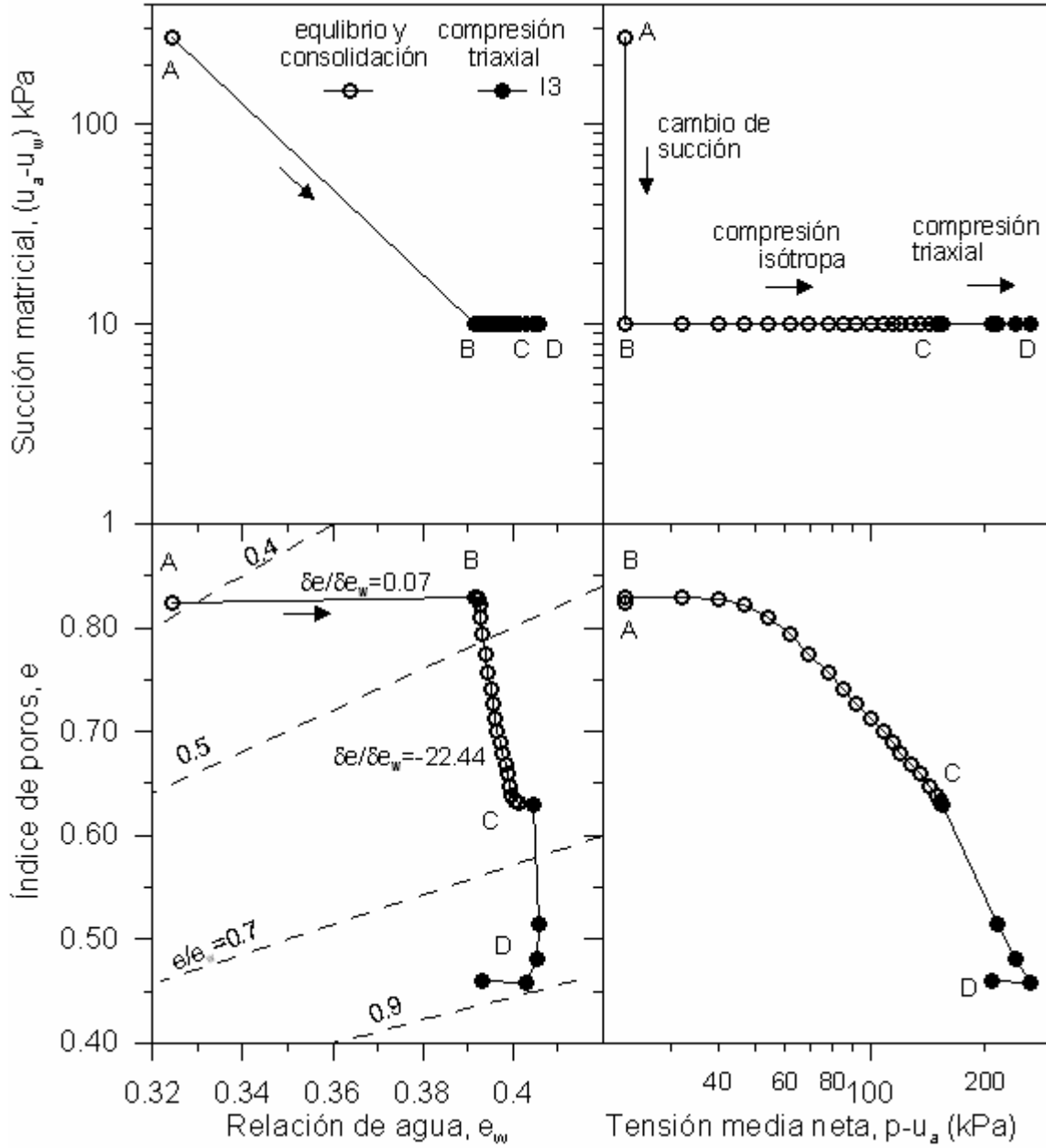


Figura 7.37b Resultados de la trayectoria total en el ensayo I3. Resultados representados en los planos $\log(p - u_a) - \log(s)$, $\log(p - u_a) - e$, $\log(s) - e_w$ y $e - e_w$.

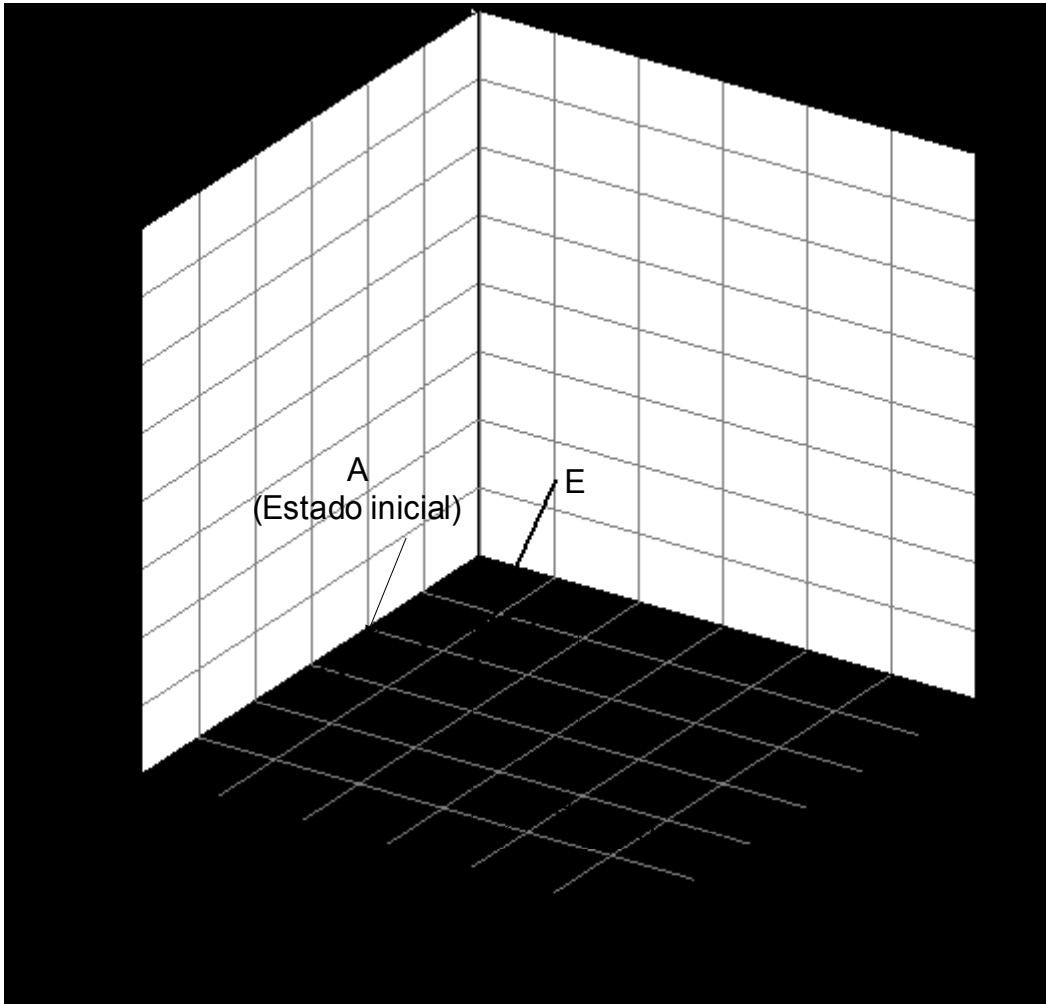


Figura 7.38 Trayectoria de tensiones del ensayo AW de consolidación anisótropa con relación $\eta=q/(p-u_a)$ constante y succión matricial constante de 100 kPa, posterior mojado con relación tensión media neta ($p-u_a$) y tensión de corte (q) constante, y compresión triaxial a tensión controlada en condiciones saturadas.

Lo anterior generó una atípica curva tensión de corte con deformación axial (ε_a-q). Al inicio presenta un comportamiento muy rígido, seguido un cambio repentino deformaciones axiales ante un incremento de la tensión de corte (generando grandes deformaciones axiales). Durante este cambio repentino, el área transversal en el centro de la muestra se incrementó, también, de manera repentina. Sin embargo, la corrección del área no puede ser realizada apropiadamente. En la gráfica se muestra la tensión de corte “no corregida”. Posteriormente se presenta una rigidización de la muestra. El incremento en la rigidez de la muestra podría haber sido generada por un estado de tensiones semejante al de la estabilización (descrita en el apartado anterior), donde se presentaron deformaciones sin incremento importante de tensiones, y sin llegar a fallar

la muestra. Y al final tiende a alcanzar el estado crítico. La corrección de la tensión de corte al final del ensayo, después alcanzar el estado crítico, se estima con la medida directamente sobre la muestra.

Las medidas globales representan mejor el comportamiento $\varepsilon_a - \varepsilon_v$, y son consistentes con la medida realizada directamente sobre la muestra, al finalizar el ensayo. Para minimizar los errores causados por las arrugas, en la obtención de perfiles, se filtraron los datos. La curva $\varepsilon_a - \varepsilon_v$, de la Figura 7.39, realizada con medida local, no puede ser considerada representativa del comportamiento real de la muestra, debido a las arrugas y los movimientos realizados al sensor para evitar éstas.

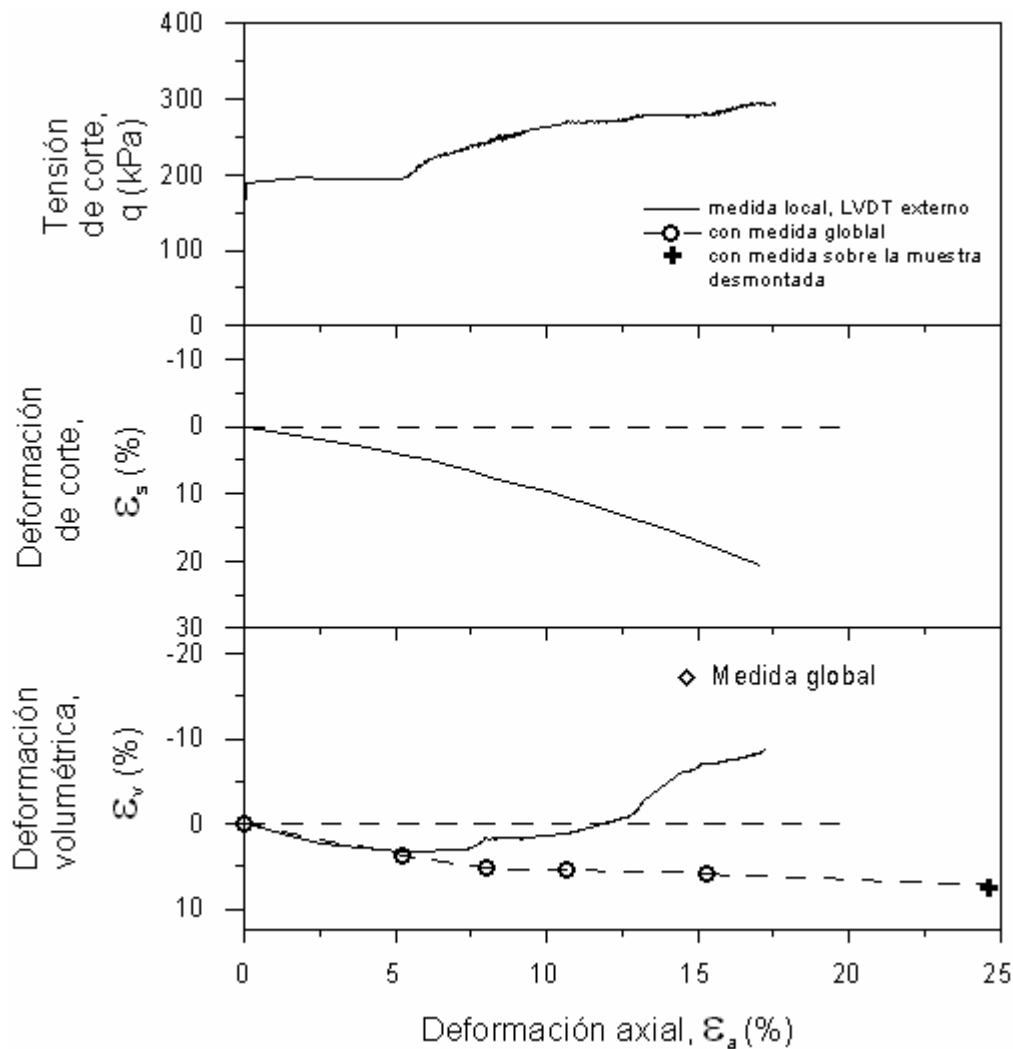


Figura 7.39 Resultados de las trayectorias de compresión triaxial del ensayo AW.

En la Figura 7.39 no se presentan los resultados de las curvas $\varepsilon_a - e_w$, ya que se presentó la salida de burbujas de aire de la muestra hacia el sistema de buretas. Esto generó movimientos muy irregulares en las medidas de agua. Por lo tanto, solo se estimó el valor final del volumen del agua de manera directa al final del ensayo (por secado). Las burbujas de aire son causadas por la forma en que se controló la succión. Para lograr una mayor saturación en el último escalón de mojado, se conectó la botella al anillo metálico del pedestal. Por lo cual, al aplicar la compresión triaxial, se presentó la salida de aire a través del sistema de medida de agua. En el ensayo IW se cerró el anillo metálico del pedestal para evitar este problema.

7.3.7 Medidas finales.

Al finalizar el ensayo la muestra se saca del pedestal, se mide (altura y diámetro) y pesa inmediatamente después de ser retirada la membrana. Después, la muestra se coloca en el horno por tres días y, finalmente, se pesa para obtener su peso seco. El peso húmedo final y el peso seco de la muestra se han usado para evaluar los cambios de contenido de agua medidos durante el ensayo. Los resultados se presentan en la Tabla 7.4. El promedio de las diferencias (en valores absolutos) es de 0.21%. Se alcanzó una mejor precisión que la obtenida por Barrera (2002) (error promedio, en valores absolutos de 0.30%) en un triaxial similar pero sin un sistema de adquisición automatizada de cambios de humedad. En el ensayo IWD se perdió la medida real de entrada de agua durante la saturación, por lo que se estimaron las medidas posteriores a la saturación con base a la medida final obtenida por secado al horno. En los ensayos I2 e IWD la muestra se seccionó en tres partes para conocer la distribución de humedad dentro de ella (véase la Figura 7.39b). En el primer caso, se obtuvieron los siguientes contenidos de agua: $w=11.8\%$ en el cabezal, 12.1% en el centro y 12.2% en la base; en IWD se midieron: $w=12.7\%$ en el cabezal, 13.0% en el centro y 13.2% en la base. El promedio de los tres valores, para cada ensayo, se presenta en la Tabla 7.4.

Debido a la forma “no cilíndrica” que tiene la muestra después de fallar, se realizaron las medidas del diámetro en distintas alturas. En la Figura 7.39b se muestran los ensayos I2, I3, A1 e IW al finalizar la compresión triaxial. En los ensayos que presentan cambios súbitos al alcanzar el estado crítico se observa un notable abombamiento (véase los ensayos I3 e IW en la Figura 7.39b), y menos notorios que cuando el estado crítico (en el plano $\varepsilon_a - q$) es incipiente (véase los

ensayos I2 y A1, en $s=100$ kPa, en la Figura 7.39b). Se tienen diámetros de 4.10cm en el extremo superior y de 4.90 cm en el centro en I3 (y de 4.93cm en centro de IW), mientras que son de de 3.72cm en el extremo superior y de 4.01cm en el centro para I2 (y 4.12cmn el centro de A1).

Tabla 7.4 Valores del contenido de humedad al final del ensayo.

Ensayo	w(%)	w(%)
	(secado al horno)	(sistema de buretas)
I1	10.28	10.08
I2	12.0	11.77
I3	14.60	14.51
A1	11.95	11.83
AW	15.10	---
IW	15.54	15.94
IWD	12.97*	12.97*

* se estimaron las medidas posteriores a la saturación con base a la medida final obtenida

El número de medidas depende que tan abombada esté la muestra (entre 9 y 5 medidas). Con base a estas medidas y la altura obtenida, se realizó la estimación del volumen final de la muestra. También se realiza la estimación del grado de saturación, usando el volumen estimado y el contenido de humedad obtenido por secado. Debido a la dificultad de obtener el volumen de las partes seccionadas, cortadas en los ensayos I2 e IWD (no son uniformes), se usa el contenido de agua promedio y el volumen total para estimar el grado de saturación global. Los resultados de índice de poros y grado de saturación estimados, con base a las medidas finales, se presentan en la Tabla 7.5. También, se presentan las últimas medidas globales obtenidas en el triaxial.

Tabla 7.5 Valores del índice de poros y grado de saturación al final del ensayo (último resultado de medida global y el medido en la muestra al final del ensayo).

Ensayo	$u_a - u_w$ kPa	q_{max} kPa	Último resultado global en la etapa de corte			Medido en la muestra al final del ensayo		
			ϵ_a (%)	e	Sr_0 (%)	ϵ_{afinal} (%)	e	Sr (%)
I1	600	1539	22.1	0.490	55.8	22.1	0.478	58.3
I2	100	501	14.4*	0.562*	56.8*	19.3	0.512	63.2
I3	10	343	19.9*	0.459*	74.1	36.2	0.460	86.1
A1	100	918	22.2	0.432	74.3	22.2	0.416	77.9
AW	1	303	15.31	0.515*	---	24.6	0.415	98.5
IW	1	I	5.6*	0.484*	89.4*	14.2	0.455	90.6
IWD	100	620	5.4*	0.377*	95.7*	17.5	0.357	98.4

* las arrugas de la membrana y/o caída de la pintura impidieron la obtención de perfiles de la muestra en valores más altos de ϵ_a .

Sólo en los ensayos I1 e A1 fué posible obtener los perfiles de la muestra después de la falla. Las medidas globales en el triaxial son consistentes con los resultados obtenidos directamente sobre el espécimen; aún con la dificultad para poder estimar en forma precisa el volumen final con medidas directas, y la imposibilidad de obtener, en algunos ensayos, los perfiles de la muestra después de la falla (véase la Tabla 7.5).

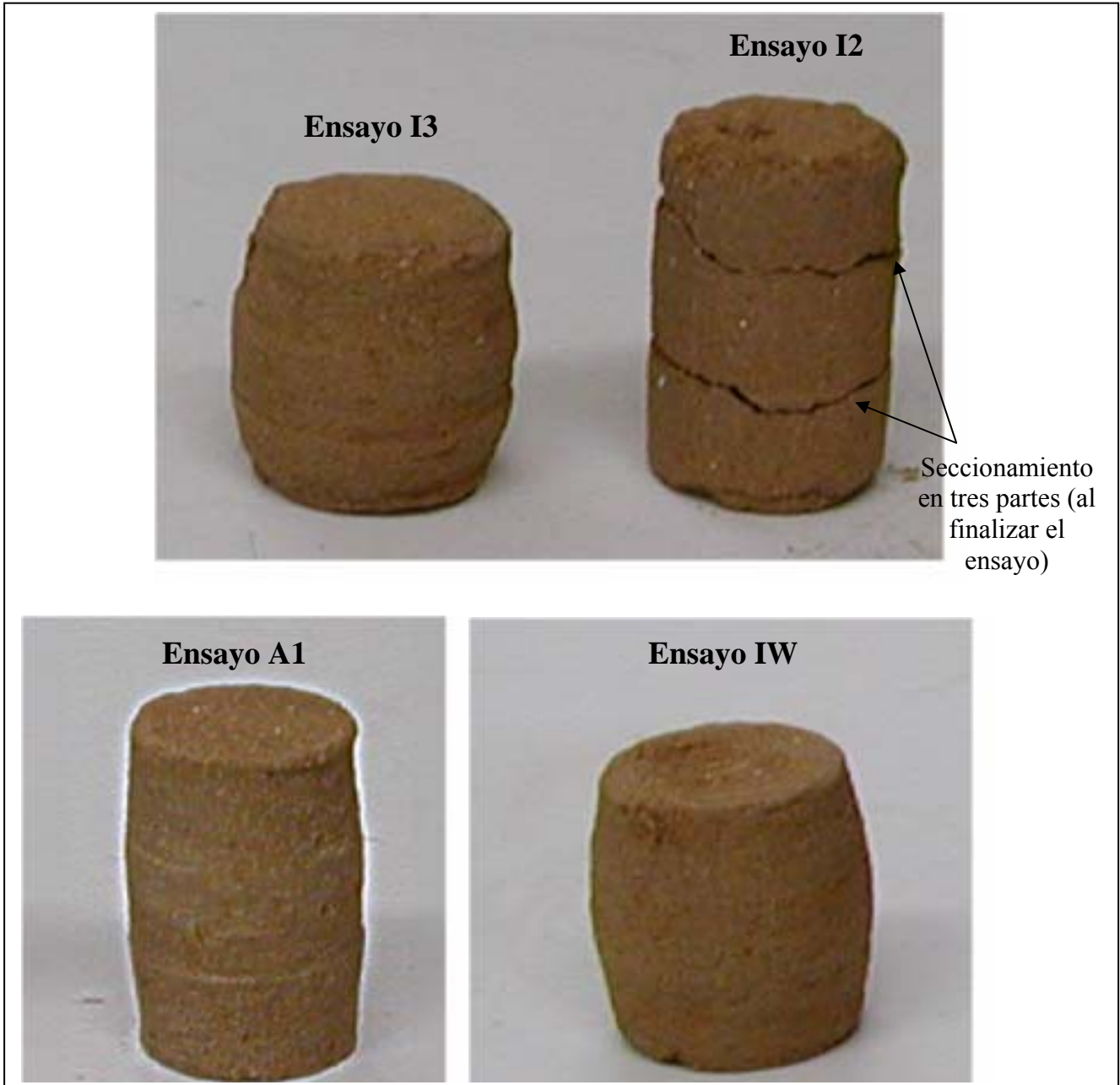


Figura 7.39b Muestras de los ensayos I2, I3, A1 e IW al finalizar la compresión triaxial. La muestra I2 fue seccionada en tres partes después de ser desmontada del equipo triaxial.

7.4 Líneas de estado crítico

En la terminación de cada ensayo, las variables q y e llegan o tienden a estabilizarse, sugiriendo que se alcanza un estado crítico. En el caso del ensayo I2, se observa ligeramente la tendencia a estabilizarse de q (deteniéndose el ensayo al presentarse las primeras evidencias de ello), pero no se puede observar la tendencia de e al final del ensayo (al no obtenerse las medidas globales de volumen después de una deformación axial de 15 %). Sin embargo, en este caso se considera que también la variable e tiende a estabilizarse; y se usa, como valor de e en el estado crítico, el estimado con las medidas efectuadas sobre la muestra después de finalizar el ensayo.

En la Figura 7.40 se muestran los valores de estado crítico de todos los ensayos, tanto suelos saturados como no saturados, en el plano tensión de corte (q)- tensión media neta ($p-u_a$). También se muestran las líneas de estado crítico, aproximadas, obtenidas en el espacio tensión media neta-tensión de corte ($p-u_a-q$), para succiones de 0 y 100 kPa. Los puntos de la línea de estado crítico se obtuvieron del valor máximo alcanzado en el espacio (ε_a-q). En el ensayo IWD el máximo, probablemente represente un valor pico, fallando en bajas deformaciones, por lo tanto fue ignorado cuando se trazó la línea de mejor llenado en la figura.

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

$$q = M p + M k s \quad (7.1)$$

Donde M es la pendiente de la línea de estado crítico para suelos saturados, k es una constante y p es la tensión media neta ($p-u_a$). El efecto de la succión es representado $p_s=ks$, donde p_s es cohesión aparente y s es la succión matricial. Wheeler y Sivakumar (1995), modifican la ecuación (7.1) a partir de datos experimentales por la expresión siguiente:

$$q = M(s) p + \mu(s) \quad (7.2)$$

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

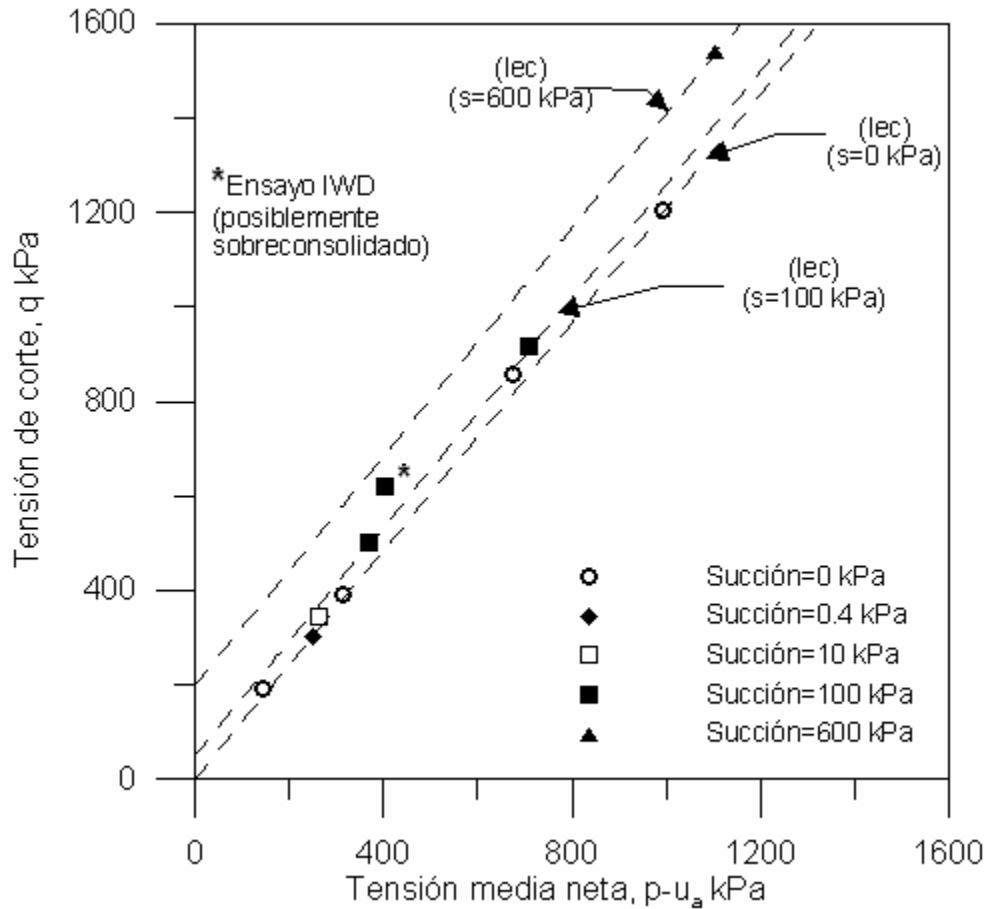


Figura 7.40 Valores de estado crítico para suelos saturados y no saturados, en el plano tensión de corte (q)- tensión media efectiva (p'). Todos los ensayos.

En la Figura 7.40, las líneas de estado crítico de muestras saturadas y con succión matricial de 100 kPa parecen ser rectas y paralelas, y por lo tanto, sugieren que la pendiente M tiene el mismo valor. Por lo tanto, se puede concluir, de estos ensayos, que el valor de M no depende de la succión, lo que corresponde a un ángulo de fricción constante. Este patrón de comportamiento es consistente con el modelo de estado crítico propuesto por Alonso, et al. (1990); y con Wheeler y Sivakumar (1995), Rampino et al. (1999) y Wang et al. (2002).

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

$$M (s= 0 \text{ kPa}) = 1.20;$$

$$M (s= 100 \text{ kPa}) = 1.21; \mu (s= 100 \text{ kPa}) = 37 \text{ kPa}$$

El ángulo de fricción (ϕ') fue obtenido de la expresión (7.3), partiendo de que el valor de M es constante, obteniendo un valor del ángulo de fricción de $\phi' = 30^\circ$.

$$\text{sen}\phi' = \frac{3M}{6+M} \quad (7.3)$$

El valor de los parámetros obtenidos por Barrera (2002), con el mismo suelo pero iniciando con mayor densidad de la muestra son:

$$M (s= 800 \text{ kPa}) = 1.154; \mu (s= 800 \text{ kPa}) = 390 \text{ kPa}; \phi' = 28.94^\circ.$$

No se pueden obtener líneas de estado crítico experimentales para $s=10$ kPa y 600 kPa, por que sólo se tiene un valor para cada uno. Sin embargo, en la Figura 7.40 se observa que los lugares que ocupan tales valores, en el espacio ($p-u_a-q$), son consistentes con el comportamiento esperado según el modelo de estado crítico propuesto por Alonso, et al. (1990). Aunque, sólo se tiene un valor de estado crítico, se trazó una probable línea de estado crítico para una succión matricial de 600 kPa, considerando que el valor de M no cambia (se presenta en la Tabla 7.6). El valor de estado crítico del ensayo AW, con la compresión axial bajo una succión cercana a cero (0.4 kPa), es consistente con la línea de estado crítico estimada para los ensayos saturados.

Los valores de p_s obtenidos, con base a las líneas de estado crítico experimentales o estimadas, se muestran en la Tabla 7.6 y la Figura 7.41. Se observa que la relación entre la succión matricial y p_s no es lineal. La mayor pendiente se presenta de $s=0$ kPa a 10 kPa. Esta relación, apartada a la linealidad, no es consistente con el modelo de Alonso et al. (1990). La línea recta que presenta el mejor llenado de datos y que pasa por el origen es $k=0.246$, el cual fue usado para interpolar los valores de p_s dentro del rango de succiones estudiada (cuando sea necesario).

Tabla 7.6 Valores de la cohesión aparente, p_s .

Succión matricial, s (kPa)	p_s (kPa)
0	0
10	17
100	30
600	146

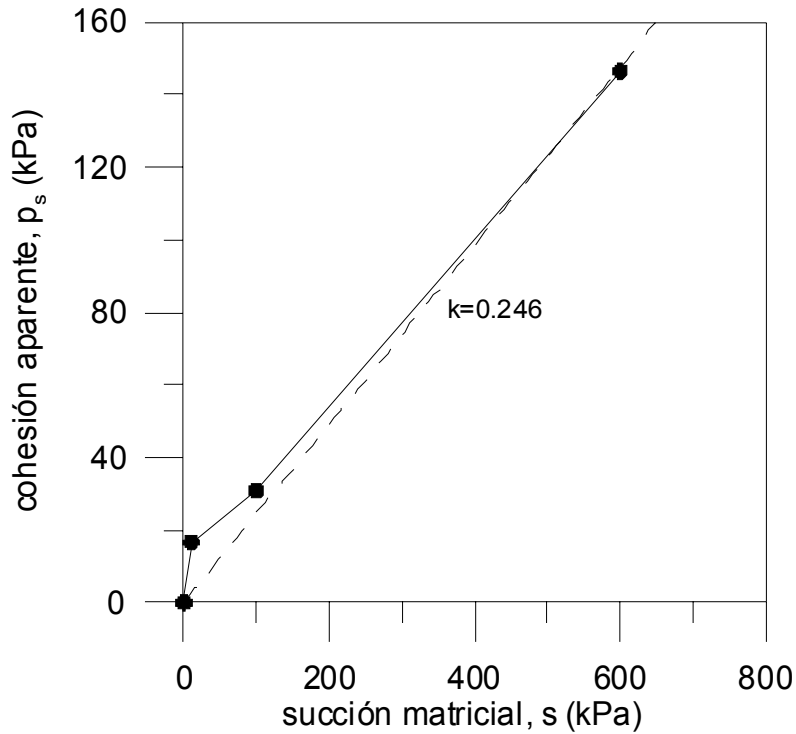


Figura 7.41 Valores de la cohesión aparente, p_s , con la succión matricial.

El comportamiento de corte en el estado crítico en suelos no saturados es semejante al observado en suelos saturados. La línea de estado crítico del suelo no saturado, correspondiente a una succión matricial de $s=100$ kPa, es paralela a la línea de estado crítico del suelo saturado en el plano ($p-u_a-q$).

Puede concluirse, que las diversas historias de tensiones seguidas en los ensayos, aparentemente, no afectan las relaciones de estado crítico. Esto sugiere que las diferencias causadas por las trayectorias ejecutadas (percibidas, en las etapas de consolidación, mojado y compresión triaxial, con las relaciones $\delta\varepsilon_v/\delta\varepsilon_s$ y $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$) sobre la fábrica inicial (aparentemente anisótropa) se borra por corte hasta un estado crítico. Esto es consistente con lo observado por Wheeler et al. (2000), donde las relaciones de estado crítico aparentemente no se ven afectadas por las diferentes presiones de compactación iniciales y diferentes trayectorias de corte triaxial. Por lo general, se considera que durante el estado crítico la fábrica del suelo es continuamente destruido.

El estado final de las muestras en los ensayos de compresión triaxial también puede ser representado en el espacio volumen específico y tensión media neta ($v-p$). Donde el volumen

específico es $v=1+e$ (e , es el índice de poros). Esta línea de estado crítico que varía con la succión esta definida por la siguiente expresión (Wheeler y Sivakumar, 1995):

$$v = \Gamma(s) - \psi(s) \ln \left(\frac{p}{p_{at}} \right) \quad (7.4)$$

Donde $\psi(s)$ es la pendiente y $\Gamma(s)$ el intercepto de la línea de estado crítico en función de la succión.

En la Figura 7.42 se presentan los valores de estado crítico de índice de poros, e , con la tensión media neta ($e-p-u_a$), de las muestras no saturadas. Los valores usados corresponden a los estimados con base a las medidas efectuadas directamente sobre la muestra después de finalizar el ensayo. Solamente en el caso de $s=100$ kPa fué posible obtener una línea de estado crítico, pero al tener solamente dos valores, no se puede concluir si la relación es verdaderamente lineal. Para el resto de ensayos no saturados, no se pueden obtener líneas de estado crítico. Wheeler y Sivakumar (1995) observaron evidencias de curvatura en línea de estado crítico de suelos no saturados.

En la misma figura se presentan la línea de estado crítico (lec), así como la línea de compresión normal (lcn), en el plano $e-\log(p-u_a)$, para los ensayos bajo una succión $s=100$ kPa y en muestras saturadas ($s=0$). La estimación de las líneas para en muestras saturadas fue descrita en la sección 7.2 y mostradas en la Figura 7.9. Para $s=100$ kPa, la línea lcn es cercanamente paralela a la línea lec , de forma semejante a lo observado en muestras saturadas. Esto difiere de lo presentado por Wheeler y Sivakumar (1995).

Se observa, también, que la pendiente de la línea de estado crítico y la línea de compresión normal de las muestras saturadas presentan un menor pendiente que las correspondientes para $s=100$ kPa; y ambas líneas, aparentemente, tienden a converger en valores muy altos de $(p-u_a)$. Es decir, el paralelismo de las líneas de estado crítico del suelos en $s=100$ kPa con la línea de estado crítico del suelo saturado, observado en el plano $(p-u_a -q)$, no se presento en el plano $(e-p-u_a)$. Esto es consistente con lo observado en Wheeler y Sivakumar (1995), pero difiere a lo presentado por Wang et al. (2002) (donde se reporta un cercano paralelismo entre las lec para suelos saturados y para parcialmente saturados, en el plano $e-\log(p-u_a)$).

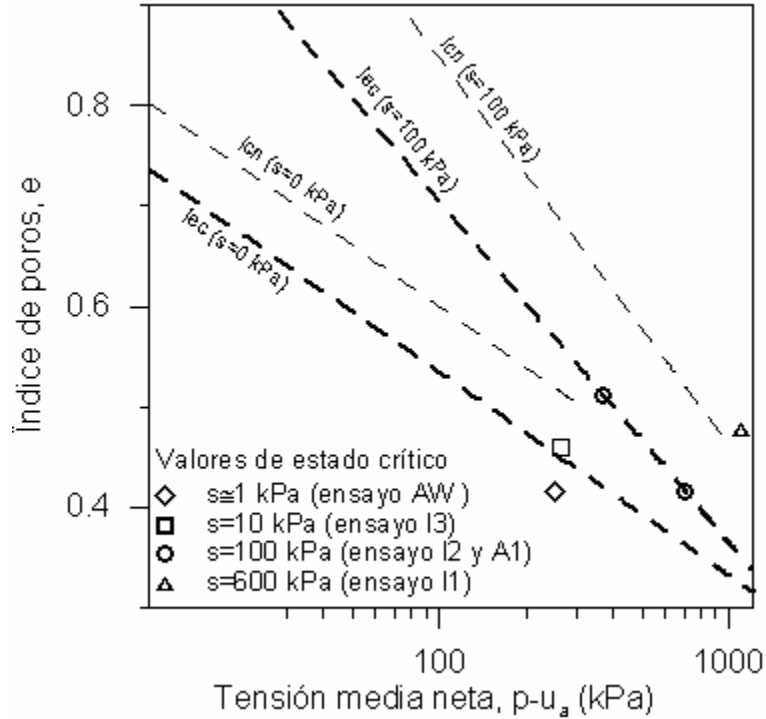


Figura 7.42 Valores de estado crítico para suelos no saturados, en el plano índice de poros, e , con la tensión media neta ($e-p-u_a$).

Por otra parte, la muestra ensayada bajo una succión cercana a $s=1$ kPa, presenta un valor de estado crítico cercano a la lec para suelos saturados. Los valores obtenidos de la pendiente $\psi(s)$ fueron:

$$\psi(s=100) = -0.148 \qquad \psi(s=0) = -0.088$$

El valor de los parámetros obtenidos por Barrera (2002), con el mismo suelo pero con menor porcentaje de arena e iniciando con mayor densidad de la muestra, son:

$$\psi(s=800) = -0.18 \qquad \psi(s=0) = -0.058$$

La línea de compresibilidad normal para una succión matricial de $s=100$ kPa (ensayo I2) se presenta en la Figura 7.42. Se evidencia el paralelismo entre la línea de estado crítico ($\psi(s=100)=-0.148$) con la línea de compresibilidad normal ($\lambda(s=100)=-0.15$).

En las Figuras 7.43a) y 7.43b) se presenta la evolución la dirección de incremento de deformación plástica $\delta\varepsilon_v/\delta\varepsilon_s$ y $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ respectivamente, como una función de la relación $\eta=q/(p-u_a)$ ó $\eta=q/p'$, obtenidos de los ensayos SI1 e I2. En ambos ensayos, la etapa de compresión triaxial inicia en $p-u_a=200$ kPa, pero efectuados con $s=0$ kPa en SI1 y $s=100$ kPa en I2. Para una mejor claridad se filtraron los datos experimentales.

Para determinar las deformaciones plásticas se consideran despreciables las deformaciones elásticas, que generalmente son mucho más pequeñas que la deformaciones plásticas (Cui et al., 1996), como ya se describió en el capítulo 6. Estas gráficas se acompañan con relaciones teóricas, basadas en la ecuación que corresponde a la regla de flujo asociada del modelo Cam Clay (ecuación 6.5 en el capítulo 6):

$$\frac{\partial\varepsilon_s^p}{\partial\varepsilon_v^p} = \frac{2\eta}{M^2 - \eta^2} \quad (7.5)$$

En este caso la relación η se vincula a los valores $\eta=q/(p-u_a)$ de los ensayos no saturados y a $\eta=q/p'$ de los saturados.

Sin embargo, en el capítulo 6 se mencionó que en el modelo presentado por Alonso et al. (1990), la regla de flujo asociada depende de la relación $\eta_s=q/(p-u_a+p_s)$ (ecuación 7.14 en el capítulo 6):

$$\frac{\partial\varepsilon_s^p}{\partial\varepsilon_v^p} = \frac{2\eta_s}{M^2 - \eta_s^2} \quad (7.6)$$

Por lo tanto, es conveniente representar la evolución la dirección de incremento de deformación plástica $\delta\varepsilon_v/\delta\varepsilon_s$ y $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ con la relación $\eta=q/(p-u_a+p_s)$. En estas gráficas, también, se filtraron los datos experimentales para tener una mayor claridad. Esta representación, de los resultados obtenidos de los ensayos SI1 e I2, se muestran en las Figuras 7.44a) y 7.44b).

Las gráficas teóricas, en este caso, están basadas en el modelo propuesto por Alonso et al. (1990). Los valores utilizados de p_s son tomados de la Tabla 7.6. Aunque en el capítulo 6 se sugirió que la superficie de fluencia inicial podría estar inclinada (siguiendo el modelo de Wheeler et al., 2003), no es posible saber si esto también ocurre al inicio de la etapa compresión triaxial, después de efectuarse las etapas de consolidación y mojado (por la influencia de la historia de tensiones). Debido a esto, en una primera aproximación los resultados se analizaron dentro de un contexto

elastoplástico de estado crítico desarrollado por Alonso et al. (1990). Se asume una regla de flujo asociada y una superficie de fluencia (simétrica / elíptica) para una succión constante, lo que representa un suelo de comportamiento isótropo.

Se observa que las evoluciones de los incrementos de deformación plástica presentan mayor concordancia con las teóricas que cuando se utiliza $\eta=q/(p-u_a+p_s)$ que cuando se usa $\eta=q/(p-u_a)$ (ó $\eta=q/p'$). Esto es consistente con el modelo de Alonso et al. (1990), donde la regla de flujo asociada depende de la relación $\eta_s=q/(p-u_a+p_s)$.

En las Figuras 7.45, 7.46, 7.47 y 7.48 se presentan la evolución de la dirección de incremento de deformación plástica $\delta\varepsilon_v/\delta\varepsilon_s$ (incisos a) y $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ (incisos b), vinculado a $\eta=q/(p-u_a+p_s)$, de los ensayos SI2, A1, SI3, I1, e I3. En todos los ensayos se observa que al cambiar el estado de tensiones a valores más grandes de $\eta=q/(p-u_a+p_s)$, se genera una reducción monótona de $\delta\varepsilon_v/\delta\varepsilon_s$ con los valores finales tendiendo a cero cuando se alcanza aproximadamente $\eta=M=1.2$. De igual forma, se observa un incremento progresivo de $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ tendiendo hacia infinito cuando $\eta=1.2$.

Al igual que en los ensayos saturados, para ensayos parcialmente saturados, no se graficaron datos en valores muy bajos y altos de η debido a que se dan relaciones muy fluctuantes debido a los pequeños errores en la medición de deformaciones muy pequeñas (son magnificados al obtener las relaciones). Para ensayos con control de succión, las relaciones $\delta\varepsilon_v/\delta\varepsilon_s$ y $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ se estiman usando medidas locales en la fase inicial de la compresión triaxial, hasta que tales medidas dejan de ser confiables (véase la sección 7.3.1). Estas medidas tienen la ventaja de ser adquiridas en forma continua, por lo que se puede obtener la evolución de $\delta\varepsilon_v/\delta\varepsilon_s$ y $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$. Para valores mayores de η , se usan las medidas globales, pero son obtenidas de forma más espaciada y son escasos en cada ensayo.

En las Figuras 7.44a) y 7.44b) se puede analizar los resultados de $\delta\varepsilon_v/\delta\varepsilon_s$ y $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ en etapas de compresión triaxial realizadas a distintas succiones matriciales ($s=0$ kPa en SI1 y $s=100$ kPa en I2), con la misma $p-u_a=200$ kPa inicial. La relación $\delta\varepsilon_v/\delta\varepsilon_s$ para $s=100$ kPa se encuentra arriba (y la relación $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$, abajo) de la dada en el ensayo saturado. La correlación con la curva teórica es

menor para $s=100$ kPa que para el ensayo saturado. En los ensayos bajo $s=0$ kPa (en SI2) y $s=100$ kPa (en A1) con $p-u_a=400$ kPa inicial, se observa concordancia entre sus evoluciones de $\delta\varepsilon_v/\delta\varepsilon_s$ y $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ (véase Figuras 7.45a) y 7.45b). Lo mismo ocurre en los ensayos bajo $s=0$ kPa (en SI3) y $s=600$ kPa (en I1) con $p-u_a=600$ kPa inicial, aunque no convergen en los valores más bajos de η (véase Figuras 7.46 a) y 7.46b). En estos últimos ensayos las relaciones $\delta\varepsilon_v/\delta\varepsilon_s$ y $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ experimentales tienen buena correlación con las teóricas. Para el ensayo I1 no se presentan los valores de $\delta\varepsilon_v/\delta\varepsilon_s$ y $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ estimados con medidas globales, debido a que presentan grandes fluctuaciones durante las fases de parado de carga y posterior recarga efectuados (descritos en sección 7.3.2).

En las Figuras 7.47a) y 7.47b) se puede analizar los resultados de $\delta\varepsilon_v/\delta\varepsilon_s$ y $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ en etapas de compresión triaxial realizadas bajo una succión matricial de 100 kPa, a distinta tensión media neta kPa inicial ($p-u_a=200$ kPa en I2 y $p-u_a=400$ kPa en A1). Se observa que la curva $\delta\varepsilon_v/\delta\varepsilon_s$ para $p-u_a=200$ kPa se encuentra ligeramente arriba (y la relación $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$, abajo) de la dada en el ensayo con $p-u_a$ inicial de 400 kPa. En este último ensayo la correlación entre las relaciones $\delta\varepsilon_v/\delta\varepsilon_s$ y $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ experimentales con las teóricas es muy buena.

En los ensayos I2, IWD e IW se efectuó un ciclo de descarga–recarga a una deformación axial de $\varepsilon_a = 0.8\%$, 1.3% y 5.7% respectivamente; para obtener los parámetros elásticos del suelo. Estos parámetros elásticos fueron evaluados de la trayectoria de recarga (Figura 7.49). En la Tabla 7.7 se resumen los parámetros del suelo obtenidos.

Tabla 7.7 Valores de los parámetros elásticos del suelo.

Ensayo	u_a-u_w kPa	$p-u_a$ MPa	ε_a (%)	e (inicio de recarga)	E MPa	G MPa
I2	100	234	0.8	0.70	131	44
IWD	100	312	1.3	0.42	212	76
IW	0.4	262	5.7	0.49	106	36

En esta tabla, al analizar I2 e IWD (igual $p-u_a$ inicial y succión matricial) se observa la influencia del valor del índice de poros sobre los parámetros elásticos. La muestra sobreconsolidada (IWD) tiene mayor rigidez que la normalmente consolidada (I2). Por otra parte, la muestra IW bajo

succión matricial cercana a cero, aun cuando tiene mayor densidad, presenta menor rigidez que la muestra I2 (con $s=100$ kPa). En este caso, ambos ensayos iniciaron sobre muestras en condiciones normalmente consolidadas.

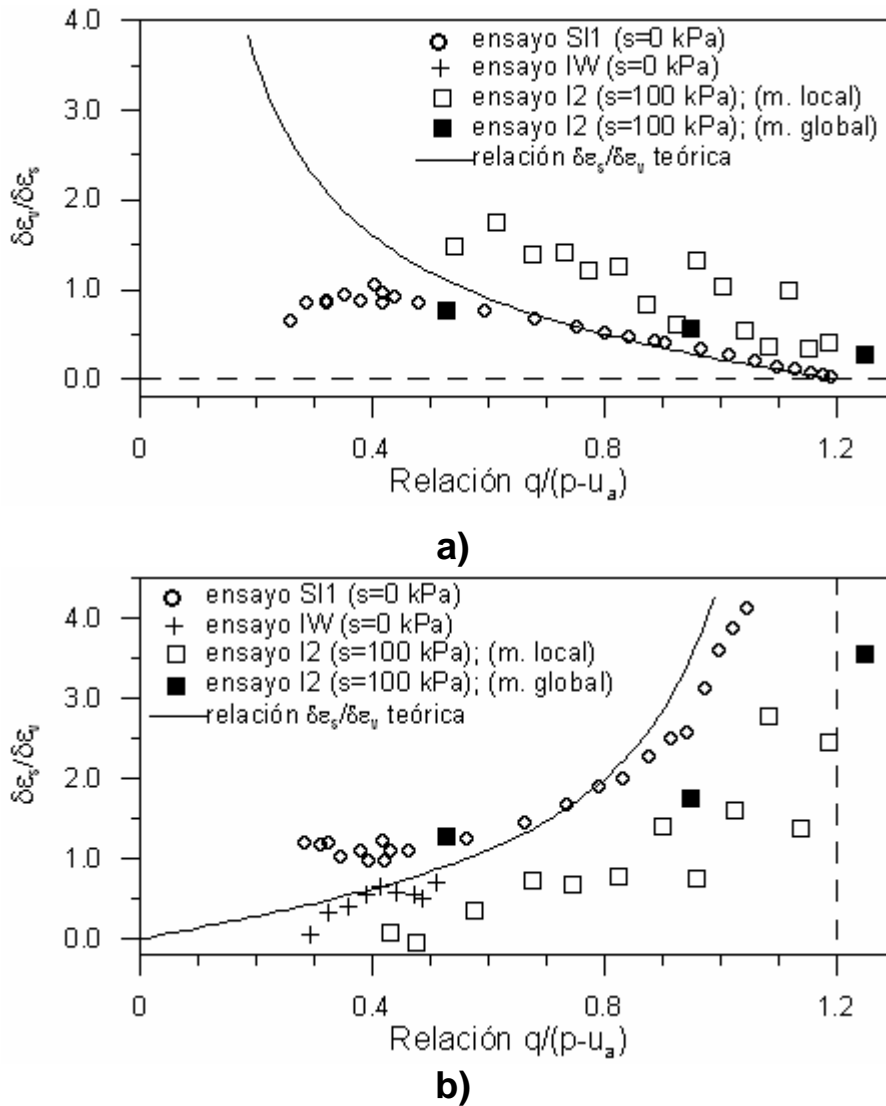
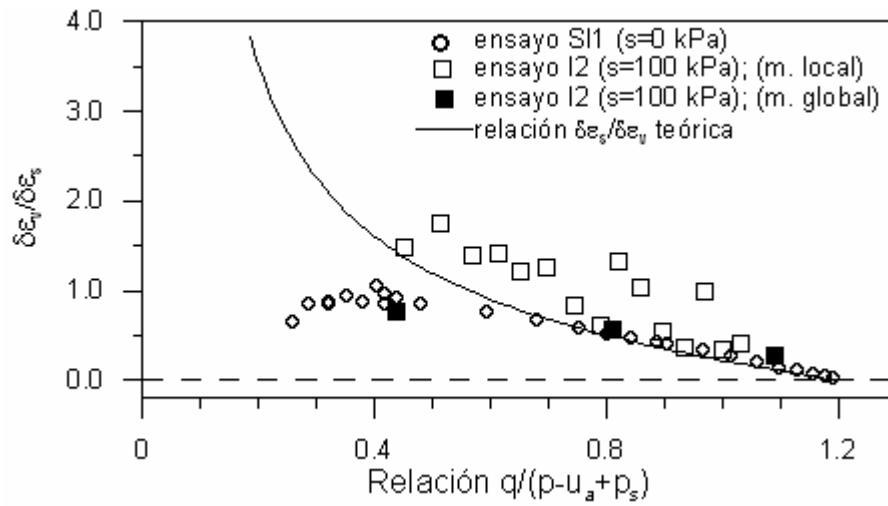
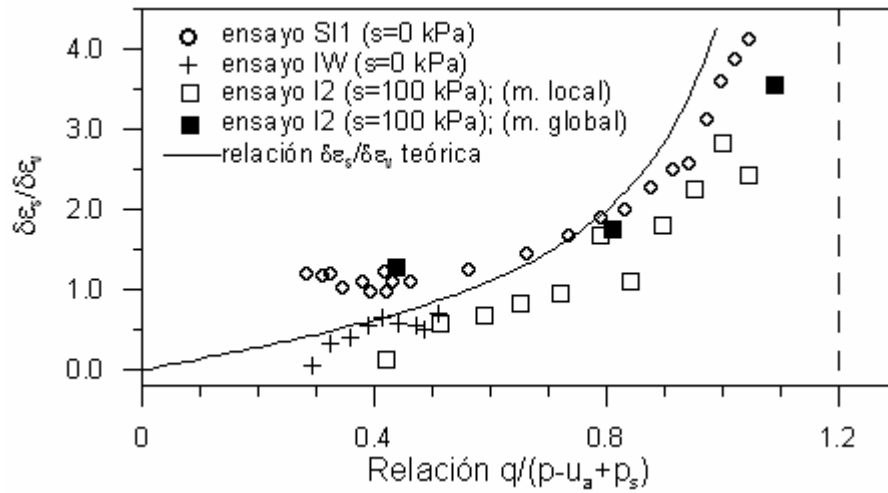


Figura 7.43 Gráficas de la evolución de: a) la dirección de incremento de deformación plástica $\delta\varepsilon_v/\delta\varepsilon_s$ con la relación $\eta=q/(p-u_a)$; b) dirección $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ con la relación $\eta=q/(p-u_a)$; obtenidos de los ensayos SI1, I2 e IW.



a)



b)

Figura 7.44 Gráficas de la evolución de: a) la dirección de incremento de deformación plástica $\delta\varepsilon_v/\delta\varepsilon_s$ con la relación $\eta=q/(p-u_a+p_s)$; b) dirección $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ con la relación $\eta=q/(p-u_a+p_s)$; obtenidos de los ensayos SI1, I2 e IW.

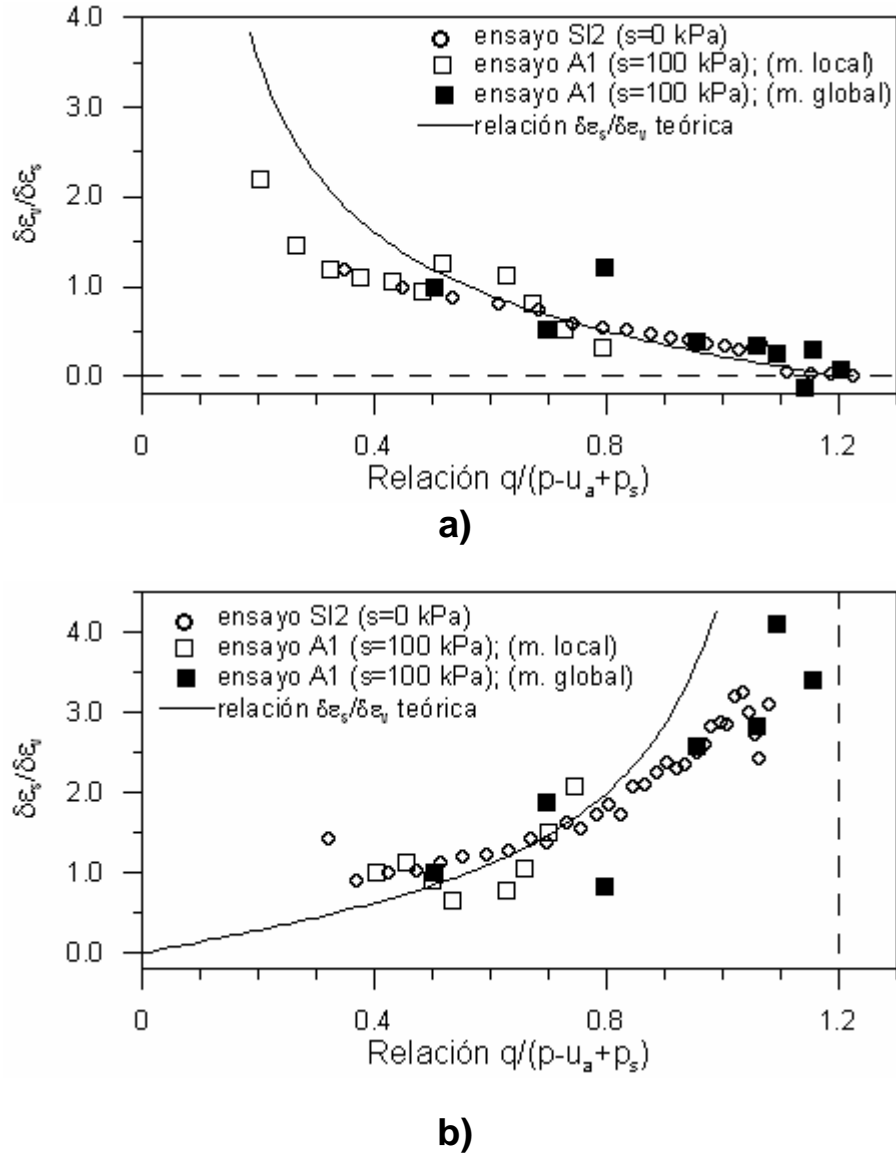
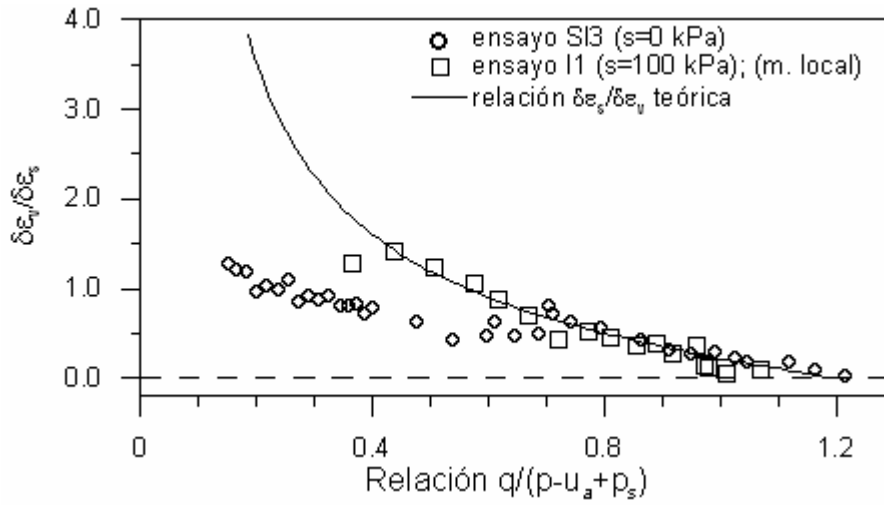
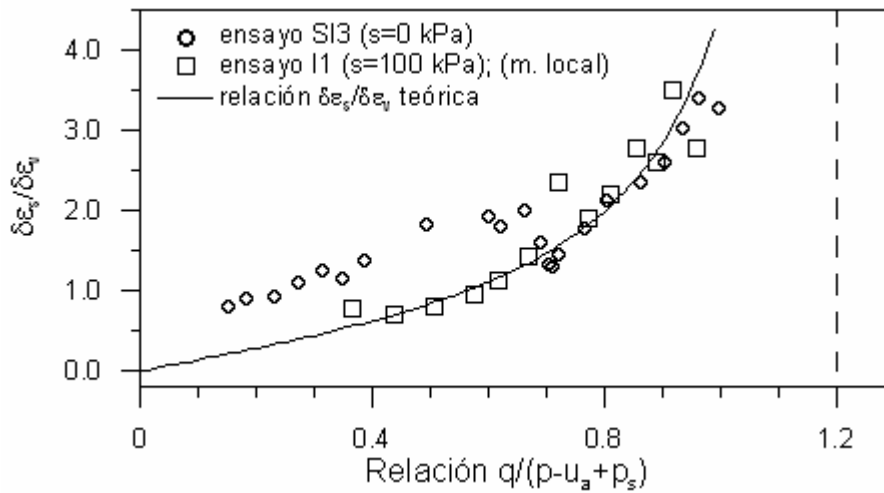


Figura 7.45 Gráficas de la evolución de: a) la dirección de incremento de deformación plástica $\delta\varepsilon_v/\delta\varepsilon_s$ con la relación $\eta=q/(p-u_a+p_s)$; b) dirección $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ con la relación $\eta=q/(p-u_a+p_s)$; obtenidos de los ensayos SI2, y A1.

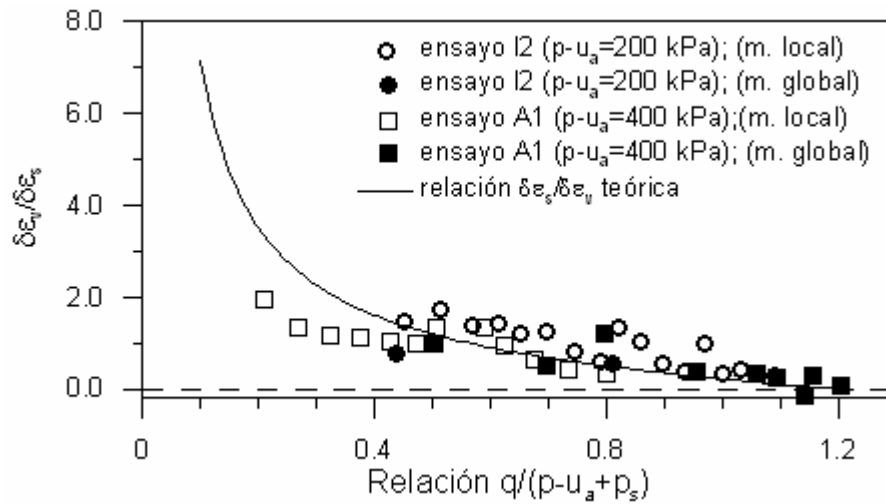


a)

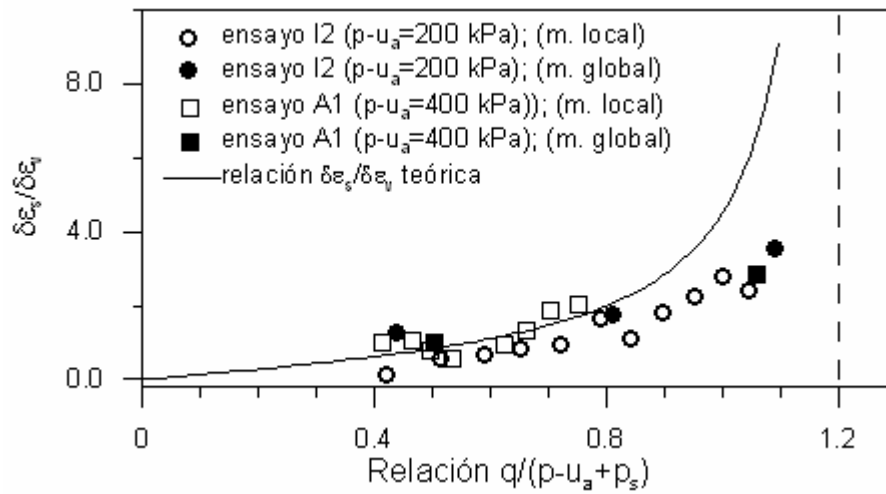


b)

Figura 7.46 Gráficas de la evolución de: a) la dirección de incremento de deformación plástica $\delta\epsilon_v/\delta\epsilon_s$ con la relación $\eta=q/(p-u_a+p_s)$; b) dirección $\delta\epsilon_s/\delta\epsilon_v$ con la relación $\eta=q/(p-u_a+p_s)$; obtenidos de los ensayos SI3, y I1.



a)



b)

Figura 7.47 Gráficas de la evolución de: a) la dirección de incremento de deformación plástica $\delta\varepsilon_v/\delta\varepsilon_s$ con la relación $\eta=q/(p-u_a+p_s)$; b) dirección $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ con la relación $\eta=q/(p-u_a+p_s)$; obtenidos de los ensayos I2 y A1.

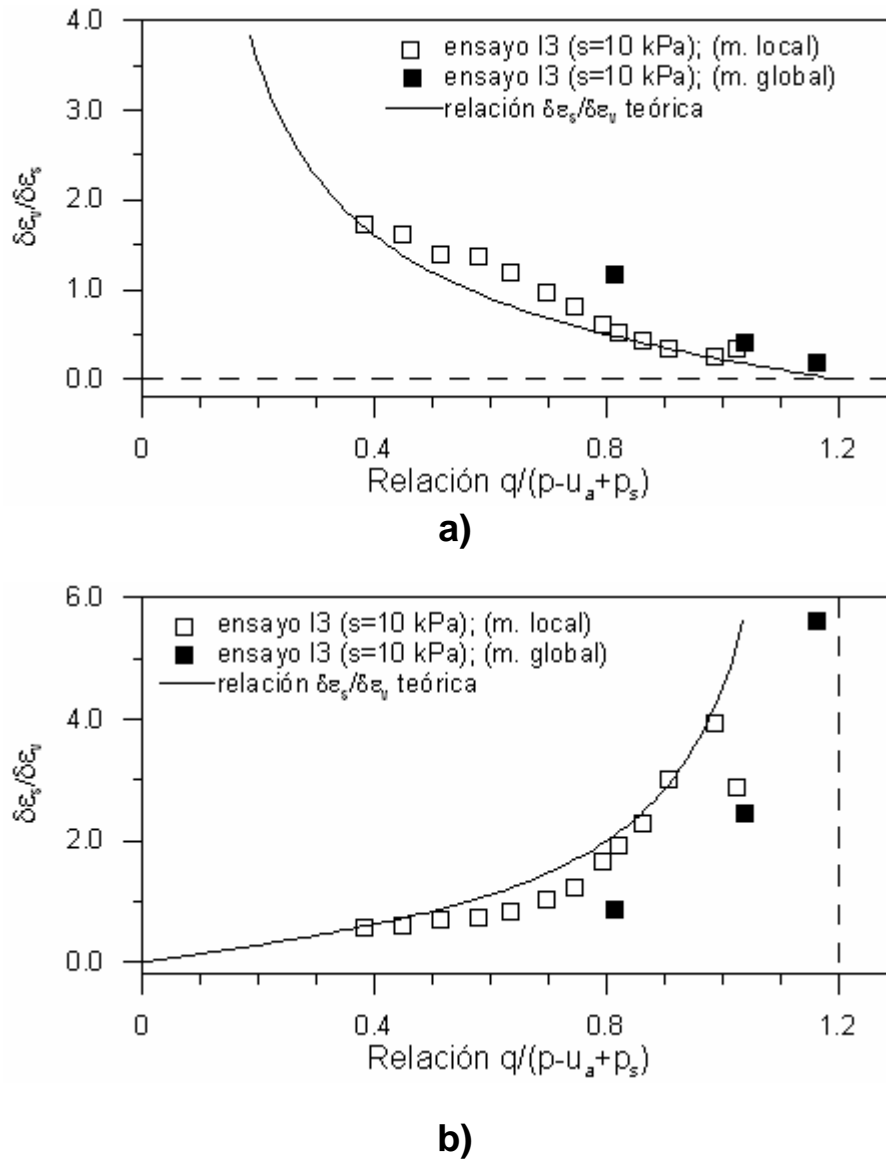


Figura 7.48 Gráficas de la evolución de: a) la dirección de incremento de deformación plástica $\delta\epsilon_v/\delta\epsilon_s$ con la relación $\eta=q/(p-u_a+p_s)$; b) dirección $\delta\epsilon_s/\delta\epsilon_v$ con la relación $\eta=q/(p-u_a+p_s)$; obtenido del ensayo I3.

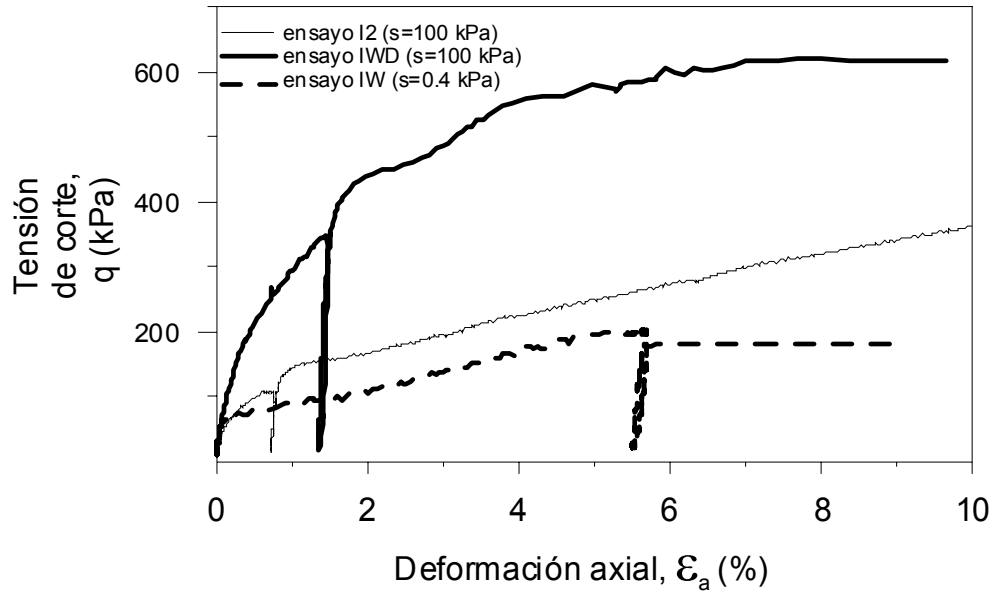


Figura 7.49 Resultados de las trayectorias de descarga-recarga de compresión triaxial en los ensayos I2, IWD e IW.

