



Departamento de Ingeniería del Terreno,  
Cartográfica y Geofísica

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DEL  
COMPORTAMIENTO HIDROMECAÁNICO DE  
UNA ARCILLA COMPACTADA.

**TESIS DOCTORAL**

Presentada por:  
Carlos Manuel Buenfil Berzunza

Directores de tesis:  
Antonio Lloret Morancho  
Antonio Gens Solé

---

Barcelona, Septiembre de 2007

## CAPITULO 8

### CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

#### ***8.1 Síntesis del trabajo. Conclusiones.***

##### **8.1.1 Caracterización del suelo usado.**

El material ensayado es una arcilla de la ciudad de Barcelona que según la clasificación del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, es una arcilla de baja plasticidad (CL), con  $w_L = 28\%$  y  $w_P = 19\%$ . Su porcentaje de partículas de tamaño de arcilla, de limo y de arena es del 18 %, 47 % y 35 %, respectivamente.

Para llevar a cabo esta investigación se requiere de un suelo de relativa baja densidad, con el fin de obtener muestras de estructura abierta que sean susceptibles a sufrir cambios hidromecánicos apreciables cuando se varía el estado de tensiones y de succión. Para ello se seleccionó un suelo de densidad inicial seca de  $1.5 \text{ g/cm}^3$ , obtenido por compactación estática bajo un contenido de agua de 12%. Con esta compactación se generan muestras más repetibles que con la compactación dinámica y con una historia de tensiones conocida desde el inicio de su fabricación.

La tensión vertical neta máxima aplicada sobre esta muestra durante la compactación, en promedio, fue de 0.27 MPa. Se realizó un estudio de la trayectoria completa de tensiones, en la compactación estática unidimensional, determinando su historia de tensiones vertical y lateral, por medio de un edómetro con medida de tensión lateral. Con base a este estudio, se obtiene un coeficiente de empuje al reposo de  $K_0=0.48$ , bajo condiciones de carga normalmente consolidadas. Con estos resultados es posible conocer la tensión máxima de preconsolidación (final de compactación), de la muestra que se usará en esta investigación. Adicionalmente, se midió una succión de 270 kPa sobre el espécimen compactado, usando un tensiómetro de alto rango (Ridley y Burland, 1993).

Se realizaron estudios de la distribución de tamaño de poros (PSD) por Porosimetría por Intrusión de Mercurio (MIP) y por Microscopio Electrónico de Barrido Ambiental (ESEM), utilizando dos

muestras de la arcilla. Una representa el estado final de las muestras compactadas que se usaron en los ensayos de esta tesis. La otra muestra de suelo, más densa, corresponde al estado alcanzado por el suelo después de sufrir una importante compresión por carga. Las fábricas observadas con el microscopio son, razonablemente, consistentes con las curvas de distribución de tamaño de poros (PSD). Puede observarse que la distribución de tamaño de poros, en ambas muestras, es claramente bimodal tal como es característico de este tipo de materiales cuando son compactados en el “lado seco del óptimo”. También, puede observarse que el aumento de la carga de compactación (muestra más densa) afecta solamente la estructura de los poros inter-agregados más grandes, no observándose cambios apreciables en los poros intra-agregados.

En la caracterización del suelo en estudio, se incluye la obtención de curvas de retención, bajo condiciones del edométricas, para las dos distintas fábricas de la arcilla. Se observa, que las curvas de retención de secado y mojado, son claramente afectadas por los valores de índice de poros, en el rango de succiones bajas, modificando el contenido de humedad correspondiente a su condición saturada y el valor de entrada de aire. Los efectos del índice de poros también se advierten con el cruce de las dos curvas de retención de mojado, ya que influyen en el valor oclusión de aire (o valor de entrada de agua) de estas curvas. Por otra parte, puede observarse que la cantidad de agua retenida en succiones más altas de 100 kPa es independiente del índice de poros. Los datos MIP pueden ser usados para obtener curvas de retención. En general, con ambos tipos de curvas se obtienen resultados similares

### **8.1.2 Desarrollo de una nueva célula triaxial con control de succión, instrumentada electrónicamente.**

Se construyó un nuevo equipo triaxial con control de succión, similar al descrito en Romero *et al.* (1997) y Barrera (2002). Una mejora de este equipo consiste en su capacidad para realizar trayectorias de tensiones continuas, tanto isótropas como anisótropas, bajo succión constante. Para lograr esto, cuenta con un sistema de control de tensiones a base de motores paso a paso, un sistema de aplicación de tensión axial a base de cilindro neumático y pistón de carga con fricción pequeña, y un sistema de obtención y registro de medidas totalmente automatizado. Otra novedades del equipo, con respecto al triaxial con succión controlada de Romero *et al.* (1997) y Barrera (2002), radican en la obtención y registro instrumentado de medidas de cambio de

volumen de agua mediante transductores de presión diferencial y en la alta sensibilidad que se tiene en la aplicación de la carga axial, al suministrarla mediante un sistema de cilindro neumático y pistón de carga con fricción pequeña. Mediante este sistema la aplicación de presión de confinamiento y tensión de corte pueden ser controladas simultáneamente, siendo posible obtener trayectorias, de compresión isotropa, anisótropa y compresión triaxial a una velocidad predefinida. El equipo está diseñado para ensayar muestras de suelos no saturados de 38 mm de diámetro por 76 mm de altura y aplicación de compresión axial con control de tensiones.

Se realizaron varias calibraciones para conocer el funcionamiento de la aplicación de la carga axial y el efecto de la presión de confinamiento sobre ella. La precisión de la carga axial aplicada a la muestra es gobernada por variación en la medida de la célula de carga, más que por la operación del sistema de motor paso a paso con el cilindro neumático, a fin de reducir el efecto de la pequeña fricción en el pistón.

La succión matricial se aplicó habitualmente mediante la técnica de traslación de ejes, aunque en algunos casos muy particulares, en los que se hace necesario proporcionar succiones inferiores a 10 kPa, la succión es aplicada con la técnica de columna negativa de agua. Una de las ventajas que posee este equipo triaxial es la posibilidad de suministrar la presión de aire y agua, requeridas para aplicar la succión matricial, simultáneamente sobre ambos extremos de la muestra. Con ello se pueden alcanzar tiempos de equilibrio significativamente más cortos. Para poder realizar etapas de reducción gradual de la succión matricial con control en su velocidad de cambio, fue necesario adoptar el sistema de motor paso a paso. Al aplicar la traslación de ejes a muestras casi-saturadas (con presencia significativa de aire ocluido) se presentaron problemas debidos a la generación de deformaciones volumétricas irreversibles.

El cambio de volumen de la muestra se obtiene a partir de las medidas de las dimensiones de la muestra, tanto en forma local como global. Se consideran más representativas las medidas radial y axial locales, al no ser afectadas por los efectos de fricción presentes en los bordes de la muestra.

Para obtener las deformaciones axiales de forma local se colocan dos sensores desplazamiento, sujetos sobre la muestra. Su rango de trabajo no les permite operar cuando se presentan grandes deformaciones en la muestra. Para resolver este problema, se implementó un sistema de medida externa para tener la deformación axial cuando los transductores para medidas internas han rebasado su rango de trabajo. Estas medidas externas son corregidas por deformación del equipo, con base a las calibraciones efectuadas.

Las deformaciones radiales locales se midieron sobre dos lados, diametralmente opuestos, con sensores láser electro-ópticos montados fuera de la cámara, en soportes rígidos sujetos a la de la celda triaxial. Este sistema proporciona una alta exactitud dentro de un amplio rango. Fue necesario realizar calibraciones para evaluar el efecto de la presión de confinamiento sobre las medidas de deformación radial. De estas calibraciones se concluye que puede ser usada una sencilla corrección de las medidas, por el efecto del incremento de la presión de confinamiento. Este pequeño efecto se genera por los desplazamientos y expansión de la camisa de la cámara triaxial ante la aplicación de la presión de confinamiento. Por otra parte, en bajas presiones los registros presentan un comportamiento irregular, generado por el acomodo de la superficie de la membrana. Para contrarrestar este efecto, las trayectorias de tensiones se diseñan de tal manera que la presión de confinamientos (tensión radial total) aplicada siempre sea suficientemente alta como para obtener medidas de deformación radial confiables.

El cambio de volumen global es obtenido a partir de dos perfiles de la muestra, conseguidos moviendo el sensor láser verticalmente por medio de un motor eléctrico. Este método tiene la ventaja de que no es necesario suponer la forma de la muestra y se posee un gran número de puntos discretos. Para estimar el volumen global de la muestra, desde cada perfil, se desarrolló un algoritmo usando el método de los discos para generar un sólido de revolución, resolviendo la integral con el método compuesto del trapecio con incrementos no constantes.

Los cambios en el contenido de humedad se registraron de forma continua midiendo el volumen de agua por medio de buretas de doble pared, instrumentadas con transductores de presión diferencial. Las medidas de cambio de volumen de agua registradas son corregidas con base a la pendiente (volumen de agua/tiempo) registrada en la condición de flujo establecido, tomando en

cuenta, de esta manera, los efectos por la cantidad de difusión de aire a través de los discos cerámicos, la pérdida a través de los tubos y la cantidad de agua evaporada. Por otra parte, se ha observado un error apreciable por histéresis, por lo cual se ha intentado que el flujo por las buretas sea en un solo sentido. Se observó que los cambios de presión de agua afectan también las curvas de calibración, causado por la deformación del sistema (compresibilidad del agua, deformación de la bureta exterior, etc.). Aunque esto no representa un problema en los ensayos donde se mantiene constante la presión de agua, este efecto se considera en los ensayos donde se varían gradualmente las presiones de agua.

Se desarrolló un programa (en Visual Basic 5.0) para la adquisición de datos, almacenamiento, visualización en tiempo real y control. El programa contiene rutinas que permiten controlar los dos motores paso a paso para efectuar trayectorias de tensiones, así como trayectorias de humedecimiento. Otra rutina se usa para adquirir y almacenar los datos obtenidos de los perfiles laterales de la muestra. Se utilizaron dos tarjetas de entrada y salida analógica y digital, para el registro de datos proporcionados por 14 transductores y el control de los motores paso a paso.

Se efectuaron análisis para determinar la velocidad óptima en la aplicación de la presión de confinamiento y de la tensión de corte; la corrección por membrana (doble en una muestra poco densa); y la pérdida de agua en buretas y tubos.

### **8.1.3 Resultados experimentales.**

Se realizaron diferentes trayectorias de tensión en el equipo triaxial, mediante el control de la succión matricial, y de las tensiones media neta ( $p-u_a$ ) y de corte ( $q$ ). Los ensayos realizados se agruparon en 4 tipos distintos con base a las trayectorias de tensiones seguidas. Para realizar una mejor descripción de los resultados, análisis y conclusiones del programa experimental se agrupan con base a las etapas del que consta el ensayo. Cada uno de los grupos incluye los ensayos saturados y no saturados.

### **Etapa de equilibrio. Mojado o secado a bajas cargas.**

La trayectoria de tensiones en esta etapa consiste en humedecimiento o secado de la muestra desde condiciones vírgenes de tensión media neta ( $p-u_a$ ) y succión matricial ( $s=u_a-u_w$ ) muy cercana a la succión de final de compactación

El comportamiento observado de la relación agua-succión matricial, es análogo al reportado por otros investigadores en materiales semejantes. Se observa una variación lineal de la cantidad de agua con el logaritmo de la succión, antes sufrir un brusco aumento de contenido de agua cuando la succión aplicada está por debajo de de 10 kPa. El suelo apenas alcanzó un grado de saturación del 47.2% cuando se le aplicó un succión matricial de 10 kPa, y al aplicar succiones por debajo de este valor se incrementa el grado de saturación de manera notable. Esto puede ser explicado considerando la distribución de poros bimodal que posee el suelo y que su curva de retención de mojado presenta un valor de oclusión de aire (o valor de entrada de agua) muy bajo. Se sugiere que no se llegan a inundar los poros inter-agregados más grandes, que representan un alto porcentaje de vacíos de la muestra, aun cuando la succión aplicada sea tan baja como 10 kPa.

En las trayectorias de mojado, se presentaron pequeños hinchamientos en las succiones más altas y colapsos en las succiones más pequeñas. Este comportamiento puede ser explicado por el modelo BBM propuesto por Alonso et al. (1990).

### **Consolidación isótropa con succión matricial constante.**

Las características que presenta el comportamiento del material bajo trayectorias de tensiones isótropas, son consistentes con los resultados presentados en la literatura sobre suelos compactados, ligeramente plásticos y con baja densidad. Estas características pueden ser explicadas mediante modelos constitutivos elasto-plásticos, como el presentado por Alonso et al. (1990):

- a) Las muestras, ensayadas en un triaxial convencional bajo condiciones saturadas, que presentan colapso al saturarse, después de alcanzar sus presiones de preconsolidación convergen con la curva de compresión isótropa, en el plano  $e-\log p'$ , de la muestra que no sufre colapsos. La presión de preconsolidación para las muestras colapsadas son

consistentes con las presiones medias efectivas promedio aplicadas al final de la saturación. Este fenómeno puede ser relacionado con los resultados aportados en estudios sobre suelos colapsables (Maswoswe (1985)).

- b) La tensión de fluencia (presión de preconsolidación) es mayor cuando la succión matricial es más alta. La curva de fluencia (LC) determinada concuerda con las evidencias experimentales presentadas. Se puede considerar que esta curva de fluencia corresponde al del estado final de compactación de la muestra, al no sufrir cambios de volumen importantes en su historia de tensiones previa.

Un punto relevante, a tomar en cuenta, es el gran cambio observado en el valor de la tensión de fluencia entre las succiones de 0 y 10 kPa, que podría estar ligado al efecto del grado de saturación sobre la compresibilidad de muestra.

Se observa que las pendientes de la línea de compresión normal  $\lambda(s)$  determinadas son función de la succión matricial, disminuyendo la pendiente a medida que la succión es incrementada pero la pendiente  $\lambda(s)$  cae drásticamente al reducirse la succión a cero (en las muestras saturadas). Aunque los datos sobre la variación de  $\lambda(s)$  con la succión son muy contradictorios en la literatura sobre suelos no saturados, se encuentra que los resultados obtenidos en este estudio son consistentes con lo reportado por Estabragh et al. (2004). Por otro lado, los resultados sugieren que la pendiente  $\kappa(s)$  no se ve afectada de forma apreciable por la succión matricial.

Se considera posible comparar los resultados realizados sobre muestras saturadas en un equipo triaxial convencional (obtenidos con medida global) con los ensayos no saturados (obtenidos con medida local), debido a la buena concordancia entre la medida local y la global observada en los ensayos de consolidación isótropa bajo condiciones no saturadas. Con la “medida global” se obtienen menores cambios de volumen que con la “medida local”, pero el acuerdo entre ambas medidas es satisfactorio.

Se usaron varios criterios para determinar la tensión de fluencia, observándose que no resultan muy diferentes los valores obtenidos, presentando la mayor diferencia en ensayos donde el cambio de pendiente es más suave (en los ensayos realizados bajo las succiones más altas). En

este caso, el cambio se da en forma progresiva conduciendo a una suave transición de la zona pseudoelástica a un comportamiento elasto-plástico.

Con base a los resultados de la evolución de las deformaciones de corte, y su relación con las deformaciones volumétricas, en las trayectorias de consolidación isótropa, se observaron diferentes patrones de comportamiento en las muestras “colapsadas” y las “no colapsadas” (durante su saturación), cuando se realizaron ensayos de compresión isótropa en condiciones saturadas. Las muestras “no colapsadas” presentan un comportamiento que puede ser considerado, cercanamente, isótropo tan pronto se alcanza la presión de preconsolidación, mientras que la muestra “no colapsada” presenta, inicialmente, un comportamiento anisótropo transversal (con una mayor rigidez axial) y un comportamiento cercanamente isótropo al final de la trayectoria. Estos resultados son una contribución nueva a la literatura sobre suelos compactados. La diferencia en el patrón de comportamiento puede ser explicado mediante los conceptos de elastoplasticidad en suelos con anisotropía transversal (por ejemplo Wheeler et al. 2003), en conjunto con conceptos de deformaciones permanentes (colapso) inducidas por mojado (por ejemplo Alonso et al. 1990).

En el caso de las trayectorias isótropas con control de succión, en todos los ensayos se observan deformaciones radiales más grandes que las axiales, apartándose de un comportamiento isótropo bajo la aplicación de compresión isótropa. En cuando al efecto de la succión matricial, los resultados obtenidos sugieren un comportamiento más cercano al isótropo a medida que la succión decrece. Se considera que, en todos estos ensayos, al inicio de la trayectoria las muestras mantienen un arreglo de partículas (fábrica) muy cercano al estado final de la compactación pero poseen diferente succión y contenido de agua, debido a que no presentaron importantes cambios volumétricos y permanecieron dentro de la región elástica durante la etapa de equilibrio. Estos resultados son, también, una contribución nueva a la literatura sobre suelos compactados.

La relación  $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$  tienden hacia cero a medida que se incrementa ( $p-u_a$ ). En ensayos con succiones bajas (0 y 10 kPa), al final, se estabilizan sobre valores muy pequeños de  $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ . Este patrón de comportamiento puede ser explicado mediante los conceptos de elastoplasticidad en suelos con anisotropía transversal (por ejemplo Wheeler et al. 2003), y donde una trayectoria de

incremento de tensión isotrópica induce la expansión y rotación de la superficie de fluencia hacia una orientación más isotrópica.

Durante la trayectoria de consolidación isotrópica con control de succión se detectaron salida de agua, bastante pequeña, en las succiones más altas, pero en la trayectoria bajo una succión de 10 kPa se registró entrada de agua. El comportamiento hidromecánico acoplado, resultante en los ensayos, puede ser interpretados usando el modelo de curvas de retención limitantes (bounding retention curves), que considera los cambio de índice de poros, propuesto por Vaunat et al. 2000. Estos resultados, también, son una contribución nueva a la literatura sobre suelos compactados.

### **Consolidación anisótropa bajo succión matricial constante.**

Se han realizado ensayos en trayectorias de consolidación bajo condiciones de tensión anisótropa, siguiendo una relación de tensión de corte entre tensión media neta,  $\eta = q / (p - u_a)$ , constante; bajo condiciones de succión matricial ( $s = u_a - u_w$ ) constante de 0 y 100 kPa.

En los ensayos de consolidación anisótropa sobre suelos saturados se observa que los valores de tensión de fluencia determinados son consistentes con la curva de fluencia obtenida mediante el Modelo Cam-Clay modificado. Esto es consistente con el comportamiento esperado para un suelo con comportamiento mecánico isotrópico, sugiriendo que este suelo se comporta como un material isotrópico, en condiciones saturadas, después de colapsar en la etapa de saturación. Por otra parte, los escasos datos experimentales disponibles no sugieren que exista cambio de forma en las superficies de fluencia cuando se realizan trayectorias de carga, descarga y recarga, tan solo se aprecia que las superficies cambian de tamaño.

El flujo plástico del suelo saturado se examinó estudiando la dirección de incremento de deformación plástica  $d\varepsilon_s/d\varepsilon_v$  en las distintas pruebas. Se observó que en valores bajos de  $\eta$  los resultados experimentales, en la tensión de fluencia, son consistentes con una regla de flujo asociada del modelo Cam Clay, pero no ocurre así en valores más altos ( $\eta = 0.86$ ). Un decremento y posterior estabilización de no puede ser explicado por el modelo Cam Clay.

Se realizaron trayectorias de consolidación anisótropa, bajo condiciones de succión matricial constante de 100 kPa. En esta succión matricial, las muestras mantienen un arreglo de partículas (fábrica) y contenido de agua cercano al existente en el estado final de la compactación, permaneciendo dentro de la región elástica durante la etapa de equilibrio. Los valores de tensión de fluencia determinados se ajustan mejor una curva de fluencia que considera la anisotropía del suelo, que a una curva de fluencia obtenida mediante el Modelo Cam-Clay.

Los resultados de la evolución de las deformaciones con respecto a la tensión media neta ( $p-u_a$ ), y de la relación  $\delta\varepsilon_s/\delta\varepsilon_v$ , sugieren que el suelo compactado muestra un comportamiento mecánico anisótropo bajo una succión de 100 kPa. Es importante señalar que en la trayectoria de consolidación con  $\eta=0.38$  la deformación de corte generada es muy próxima a cero. Por otra parte, con  $\eta=0.75$  (próximo a la trayectoria de tensión registrado al final de la compactación), el patrón de comportamiento se acerca bastante a las condiciones de deformación radial nula

Considerando todos los resultados se sugiere que la anisotropía, que aparentemente presenta el suelo al final de la compactación (sugerida por el comportamiento mecánico en consolidación de las muestras no colapsadas y las no saturadas) es borrada después de colapsar al saturarse la muestra.

### **Colapso inducido por mojado bajo diferentes relaciones de tensión.**

Se han realizado trayectorias de reducción de succión en los ensayos bajo una presión neta media ( $p-u_a$ ) constante y con condiciones diferentes valores de  $q/(p-u_a)$  constante (isótropa y de 0.75). Para ello se usó un procedimiento de reducción cuasicontinua de la succión matricial, a velocidades muy lentas. Con este procedimiento se intentó minimizar las diferencias entre las succiones impuestas en los bordes y la presente en el centro de la muestra, sin consumir tiempos de ensayos muy largos, pero esto no siempre pudo lograrse, tal como lo muestran los largos período de estabilización que se presentan después de terminar la reducción de succión. A pesar de ello, este procedimiento se considera más adecuado para estudiar el fenómeno de colapso inducido por mojado que el procedimiento por escalones, debido a que evita diferencias excesivamente grandes entre la succión aplicada en los bordes y la presente en la región central de la muestra.

Los resultados presentan distintas fases con respecto a la evolución  $s-e$ ,  $s-e_w$  y  $\delta e-\delta e_w$  : Una primera fase donde la reducción de la succión genera pequeños incrementos de agua acompañados con pequeñas reducciones en el índice de poros; una segunda fase presenta importantes deformaciones de colapso (de manera súbita). Al final de la etapa se presenta una fase de estabilización del índice de poros, tendiéndose a homogenizar la succión matricial y la humedad en las muestras.

En cuanto a las deformaciones, se observa que la magnitud de reducción de volumen (colapso) es casi independiente de la relación de tensiones principales impuestas, pero las componentes axial y radial si fueron afectadas. Estos resultados son consistentes con lo observado por Lawton et al. (1991) y Sun et al. (2004). Los cambios sufridos de  $\delta \varepsilon_s / \delta \varepsilon_v$  después del primer colapso brusco pueden ser explicados mediante los conceptos de elastoplasticidad en suelos no saturados (Alonso et al. 1990) considerando también su anisotropía transversal (Wheeler et al. 2003).

### **Ensayos de compresión triaxial.**

Los resultados de compresión triaxial sobre suelos saturados son consistentes el comportamiento de suelos saturados reconstituidos, para condiciones normalmente consolidados. Estos resultados pueden ser explicados dentro de un contexto elastoplástico de estado crítico desarrollado en el modelo Cam Clay.

En casi todos los ensayos con succión controlada, a excepción de los ensayo IWD e I3, no se presentan evidencias de un pico, y muestran tendencia a seguir una respuesta normalmente consolidada al no observarse, en forma apreciable, un punto de fluencia. En condiciones iguales de tensión media neta inicial, a medida que la succión es mayor, el estado crítico se alcanza a una mayor tensión de corte. Estos resultados son consistentes con el modelo elastoplástico de estado crítico desarrollado por Alonso *et al.* (1990).

En el caso del 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. El resultado es consistente con los modelos de comportamiento elastoplástico.

En el ensayo I3 se distingue, en forma apreciable, un punto de fluencia al inicio del corte generando después deformaciones plásticas. Al encontrarse el estado de tensiones sobre la superficie de fluencia, al iniciar la compresión triaxial, este resultado sólo puede ser explicado, en un esquema de comportamiento elastoplástico, considerando la anisotropía del material. En el resto de ensayos, también se presentó este fenómeno pero fue menos apreciable considerándose, por simplicidad, que siguen un una respuesta normalmente consolidada.

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 observado, es consistentes 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. Sin embargo, a medida que la succión matricial es mayor, se presenta una mayor deformación volumétrica final, lo cual no es consistente con este modelo. Los resultados en el plano  $\log(p-u_a)$ - $e$  muestran que en las etapas de compresión triaxial con control de succión, se generan mayores cambios de índice de poros, y sus curvas tienden a converger con las de los ensayos saturados.

Resultados de ensayos (I2 e IWD) que siguen la misma trayectoria de consolidación y posterior compresión triaxial, pero con trayectorias previas diferentes, se observa que las curvas de tensión media neta-deformación, son consistentes con la teoría elastoplástica.

En cuanto al flujo de agua durante las etapas de compresión triaxial bajo succión matricial de constante, los resultados son consistentes con la tendencia mostrada durante la etapa de consolidación. La descripción y análisis puede realizarse con base al modelo propuesto Vaunat *et al.* (2000).

Los resultados sobre líneas de estado crítico, de muestras saturadas y con succión matricial de 100 kPa, sugieren que la pendiente  $M$  no depende de la succión, lo cual es consistente con el modelo de estado crítico propuesto por Alonso, *et al.* (1990). También, puede concluirse que las diversas historias de tensiones seguidas en los ensayos, aparentemente, no afectan las relaciones de estado crítico. Con las líneas de estado crítico determinadas experimentalmente y otras

estimadas considerando que el valor de  $M$  no cambia, se estudió la evolución de  $p_s$ . Estos resultados sugieren que la relación entre la succión matricial y  $p_s$  no es lineal.

En el plano  $e$ -log  $(p-u_a)$ , la línea de estado crítico es cercanamente paralela a la línea de compresión normal, tanto en condiciones saturadas como cuando la muestra se ensaya bajo una succión matricial de 100 kPa. La línea de estado crítico de las muestras saturadas posee una pendiente ligeramente menor que la correspondiente a una succión  $s=100$  kPa.

La evolución de la dirección de incremento de deformación plástica  $\delta\varepsilon_v/\delta\varepsilon_s$  con respecto a  $\eta=q/(p-u_a+p_s)$ , muestran un patrón de comportamiento cercanamente isótropo.

En el caso de ensayos de compresión triaxial efectuados en el equipo con succión controlada, una de las características operacionales consiste en la posibilidad de obtener medidas de deformación volumétrica de forma local y global. Con respecto a la medida de deformación axial, se encontró que las medidas de deformación interna y externa, son confiables en etapas tempranas del ensayo, pero la medida interna deja de operar en forma confiables al alcanzar su rango de trabajo (presentándose en una deformación no mayor al 8%, pero que depende de la historia de tensiones previa aplicado a la muestra). Con respecto a la deformación volumétrica, 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 presenta un significativo abombamiento. Son varios los fenómenos que generan las imprecisiones de la medida local: a) la suposición, para la deformación local, de una deformación del tipo cilindro recto es errónea en estas condiciones; b) se afectan significativamente las medidas de desplazamiento radial por el desplazamiento vertical del punto monitoreado localmente; c) existencia de arrugas en la membrana. Estos errores se minimizaron utilizando medidas locales para deformaciones axiales pequeñas y globales para deformaciones axiales grandes. La deformación axial en la que se deja de tener un buen acuerdo entre las medidas local y global, depende de la forma de la muestra al inicio de la compresión triaxial (afectada por la historia de tensiones previa). Por otra parte, con base a estos resultados 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.

Para verificar que la velocidad de aplicación de tensión de corte fuera adecuada, en el ensayo II, se detuvo la aplicación de la carga, en algunas tensiones predeterminadas, por un lapso de tiempo, hasta llegar a la estabilización de todas las variables. En esta prueba se observó que las variaciones de las deformaciones volumétricas y las de corte pueden considerarse despreciables con respecto a las observadas por incremento de carga. La variación de la cantidad de agua con el tiempo es despreciable, con excepción de la estabilización observada después de fallar. Con base a los resultados se concluyó que velocidad utilizada es adecuada para obtener resultados precisos del comportamiento hidromecánico del suelo, con una duración conveniente del ensayo.

## **8.2 Líneas futuras de investigación.**

El trabajo realizado, como toda investigación, abre el camino hacia nuevas interrogantes. En esta sección se plantean algunas ideas que podrían desarrollarse para ampliar el conocimiento sobre el comportamiento de suelos compactados con estructura abierta.

### **8.2.1 Mejora del equipo triaxial y procedimientos.**

El contar con un equipo adecuado a las exigencias actuales, para obtener resultados experimentales fiables, es algo primordial en un trabajo de investigación experimental. Todo equipo triaxial es susceptible de mejoras, sobre todo después de tenerlo a prueba al terminar su construcción.

El sistema de control de tensiones funcionó correctamente, sin embargo la aplicación de la carga mediante control de tensiones generó fallas en la regulación automatizada de la tensión de corte en estados cercanos a la rotura de la muestra, debido a la incertidumbre generada en la medida del área transversal de la muestra; aún cuando el suelo presente una tendencia a seguir una respuesta normalmente consolidada durante la compresión triaxial. Adicionalmente, en estados cercanos a la rotura, las grandes deformaciones ante pequeños cambios de carga podrían generar, también, cambios en la succión de la muestra y su distribución a lo largo de ella, como se evidencia con los largos tiempos de estabilización en el flujo de agua observados al finalizar algunos ensayos. Para resolver esto se sugiere dotar al equipo de un sistema para efectuar trayectorias mediante control de deformaciones, y evitar así la ocurrencia de fallas repentinas en el suelo.

Los perfiles de la muestra, para obtener el cambio de volumen global, se consiguen moviendo el sensor láser verticalmente por medio de un motor eléctrico. Este procedimiento se realiza operando el motor manualmente, cada determinado lapso de tiempo (o buscando hacerlo en alguna deformación o tensión prefijada) y fue complicado realizarlo por las noches. Debido a lo anterior, se obtuvieron relativamente pocos perfiles. Para mejorar esto, podría automatizarse este procedimiento, mediante motores ligados al ordenador; y sistematizar el proceso de filtrado de datos, reconocimiento de los bordes de la muestra y estimación de desplazamientos laterales y volumen con un programa de computo adecuado. En este último caso se realizó un procedimiento de cálculo, con diferentes módulos en Excel y Matlab, pero es necesario mejorarlo para tener menor tiempo de procesamiento.

Una mejora necesaria en el equipo se refiere a la colocación de instrumentos que midan la succión matricial de la muestra durante las distintas trayectorias de tensiones. Con ello se lograrían avances importantes. Se podrían ejecutar trayectorias sin drenaje de agua y con medidas de succión, que tienen duración más corta y permiten simular el proceso de compactación. Se podría medir la succión de la muestra durante pruebas drenadas con succión controlada, para verificar que la velocidad de aplicación de tensiones sea adecuada en trayectorias continuas, u observar la evolución de la succión durante la ejecución de pruebas por escalones. Con esta mejora, ligada a un procedimiento de entrada continua de agua, se podría estudiar mejor el fenómeno de colapso, bajo diversas tensiones. Es importante señalar que se requiere medir la succión en la parte central del espécimen, que es la zona menos afectada por el efecto de fricción que se presenta en los bordes de la muestra.

### **8.2.1 Estudios experimentales.**

La forma de la curva de fluencia LC, obtenida con las tensiones de fluencia de las trayectorias isótropas a distintas de fluencia, son consistentes con el modelo de Alonso et al. 1990. Pero se han observado fenómenos interesantes que podrían ser estudiados. En el rango de succiones altas, la pendiente de la curva LC se muestra cercanamente vertical, reflejando poca variación en la tensión de fluencia con el incremento de succión. Este fenómeno podría estar relacionado con lo observado en las curvas de retención, donde en succiones altas el agua, aparentemente, se encuentra principalmente en los poros intra-agregados. En succiones bajas, se presenta un gran

cambio en la tensión de fluencia entre las succiones de 0 y 10 kPa, que podría estar ligado al efecto del grado de saturación sobre la compresibilidad de muestra. Adicionalmente, en trayectorias de mojado, los cambios más grandes ocurren en bajas succiones y son pequeños en succiones más altas. Estos datos invitan a estudiar un posible nexo entre las tensiones de fluencia y colapsos con la relación succión-contenido de agua (o grado de saturación), mediante modelos hidromecánicos acoplados.

Se presentaron evidencias que sugieren un comportamiento anisótropo en muestras no saturadas, y que esta aparente anisotropía es borrada después de colapsar al saturarse la muestra. Estos datos, en conjunto con los ensayos de mojado y compresión triaxial, podrían ser usados para plantear esquemas hidromecánicos sobre el comportamiento de suelos compactados, de estructura abierta, que consideren la anisotropía inducida por la compactación.

En el trabajo de investigación se presentaron tensiones de fluencia en muestras ensayadas bajo succión de 100 kPa. Con ellas es posible determinar una curva de fluencia con base a conceptos de elastoplasticidad en suelos con anisotropía transversal, (Wheeler et al. 2003) y suelos no saturados (Alonso et al. 1990). Sin embargo, son insuficientes los datos para poder concluir sobre la forma de tal superficie. Es necesario realizar más ensayos, sobre todo en altos valores de  $\eta=q/(p-u_a)$ , para definir tal superficie. Así mismo, es necesario determinar las curvas de fluencia para más succiones. En este caso, sería interesante estudiar la anisotropía (o isotropía) que se podría dar en altas succiones, cuando, quizás, predomina la presencia de agua en los intra-poros.

En los casos donde se estudia la regla de flujo, se observan tendencias que señalan un comportamiento más cercano al isótropo en suelos saturados, y anisótropo en no saturados. Sin embargo, parecen desviarse un poco de la condición de reglas de flujo asociadas. Es necesario, por lo tanto, efectuar mayores estudios experimentales que ayuden a establecer relaciones teóricas adecuadas.

El patrón de la variación de la línea de compresión normal  $\lambda(s)$  con la succión, reportado en la literatura sobre suelos no saturados y los determinados en este trabajo, son muy contradictorios. Este comportamiento podría ser explicado mediante los conceptos de elastoplasticidad en suelos

con anisotropía transversal, donde una trayectoria de incremento de tensión isotropa induce la expansión y rotación de la superficie de fluencia hacia una orientación más isotropa (Wheeler et al. 2003). En esta investigación, inicialmente estaba previsto realizar ensayos de compresión isotropa que alcanzaran altas tensiones, para conocer la evolución de este parámetro. Pero la duración de estos ensayos y el riesgo de falla del ensayo por caídas de la corriente eléctrica o labores mantenimiento llevaron a diseñar trayectorias de más corta duración. Sería interesante, por lo tanto, realizar ensayos de este tipo.

En este estudio se intentó controlar la tensión de compactación y la superficie de fluencia inicial de la muestra, y evaluar la evolución del comportamiento mecánico, ante el incremento de tensiones en el rango elastoplástico. Un programa de investigación interesante sería determinar experimentalmente la evolución curva de fluencia. Se requiere, entonces, trayectorias de descarga-recarga a partir de una tensión determinada que ubique una nueva superficie, diferente a la inicial.

Las líneas de estado crítico determinadas experimentalmente y otras estimadas sugieren que, para el suelo usado, la pendiente  $M$  no depende de la succión y relación entre la succión matricial y  $p_s$  no es lineal. Para estudiar mejor este patrón de comportamiento y ampliarlo, es necesario realizar más ensayos en un rango de succión y tensiones más altas.

La descripción y análisis del flujo de agua, durante todas las etapas realizadas, puede realizarse con base un modelo hidromecánico acoplado (por ejemplo Vaunat et al. 2000). Para realizar este análisis, y mejorar tales modelos, es necesario contar con un número adecuado de curvas de retención para distintas densidades, que nos permitan describir su evolución con respecto a distintos estados de carga. Y posteriormente, realizar trayectorias adecuadas de tensiones y/o secado-mojado.

Para profundizar en el conocimiento de suelos compactados se requiere investigar el efecto de la densidad seca y el contenido de agua de compactación sobre el comportamiento hidromecánico. Se podría analizar la anisotropía inducida por la compactación, la curva de retención y su evolución con la densidad, etc.

