

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

7.1 Resumen y conclusiones

A continuación se resumen las principales conclusiones que se derivan de los trabajos realizados. Estas conclusiones se han dividido en los siguientes grupos:

- a) Características del material ensayado y de la forma de preparación de las probetas. Resultados de los ensayos convencionales de caracterización.
- b) Nuevos equipos y procedimientos de ensayos.
- c) Resultados de los ensayos mecánicos con succión controlada.

7.1.1 Características del material ensayado

El material ensayado es una arcilla roja de la ciudad de Barcelona que según la clasificación del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, es una arcilla de bajo límite líquido ($w_L = 32 \%$, $w_P = 16 \%$). Su porcentaje de partículas de tamaño arcilloso, limoso y arenoso es del 16.1 %, 44.5 % y 39.4 %, respectivamente.

Se ha desarrollado un procedimiento para fabricar muestras con una densidad seca y una humedad prefijadas a través de una compactación estática isótropa en el interior de una célula triaxial. Con ello se ha conseguido probetas de suelo de distintas formas y tamaños, todas ellas con una estructura isótropa y con una historia tensional conocida desde el inicio de su fabricación. Se han determinado las curvas de compactación en el plano Proctor bajo diferentes presiones isótropas, constatándose que la densidad óptima para cada carga se obtiene para grados de saturación más bajos ($S_r \approx 70 - 75 \%$) que los obtenidos con los métodos de compactación dinámica tradicionales. Esto puede ser debido a la mayor dificultad que tiene el aire para salir del suelo cuando la compactación se realiza en el interior de la célula triaxial. Tras la compactación se ha medido la

succión total de cada muestra mediante un psicrómetro de transistores, que ha permitido dibujar las líneas de igual succión en los ejes del gráfico densidad seca–humedad. Se ha constatado que éstas tienden a ser líneas rectas verticales en los rangos más bajos de humedad y tienden a ser paralelas a las curvas de igual grado de saturación en la zona de humedad igual o superior a la óptima.

Las determinaciones de la succión han permitido dibujar las curvas de retención para diversos valores de la porosidad. Ello ha permitido constatar que el efecto de la densidad en la curva de retención se hace nulo para humedades por debajo del 6 % (succión del orden de 4 MPa), lo que permite establecer que el agua ligada a la microestructura es del orden del 40 % para densidades secas de 1.75 g/cm³ y del orden del 27 % para densidades secas de 1.45 g/cm³. En la observación del suelo en microscopio electrónico ambiental se ha constatado la existencia de agregados de partículas arcillosas rodeando a las partículas de limo. El tamaño de estos agregados es en muchos casos comparable al de una partícula de tamaño de limo ($\phi > 2 \mu\text{m}$). La porosimetría por intrusión de mercurio ha permitido estimar el tamaño de poro que separa la porosidad intra e inter-agregados en unos 50 nm. Si se asume que la mayor parte de los poros no intruidos son los de menor diámetro, el volumen de poros intra-agregados que se obtiene es coherente con el derivado a partir de la humedad asociada a la microestructura.

Los ensayos mecánicos objeto de la tesis se han realizado sobre muestras compactadas con diferentes humedades y densidades secas, pero siempre con humedades por debajo de la humedad óptima de compactación. La fabricación de muestras con humedades superiores al óptimo no se ha abordado dada la dificultad de obtener muestras repetitivas siguiendo el procedimiento de fabricación de probetas que se puso a punto. Por tanto, hay que tener muy presente que los resultados de la tesis se refieren exclusivamente a muestras del “lado seco” de la curva de compactación.

De forma preliminar a los ensayos que forman el núcleo de la tesis se han realizado una serie de ensayos, que se pueden considerar como tradicionales, para acotar el comportamiento de este material. Estos ensayos han sido:

- Ensayos edométricos de colapso por inundación;
- ensayos edométricos con succión controlada;
- ensayos de compresión isótropa en condiciones saturadas;
- ensayos triaxiales tipo CD en condiciones saturadas.

Los ensayos edométricos de colapso por inundación han permitido obtener una idea preliminar de la magnitud del colapso de muestras fabricadas con diversas humedades y densidades iniciales. Los resultados obtenidos confirman las tendencias ya conocidas de que la deformación por colapso aumenta al disminuir la densidad seca inicial y al aumentar la succión inicial del material.

Los ensayo de colapso con control de succión han permitido constatar que la deformación de la muestra tras la carga con humedad constante y la inundación posterior de la muestra es parecida a la obtenida tras un proceso de carga a succión constante seguida de una reducción de la succión por escalones. Sin embargo, en los ensayos con succión controlada la deformación durante el proceso de carga ha sido siempre menor que la deformación medida en los ensayos con carga a humedad constante (la reducción de la succión durante este proceso de carga no se controla).

Los ensayos de compresión isótropa en condiciones saturadas han permitido la obtención de la “presión de preconsolidación” en condiciones isótropas y saturadas (p_0^*), asociada con diferentes estados del suelo tras la compactación. Por otra parte, en estos ensayos se ha obtenido el valor de compresibilidad en condiciones saturadas ($\lambda(0)$ y κ), que no depende de las condiciones iniciales del suelo. El conocimiento de la tensión isótropa de compactación y la succión inicial, así como de p_0^* , permite conocer dos puntos de la superficie de fluencia inicial del material, que junto con el conocimiento de $\lambda(0)$ y κ facilitan el ajuste del resto de parámetros que definen la forma de la superficie de fluencia.

Los ensayos de rotura saturados en condiciones drenadas han permitido obtener datos acerca de la pendiente de la envolvente de rotura ($M = 1.15$) y de los módulos elásticos, que se han comprobado que varían con el nivel de confinamiento. El análisis de las curvas de deformación volumétrica–tensión media efectiva y desviador–deformación axial ha permitido obtener más puntos de la superficie de fluencia del suelo tanto en el plano $p : s$ como $p : q$.

Esta serie de ensayos preliminares también ha permitido encontrar parámetros que rigen el comportamiento del suelo en condiciones saturadas como el coeficiente de consolidación y la permeabilidad del material a diferentes estados de densidad.

7.1.2 Equipo de laboratorio desarrollado

En el laboratorio de Geotecnia del Departamento de Ingeniería del Terreno de la UPC se ha trabajado desde hace tiempo con equipos edométricos y triaxiales con succión controlada (Josa, 1988; Balmaceda, 1991; Yuk Gehling, 1994; Romero, 1999; Carvalho, 2002). Parte de estos equipos se han utilizado en los ensayos preliminares de caracterización, sin embargo, como nueva aportación durante el desarrollo de la presente tesis se ha desarrollado una nueva célula edométrica y se ha acabado la puesta a punto del equipo triaxial utilizado por Romero (1999) para poder realizar ensayos de rotura a compresión triaxial con succión controlada.

La nueva célula edométrica desarrollada presenta las siguientes características innovadoras respecto a las células tradicionales:

- Alta rigidez frente a cambios de tensión vertical.
- Posibilidad de aplicar succiones mediante la técnica de traslación de ejes (rango de 0 a 1.5 MPa) o mediante control de humedad relativa del aire (rango entre 4 y 500 MPa). Hay que señalar que esta última opción no se ha utilizado durante el desarrollo de este trabajo.
- Aplicación neumática de la carga, que permite opcionalmente la aplicación de presiones verticales hasta el doble de la presión máxima del sistema de aire comprimido.

El equipo edométrico permite la medida de muy pequeños cambios de volumen (resolución del orden del 0.01 %). Sin embargo, presenta la limitación asociada con el desconocimiento del valor de las tensiones horizontales, lo que hace difícil la interpretación de los ensayos en el marco de un modelo constitutivo basado en la relación entre la tensión media y las deformaciones.

Con relación al equipo triaxial, se acabó de poner a punto el sistema automático de control de registro de la tensión desviadora (a través de una minicélula de carga y un sistema de aplicación hidráulica de presión), que por otra parte permite realizar ensayos con control de la velocidad de deformación. La puesta a punto del equipo supuso la necesidad de realizar la calibración de los diversos sistemas de medida entre los que cabe destacar el sistema láser de medida de la deformación radial. Este sistema permite la medida continua de la deformación radial en un punto de la probeta y la realización de perfiles de deformación a lo largo de la altura de la muestra cada cierto tiempo. Estas últimas medidas permiten evaluar el cambio de volumen global de la probeta. Hay que señalar que la robustez del equipo utilizado junto con el empleo de piedras porosas de alto

valor de entrada de aire (1.5 MPa) ha permitido la realización de ensayos con un rango de succión que supera el MPa, lo que no resulta habitual en este tipo de equipos.

7.1.3 Resultados de los ensayos mecánicos con succión controlada

a) Ensayos edométricos

Se han realizado ensayos sobre muestras compactadas con diversas humedades y carga isotrópica de compactación. En los ensayos se han seguido trayectorias de aumento de carga y disminución de succión (análogas a las de los ensayos de colapso) seguidas de trayectorias de secado, ciclos de carga y descarga a succión constante, reducción de la succión y nuevo ciclo de carga y descarga bajo la succión mínima aplicada en la primera reducción de succión. La forma de esta trayectoria ha sido elegida para permitir estudiar el comportamiento del suelo en ciclos de carga–descarga y de humedecimiento–secado tanto en régimen elástico como elastoplástico. Por otra parte, la trayectoria seguida permite fijar la posición de la superficie de fluencia y obtener posteriormente un nuevo punto de cruce de esta superficie. Pese a la dificultad que entraña el desconocimiento de las tensiones horizontales se ha comprobado que el suelo sigue de forma cualitativa lo establecido en el modelo BBM.

Hay que resaltar que las deformaciones volumétricas de colapso se concentran en el rango de succión más bajo mientras que en los rangos altos de succión las deformaciones al reducir la succión son muy bajas. Este hecho indica que la pendiente de la curva LC tiende a hacerse vertical para succiones por encima de unos 0.2 MPa. Por otra parte, por encima de estas succiones los cambios de volumen de agua son muy pequeños.

El acoplamiento entre los fenómenos mecánicos e hidráulicos se ha puesto de manifiesto a través de los gráficos de tipo SWEP. En estos gráficos puede comprobarse que los cambios de volumen de poros (Δe) y de volumen de agua (Δe_w) siguen diferentes pautas según el tipo de acción aplicada sobre el suelo y el estado del mismo. En trayectorias de colapso se observa cómo una vez que se entra en régimen de deformaciones plásticas las trayectorias seguidas sobre el plano $e_w : e$ tienden a ser perpendiculares a las líneas de igual grado de saturación (e_w/e). En las trayectorias de carga se observa reducción del volumen de agua (e_w) asociadas con las disminuciones de volumen de poros (e), que tienden a seguir un grado de saturación (e_w/e) aproximadamente constante en el rango elástico. Cuando el suelo plastifica en estas trayectorias de carga, el grado de saturación suele

presentar un aumento considerable. Las trayectorias de descarga finales tienden a ser paralelas a las líneas de grado de saturación (e aumenta y entra agua en el suelo), mientras que las trayectorias de secado y posterior humedecimiento tienden a ser horizontales (casi no se observa cambio de volumen mientras entra o sale agua).

b) Ensayos con estado de carga isótropo y succión controlada

En estos ensayos se ha seguido trayectorias análogas a los ensayos edométricos pero manteniendo estados de carga isótropos, lo que ha permitido controlar el estado tensional del suelo. Estos ensayos se han realizado en dos tipos de equipos.

En primer lugar se utilizó una mini-célula donde el cambio de volumen de una probeta de dimensiones muy reducidas se medía a través de la cantidad de agua que entraba o salía de la célula cuyas paredes eran muy rígidas. Las pequeñas dimensiones de la probeta ($\phi = 20$ mm, $h = 20$ mm) se eligieron para minimizar el tiempo de equilibrado tras los cambios de carga o succión. Las reducidas dimensiones de las probetas han limitado la resolución del sistema de medida de los cambios de volumen del suelo en $\varepsilon_v = 0.3$ %. Esta resolución ha dificultado obtener resultados óptimos en el caso de tener muestras rígidas en estado sobreconsolidado.

El segundo tipo de ensayo con carga isótropa se realizó en la célula triaxial con succión controlada. Este equipo presenta una mejor resolución en la medida de los cambios de volumen pero con tiempos de equilibrado de succión del orden de 15 días. Por otra parte, en este equipo se pueden medir de forma diferenciada la deformación vertical y radial.

Los resultados de estos ensayos interpretados en términos de cambios de volumen siguen las pautas establecidas por el modelo BBM y permiten obtener los parámetros del mismo de forma fiable, especialmente en los ensayos realizados en el triaxial. Sin embargo, hay que indicar que en las trayectorias de humedecimiento bajo cargas inferiores a la de compactación realizadas en la mini-célula isótropa, las deformaciones de colapso han aparecido a succiones más altas que las predichas por el modelo. En el resto de los ensayos, las pautas de cruce de la superficie de fluencia han resultado estar de acuerdo con las predicciones de dicho modelo.

Por otra parte se ha constatado nuevamente un fuerte acoplamiento entre las deformaciones y los cambios de humedad. En trayectorias de reducción de succión se ha observado un cambio brusco de pendiente en la relación $e_w : \ln(u_a - u_w)$ cuando el suelo empieza a colapsar. Este cambio de pendiente también se observa en la relación $e_w : \ln(\sigma_m - u_a)$ cuando se supera la presión de preconsolidación.

Las deformaciones y los cambios de humedad medidos en los dos tipos de células han sido similares salvo en lo referente a la primera etapa de aumento de carga isotropa, donde las deformaciones medidas en la mini-célula isotropa han sido mucho mayores que las medidas en el equipo triaxial. Esta discrepancia puede explicarse por los problemas de acoplamiento entre los diferentes elementos y por la compresibilidad del sistema de medida debido a la existencia de aire, a pesar de la etapa de desaireación inicial. Sin embargo, en lo relativo a la medida del volumen de agua en la muestra hay que señalar que en todos los ensayos las discrepancias entre los valores de la humedad final medida en el horno y la medida en los ensayos han sido muy pequeñas.

En los ensayos triaxiales se ha podido constatar que en las trayectorias de colapso la deformación ha sido isotropa. En las trayectorias de aumento de carga de confinamiento las deformaciones han sido fundamentalmente isotropas, aunque en algunos ensayos se han medido pequeñas discrepancias entre las deformaciones axiales y radiales.

c) Ensayos de compresión triaxial

Se han realizado ensayos de compresión triaxial con distintos valores de succión y sobre muestras con diversas historias de tensión y succión. Además de los ensayos en condiciones saturadas, se han realizado ensayos con varios niveles de succión a fin de obtener el efecto de la misma sobre la resistencia y rigidez del suelo. Ello ha permitido constatar que la pendiente de la envolvente de rotura cambia poco con la succión. Para el rango de succiones empleado puede decirse que la cohesión aparente del suelo varía linealmente con la succión.

A través de las curvas deformación axial–desviador se ha podido obtener el valor de los módulos elásticos del suelo en diferentes rangos de succión y nivel de confinamiento. En las mismas curvas se ha podido detectar los puntos de plastificación en las muestras sobreconsolidadas y se ha podido comprobar que estos puntos son coherentes con los obtenidos a partir de las curvas deformación volumétrica–presión media durante la fase de corte.

Se han ensayado muestras sobreconsolidadas a través de acciones mecánicas e hidráulicas. En el primer caso se ha realizado un ciclo de carga–descarga en términos de tensión media de confinamiento. En el segundo caso se han seguido dos procedimientos alternativos: a) siguiendo una trayectoria de secado-humedecimiento, que ha originado sobre la muestra una deformación irre recuperable por retracción debida al fuerte incremento de la succión; y b) siguiendo una trayectoria de humedecimiento-secado con el desarrollo de deformaciones irre recuperables de colapso.

Los resultados de estas tres muestras junto con las ensayadas en condiciones normalmente consolidadas han seguido las previsiones del modelo BBM. Los puntos de la superficie de fluencia que se han obtenido al analizar las curvas deformación axial–desviador confirman, en los tres casos mencionados, la rigidización debida a las deformaciones plásticas producidas por los diversos mecanismos. La deformación volumétrica durante la fase de corte presenta una fase inicial contractante seguida de una fase final con una dilatación más o menos marcada según se trate de muestras con un cierto grado de sobreconsolidación o normalmente consolidadas. Hay que señalar que se han registrado aumentos de volumen en muestras normalmente consolidadas en deformaciones axiales por encima del 15 %. Este tipo de fenómeno no es compatible con el modelo elastoplástico que se ha utilizado como referencia. Sin embargo hay que tener presente que para esos altos niveles de deformación axial pueden aparecer errores en la medida de los cambios de volumen (por ejemplo, debido a la aparición de pequeños pliegues en la membrana de látex).

Se ha observado sistemáticamente que durante la fase de corte se produce expulsión de agua, sin embargo el cambio de humedad se hace muy pequeño a partir de cuando comienza la fase dilatante. En la fase contractante, en general, se observan aumentos en el grado de saturación (el suelo disminuye un volumen mayor a la del agua que sale del mismo). Por otro lado, la fase dilatante se desarrolla con disminución del grado de saturación.

Las líneas de estado crítico (en el plano $v : \ln(\sigma_m - u_a)$) obtenidas para diferentes succiones presentan pendientes algo diferentes, que es mayor en el caso de la succión elevada.

7.2 Líneas futuras de investigación

El trabajo realizado por una parte puede complementarse ampliando el campo objeto de estudio y, por otra parte, abriendo nuevas líneas de trabajo como consecuencia de alguno de los resultados obtenidos.

Como ampliación del objeto de estudio puede contemplarse la ejecución de ensayos sobre muestras del mismo suelo compactadas con una humedad por encima de la del óptimo. Ello permitiría constatar si la estructura creada en esas condiciones tiene un comportamiento que pueda o no explicarse con el mismo modelo y los mismos parámetros derivados de los ensayos realizados sobre muestras compactadas del lado seco.

Otra posible aplicación del trabajo sería el estudio de la anisotropía y su posible borrado en trayectorias de humedecimiento, secado y carga. Las muestras se fabricarían con un proceso de compactación anisótropo con control de tensiones, de desplazamiento o combinado.

Desde el punto de vista de la utilización de los medios experimentales, las técnicas de ensayo desarrolladas podrían mejorarse. Las mejoras podrían dirigirse al desarrollo de un sistema edométrico con medida de tensiones laterales, ya sea con posibilidad de compensación radial o pasivo. Este equipo permitiría ampliar el conocimiento de la evolución de K_0 con la succión. Con respecto al equipo triaxial, una posible mejora sería la aplicación de la succión mediante flujo de aire húmedo. Ello permitiría ensayar muestras arcillosas en un rango más alto de succión y realizar los ciclos de secado intenso y humedecimiento dentro de la célula. Asimismo, la incorporación de sistemas piezoeléctricos (bender-element) situados en los cabezales de la muestra permitiría detectar los cambios de rigidez del suelo con la succión. Por otra parte, la utilización de tensiómetros de alta capacidad podría permitir elevar la velocidad de deformación / carga, tendiendo hacia la realización de ensayos en condiciones “no drenadas”. Finalmente, podría avanzarse en la automatización del proceso de medida de las deformaciones radiales mediante la utilización de motores paso a paso controlados por el ordenador.

En relación con el tipo de ensayo realizado, el equipo triaxial puesto a punto permite la realización de trayectorias más generales que las empleadas en esta tesis. Por ejemplo, la ejecución de ensayos de reducción de succión (colapso) mediante la aplicación de un desviador permitiría obtener pautas de la superficie de fluencia de forma alternativa a la empleada en la tesis.

El efecto de la sobreconsolidación por aumento de la succión sólo se ha estudiado en un ensayo, por lo que podría ser interesante realizar más ensayos de este tipo y profundizar en el análisis de la superficie de fluencia de incremento de succión.

El análisis más detallado de los resultados de los ensayos puede ayudar a la mejora de los modelos constitutivos existentes, en especial sería interesante profundizar tanto desde el punto de vista experimental (con nuevos ensayos si es el caso) como de modelación en el análisis del comportamiento dilatante observado en la fase final de los ensayos de corte.

Por último, los resultados de los ensayos analizados en términos de acoplamiento entre deformación y cambio de volumen de agua pueden ser de utilidad para el desarrollo de nuevos modelos, que tengan en cuenta el acoplamiento a nivel constitutivo entre los aspectos puramente mecánicos (tensión / deformación) e hidráulicos (succión / cambio de humedad).