

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

La Mecánica del Suelo se desarrolló inicialmente para estudiar los suelos saturados. Los estudios de estos suelos han sido abundantes, principalmente en los países desarrollados y de clima húmedo que han ofrecido grandes aportaciones al conocimiento de su comportamiento. Sin embargo, gran parte de las formaciones geológicas así como de las estructuras de tierra construidas por el hombre, están constituidas por materiales no saturados, existiendo incluso zonas en las que la condición de saturación no es ni siquiera previsible. Los suelos llamados problemáticos, tales como los suelos residuales, los suelos colapsables y los suelos expansivos, son ejemplos de materiales potencialmente no saturados. Estos suelos están sujetos a cambios de humedad de origen natural (variaciones climáticas) o artificial (actividad humana), que causan importantes modificaciones en su capacidad portante (resistencia y deformabilidad). Por ello, es preciso comprender el comportamiento geotécnico de los suelos naturales no saturados a fin de poder predecir, prevenir o minimizar accidentes naturales (inestabilidad de taludes, procesos de erosión y asentamientos).

Recientemente, tanto los suelos compactados como los rellenos de escombros han pasado a formar parte de los materiales no saturados a los que se enfrentan los ingenieros geotécnicos. Entender el comportamiento mecánico e hidráulico de estos suelos es de gran importancia para el diseño, construcción y mantenimiento de pavimentos, rellenos, diques, presas de tierra e incluso barreras de protección ambiental contra las emisiones contaminantes gaseosas y líquidas, ya que también están sometidos a cambios de humedad y modificaciones en su comportamiento a lo largo de su construcción y vida útil.

El estudio del comportamiento de los suelos no saturados ha sido objeto de numerosos trabajos de investigación en las últimas décadas, debido a las dificultades que implica la aplicación de la mecánica del suelo tradicional a los problemas geotécnicos que plantean estos suelos. Por ejemplo, el principio de las tensiones efectivas, que constituye uno de los puntos básicos del comportamiento

del suelo saturado, aplicado a los suelos no saturados presenta dificultades que todavía no están totalmente resueltas. Los problemas que entraña el conocimiento de la influencia de nuevas variables tensionales, como la succión, los fenómenos de histéresis respecto a los cambios de humedad, los fenómenos acoplados hidro-mecánicos, los problemas de flujo no lineales y otros aspectos del comportamiento de los suelos no saturados, han llevado a mantener la aplicación de la teoría de los suelos saturados en los estudios y proyectos geotécnicos.

Actualmente, la investigación profundiza en el estudio de los suelos no saturados y desarrolla una base teórica con nuevos conocimientos del comportamiento resistente, deformacional e hidráulico de estos suelos. Estos estudios pueden ser realizados a través de diferentes procedimientos:

- Observación directa del comportamiento del suelo o construcciones cimentadas sobre ellos, mediante instrumentación y ensayos de campo, determinándose los parámetros necesarios para los análisis.
- Realización de ensayos en laboratorio, procurando reproducir los fenómenos reales y analizando la influencia de determinados parámetros del suelo en su comportamiento. Es necesario con frecuencia desarrollar nuevos equipos de laboratorio que permitan el control del proceso de ensayo o la determinación de los parámetros más significativos.
- Elaboración de modelos generales de comportamiento que permitan predecir, con cierta fiabilidad y a partir del menor número posible de parámetros obtenidos en laboratorio, la respuesta del suelo a las sollicitaciones a las que se vea sometido.

La relación entre estos procedimientos es clave, ya que es necesario que los resultados de los modelos constitutivos reproduzcan fielmente el comportamiento real en campo o en laboratorio.

El estudio de un acoplamiento hidro-mecánico asociado con el comportamiento de cambio de volumen y el contenido de agua en suelos no saturados ha sido el objetivo de diversos estudios de investigación en los últimos años (Romero 1999, Rampino *et al.* 1999, Rampino *et al.* 2000, Wheeler & Sivakumar 2000). A pesar de los trabajos publicados sobre este tema, aún falta información sobre diversos aspectos de estos materiales que pueda contribuir a un mejor entendimiento del comportamiento que presentan estos suelos frente a cambios de tensión y de succión.

1.2 Objetivos y metodología de la investigación

El objetivo principal de esta investigación ha sido el estudio del comportamiento hidro-mecánico de un suelo colapsable asociado con los cambios de succión, tensión neta y tensión desviadora. Se ha diseñado y llevado a cabo un programa de investigación experimental para estudiar dichos aspectos. Se han realizado ensayos de laboratorio con una variedad de trayectorias tensionales y de succión para reproducir respuestas de interés, que ayuden en el avance del conocimiento sobre los suelos no saturados. Los resultados de los ensayos se han interpretado de acuerdo a un marco conceptual de endurecimiento elastoplástico (Alonso *et al.* 1990; Barcelona Basic Model: BBM).

Dentro del programa experimental, se ha desarrollado un procedimiento de fabricación de muestras con una densidad seca y una humedad prefijadas a través de una compactación estática isótropa (tensión controlada) en el interior de una célula triaxial, con el objeto de controlar la presión de preconsolidación en la estructura del suelo y evitar una fabricación anisótropa. Tras la compactación se ha medido la succión total de cada muestra mediante un psicrómetro de transistores. Con este procedimiento se consiguen probetas de suelo de distinta forma y tamaño, todas ellas con una estructura isótropa y con una historia tensional conocida desde el inicio de su fabricación. El material ensayado ha sido una arcilla roja de la ciudad de Barcelona. Según la clasificación del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, es una arcilla de bajo límite líquido ($w_L = 32\%$, $w_P = 16\%$), siendo su porcentaje de partículas de tamaño arcilloso, limoso y arenoso de 16.1 %, 44.5 % y 39.4 %, respectivamente.

Uno de los objetivos de esta investigación ha sido el diseño y construcción de una nueva célula edométrica con control de la succión matricial mediante la aplicación de la técnica de traslación de ejes. Se ha puesto a punto una célula triaxial existente con control de succión para la realización de ensayos de compresión triaxial a deformación controlada. La célula triaxial, totalmente instrumentada, permite registrar la evolución temporal de la tensión desviadora (a través una célula de carga interna compensada a presión), la humedad de la muestra (mediante dos buretas conectadas a ambos discos cerámicos de AVEA), las deformaciones axiales (con dos LVDT locales), las deformaciones radiales y las isócronas de los perfiles laterales (a través de sensores láser electro-ópticos) (Romero *et al.*, 1997; Romero, 1999; Barrera *et al.* 2002).

Asimismo, se ha estudiado el comportamiento de cambio de volumen (colapso, hinchamiento y retracción) de muestras normalmente consolidadas y sobreconsolidadas mediante ensayos

edométricos e isotropos con control de la succión (mini-célula isotropa y célula triaxial). Se ha analizado la influencia del estado inicial, así como los efectos de la tensión neta aplicada y los cambios de succión en el comportamiento volumétrico, la permeabilidad y las características de retención de agua. Es importante resaltar que son pocos los estudios sobre colapsabilidad que se han realizados bajo condiciones isotropas y triaxiales (Kato & Kawai, 2000; Barrera *et al.* 2000; Romero *et al.* 2002).

El programa de ensayos también se ha enfocado al estudio del comportamiento hidro-mecánico durante diferentes etapas de corte, así como a la determinación de los parámetros de resistencia al corte y al análisis de la respuesta mecánica tenso-deformacional. Es importante indicar, que pocos estudios experimentales se han centrado en dicho acoplamiento hidro-mecánico durante la etapa de corte (Rampino *et al.* 1999, Rampino *et al.* 2000, Wheeler & Sivakumar, 2000). Por otro lado, se han reportado pocos resultados experimentales con relación a la evolución de la deformación axial y radial en forma local y global durante la etapa de corte.

El estudio experimental del efecto de la aplicación de un desviador ha consistido en un programa de ensayos de compresión triaxial a velocidad de deformación constante siguiendo una trayectoria a succión y tensión neta lateral constante. Se han analizado muestras normalmente consolidadas y sobreconsolidadas. El estado sobreconsolidado se ha inducido por diferentes mecanismos previos a la etapa de corte; es decir, por un proceso mecánico de carga y descarga isotropa a succión constante; por un proceso hidráulico de humedecimiento y secado bajo tensión media neta constante, con una deformación de colapso dominante; y, finalmente, por otro proceso hidráulico de secado y humedecimiento bajo condiciones libres de retracción y expansión, con una deformación de retracción dominante. Las muestras normalmente consolidadas se han estudiado para el nivel máximo de tensión media neta experimentado por la muestra y en trayectorias previas de colapso.

El desarrollo de esta investigación se ha dividido básicamente en cuatro fases fundamentales:

- Revisión del estado del conocimiento en suelos no saturados, incluyendo técnicas de ensayos, técnicas y sistemas de medida de volumen y medida de los parámetros del suelo.
- Puesta a punto de los equipos experimentales. Esta fase incluye las modificaciones o adaptaciones de nuevos aparatos, las calibraciones de los equipos existentes (célula triaxial con control de succión y mini-célula isotropa rígida con control de succión) y la definición de la instrumentación requerida, así como el desarrollo de nuevos equipos (célula edométrica con control de succión).

- Desarrollo experimental. Estudio del comportamiento hidro-mecánico en suelos no saturados de tendencia colapsable mediante ensayos de laboratorio.
- Análisis e interpretación de los datos obtenidos en la fase anterior mediante un modelo de endurecimiento elastoplástico.

1.3 Desarrollo de la Tesis

La memoria de la tesis se ha dividido en 7 capítulos que se resumen a continuación:

El *capítulo 2* contiene el estado del conocimiento sobre el comportamiento de los suelos no saturados. Se comienza con una reseña histórica y generalidades de la mecánica de los suelos no saturados, así como de los fenómenos que los caracterizan, en particular el hinchamiento y el colapso, se continúa con el comportamiento deformacional y con la rigidez y la resistencia al corte. Posteriormente, se incluye una revisión de las técnicas experimentales de medida y aplicación de la succión, se analiza el estado tensional al que se ven sometidos dichos suelos y se presenta la teoría del modelo elastoplástico de Barcelona (Alonso *et al.* 1990; Barcelona Basic Model: BBM).

En el *capítulo 3* se describen los equipos de laboratorio desarrollados y utilizados, así como la instrumentación requerida y los diferentes métodos de calibración.

En el *capítulo 4* se describe el suelo usado durante la investigación y las diferentes técnicas de preparación de las muestras empleadas en los diferentes ensayos. Se analizan las diferentes curvas de compactación del suelo, las curvas de compactación estática bajo condiciones isotropas (técnica de tensión controlada) y las curvas de succión–grado de saturación obtenidas utilizando la técnica psicrométrica. Se presentan resultados de los ensayos previos de comportamiento deformacional (ensayos de colapso y de compresión isotropa) y la comparación del comportamiento de algunos resultados de estos ensayos experimentales utilizando el modelo de Alonso *et al.* (1990). Finalmente se presentan los resultados de resistencia al corte en condiciones saturadas.

En el *capítulo 5* se describen los métodos y las trayectorias tensionales realizadas dentro del programa de ensayos edométricos e isotropos con control de la succión, así como ensayos de compresión triaxial en muestras no saturadas.

En el *capítulo 6* se presentan los resultados de los ensayos y los análisis de los datos obtenidos. Inicialmente, se realiza un estudio particular de la respuesta de cada ensayo edométrico con control

de succión, y a continuación se hace un análisis de los ensayos isótropos con control de succión realizados tanto en una mini-célula isótropa como en un equipo triaxial. Posteriormente se presentan los resultados obtenidos de los ensayos de compresión triaxial con succión controlada a velocidad de deformación constante. Asimismo, se indican los resultados de la implementación del modelo elastoplástico utilizando algunos resultados experimentales.

Finalmente en el *capítulo 7* se presentan las principales conclusiones derivadas de este trabajo de investigación y se exponen algunas líneas futuras de investigación abiertas.

Dentro de la fase experimental se ha llevado a cabo el siguiente programa de ensayos:

Ensayos de caracterización del suelo estudiado:

- Análisis del tamaño de partículas y límites de consistencia.
- Análisis de difracción de rayos-X.
- Análisis de microscopía electrónica de barrido ambiental (ESEM) en diferentes estructuras obtenidas bajo un proceso de compactación isótropa y de ensayos de colapso.
- Análisis de porosimetría por intrusión de mercurio (MIP) en muestras normalmente consolidadas.
- Obtención de los parámetros de las curvas de compactación bajo diferentes valores de energía específica de compactación.
- Ensayos de compactación estática bajo tensión isótropa controlada y obtención de los contornos de igual succión en el plano del ensayo de compactación mediante la técnica psicrométrica.

Ensayos del comportamiento de cambio de volumen y resistencia al corte:

- Ensayos de colapso bajo inundación a carga vertical constante en muestras con diferentes condiciones de estado inicial. Edómetro convencional.
- Ensayos de colapso controlando la succión de la muestra hasta su total saturación bajo carga vertical neta constante. Nueva célula edométrica con control de la succión matricial y total.
- Ensayos de compresión isótropa en muestras saturadas, fabricadas a diferentes condiciones de humedad y densidad. Célula triaxial convencional.
- Ensayos triaxiales drenados en muestras saturadas, fabricadas a diferentes condiciones de estado inicial. Célula triaxial convencional.

Ensayos edométricos con succión controlada en muestras con diferentes condiciones de estado inicial. Nueva célula edométrica con control de succión:

- Trayectorias de carga–descarga a succión constante ($u_a-u_w = 0.3$ MPa y 0.05 MPa).
- Trayectorias de humedecimiento–secado bajo tensión vertical neta constante ($\sigma_v-u_a = 0.6$ MPa y 0.3 MPa).
- Trayectorias de humedecimiento a tensión vertical neta constante ($\sigma_v-u_a = 0.6$ MPa y 0.3 MPa).

Ensayos de carga isotrópica con succión controlada en diferentes muestras bajo unas condiciones iniciales específicas. Mini-célula isotrópica rígida con control de succión:

- Trayectorias de humedecimiento–secado a tensión media neta constante ($\sigma_m-u_a = 0.6$ MPa).
- Trayectorias de carga–descarga bajo succión constante ($u_a-u_w = 0.2$ MPa).
- Trayectorias de humedecimiento a tensión media neta constante ($\sigma_m-u_a = 0.2$ MPa y 0.3 MPa).

Ensayos de carga isotrópica y cambio de succión en la célula triaxial con control de succión:

- Trayectorias de carga–descarga a succión constante ($u_a-u_w = 0.15$ MPa y 0.02 MPa).
- Trayectorias de mojado–secado a tensión isotrópica media neta constante ($\sigma_m-u_a = 0.6$ MPa).
- Trayectorias de humedecimiento a tensión isotrópica media neta constante ($\sigma_m-u_a = 0.6$ MPa).

Ensayos de compresión triaxial a velocidad de deformación constante siguiendo una trayectoria a succión y tensión radial neta constantes. Célula triaxial con control de succión:

- Ensayos en muestras normalmente consolidadas. Estos ensayos fueron estudiados:
 - al nivel máximo de tensión media neta que haya experimentado la muestra;
 - y después de un previo fenómeno de colapso.
- Ensayos en muestras sobreconsolidadas, el estado fue inducido por diferentes mecanismos previos a la etapa de corte:
 - un proceso mecánico de carga–descarga isotrópica a succión constante;
 - un proceso hidráulico en trayectorias de humedecimiento–secado a tensión media neta constante ($\sigma_m-u_a = 0.6$ MPa) con una deformación de colapso dominante;
 - un elevado incremento–disminución de la succión total bajo condiciones libres de expansión y retracción, con una retracción dominante.