

Capítulo 1

Introducción y Objetivos de la Tesis

1.1 Introducción

La escollera o enrocamiento es un material que a lo largo de siglos se ha utilizado en la construcción de obras de infraestructura. Está constituido por materiales granulares con dimensiones que varían entre 0.5 y 2 m de diámetro. Este material ha sido principalmente utilizado en presas de escollera con pantalla impermeable. Un ejemplo histórico de este tipo de infraestructuras es la presa con núcleo impermeable y espaldones de escollera de Sadd-el-Kafara, construida en Egipto en el 2600 A.C. (Schnitter, 1994). La concepción moderna de las presas de escolleras nació en las montañas de Sierra Nevada en California. A mediados del siglo XIX, los mineros necesitaban presas en sitios inaccesibles de la Sierra, donde solo existían roca sólida y árboles. Los mineros conocían el uso de los explosivos, lo que condujo de manera natural a la construcción de presas de escolleras. Las primeras presas así construidas, se utilizaron para el almacenamiento de troncos de árboles. Más tarde se construyeron presas de escollera con pantallas de madera y hormigón. En el siglo XX, la construcción de presas fue impulsada primero por la necesidad de acumular agua para los regadíos, y posteriormente para la generación de energía eléctrica.

Hasta que Ralph R. Proctor (1894-1962) publicó en 1933 sus resultados sobre estudios de compactación, se comprendió la importancia de la compactación y el contenido de humedad óptimo del suelo. Se inició la práctica de compactar los suelos que conformaban el corazón impermeable de las presas, y posteriormente se optó también por compactar las zonas permeables constituidas por gravas y escolleras. En un inicio, las escolleras se

colocaban a volteo o se dejaban caer de alturas de 10 a 20 m, y en ocasiones se les agregaba agua para mejorar su acomodo (Marsal 1975, Maranha das Neves 2002). Con la aparición de los rodillos vibratorios en Europa en 1955, se pudo compactar por tongadas de espesor variable entre 0.6 y 2 m. El espesor dependía del tamaño máximo de las partículas de la escollera. Con el propósito de obtener una base científica más sólida en la práctica del diseño de las presas, fue necesario efectuar estudios más exhaustivos de las escolleras. Los primeros trabajos que constituyeron la base para el entendimiento del comportamiento de las escolleras fueron realizados por Fumagalli (1969), Marsal (1967), Marachi *et al.* (1969) y Nobari y Duncan (1972). En esos tiempos se realizaron inversiones considerables en la construcción de equipos edométricos y triaxiales, para ensayar materiales de tamaño lo más parecidos a los utilizados a escala natural. En la Figura 1.1 se muestra una foto del triaxial construido por Marachi *et al.* (1969). Sin embargo, con estos equipos no se llegó a ensayar el material a escala natural; lo que obligó a realizar estudios sobre el efecto de escala en las propiedades mecánicas de los materiales granulares. El cambio de las propiedades del material con la escala se debe al incremento de la rotura de partículas, cuanto más grande es la partícula más se rompe (Marsal 1963, Maranha das Neves 2002). Se han realizado importantes estudios del efecto escala, uno de los más reconocidos lo realizó Marachi *et al.* (1969). Su conclusión más importante fue que la resistencia al corte de las escolleras podía ser estimada con probetas formadas con material más pequeño, escalando geoméricamente la granulometría original. Posteriormente a este estudio, los equipos que se construyeron para ensayar las escolleras fueron de menor dimensión. La incertidumbre de si el efecto escala tiene un papel significativo en los materiales ensayados persiste en la actualidad, porque la hipótesis de Marachi *et al.* (1969) es muy simplista.

En las primeras investigaciones se encontró que la rotura de partículas tenía un papel fundamental en el comportamiento de las escolleras. Las granulometrías que resultan de las explotaciones de las canteras son muy uniformes, lo que provoca que existan pocos contactos entre las partículas. En la medida que disminuyen los puntos de contacto entre partículas, las tensiones de contacto se elevan y pueden generarse tensiones mayores a la resistencia de la roca, que provocan la rotura de partículas. Por la razón anterior, se justificó el uso de las granulometrías bien graduadas para disminuir la rotura de partículas. En ocasiones sólo existe material de baja calidad para utilizarse como escollera, en las zonas cercanas a una presa. La utilización de este material puede generar grandes

deformaciones, que van en detrimento de la estabilidad y funcionalidad de la presa. Para evitar los grandes costes generados por el transporte del material desde zonas más alejadas, en las que se encuentre material de mejor calidad, se ha optado por usar gravas y arenas extraídas del cauce del río en que se construirá la presa; excepto para las protecciones contra el oleaje de los taludes aguas arriba (Marsal 1975b). La solución anterior se ha empleado con buenos resultados en las presas Adolfo Ruiz Cortines y Miguel Hidalgo en México (Marsal 1975b).

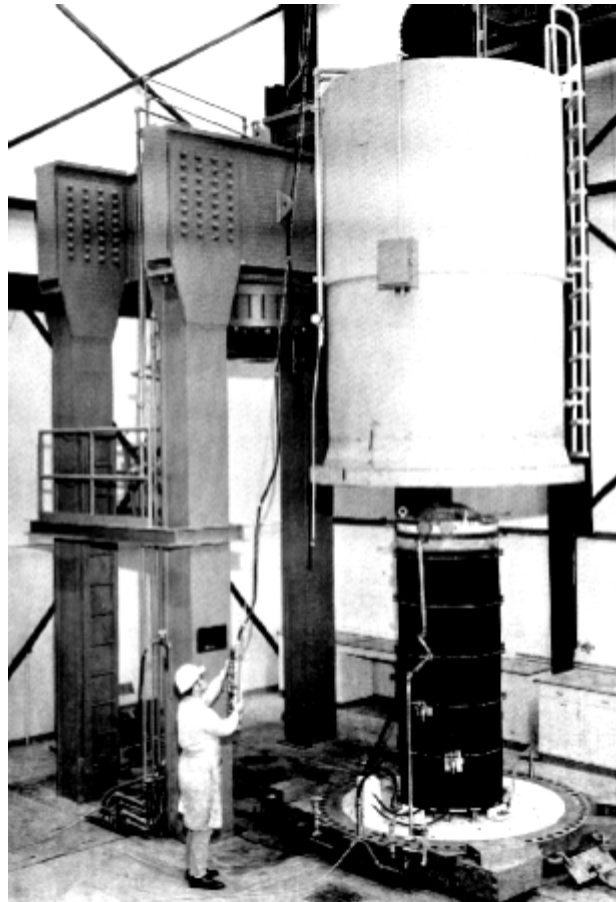


Figura 1.1 Triaxial de grandes dimensiones con diámetro de 0.91 m y altura de 2.28 m. Marachi *et al.* (1969).

Uno de los puntos más críticos de estabilidad que tiene que superar una presa es su llenado. Se generan grandes deformaciones y gran parte de éstas se desarrollan en el material de escollera que sirve de respaldo. El origen de estas deformaciones es el cambio de resistencia de las partículas por el humedecimiento (Marsal 1975). Recientemente ha sido atribuida al incremento de la velocidad de propagación de las fisuras en las partículas

del material (Oldecop y Alonso 2001). La rotura de partículas genera deformaciones adicionales y redistribución de las tensiones. Es importante limitar las deformaciones en las escolleras por cuestiones de estética y funcionalidad. Puede existir el caso en análisis de estabilidad donde el factor de seguridad sea mayor que la unidad, pero las deformaciones sean tan grandes que provocan cambios severos en su configuración (Resendiz y Romo 1975). Las deformaciones diferenciales entre el núcleo central impermeable y los espaldones de escollera pueden conducir a la generación de grietas (Resendiz y Romo 1975). La presa de Infiernillo en México es un ejemplo clásico, en la que se produjeron deformaciones en la etapa de llenado y posteriormente en épocas de lluvias de gran intensidad. Es una presa de núcleo central de arcilla y espaldones de escolleras de diorita y conglomerado compactado (Marsal *et al.* 1976).

Los estudios en materiales de escollera pueden ser extrapolados directamente a pedraplenes de carreteras y ferrocarriles. Este tipo de obras no están sometidas a inundaciones como las presas, debido a que no es su función. Además, para evitar situaciones extremas de este tipo, se construyen obras de drenaje como práctica usual. Pero en zonas donde se producen lluvias de gran intensidad en periodos cortos se puede generar inestabilidades y asentamientos considerables (Marsal 1972). Como ejemplo de esta situación, Soriano y Sánchez (1999) observaron deformaciones ocasionadas por lluvias intensas, en un terraplén de 40 m de altura construido para la línea de tren de alta velocidad Sevilla-Madrid. El terraplén está construido con escolleras de pizarra y esquistos.

En las capas de base y sub-base de pavimentos los materiales granulares son muy usados. Es conocido que el cambio de humedad altera las propiedades mecánicas de estas capas. El módulo de resiliencia disminuye en la medida que el contenido de humedad aumenta (Lekarp *et al.* 2000). Así mismo, las deformaciones permanentes se incrementan de una manera significativa cuando aumenta el contenido de humedad (Lekarp *et al.* 2000b). Este tipo de conclusiones pueden ser extendidas para la utilización de balasto en las vías férreas, con el agravante que el basalto está directamente sometido a las variaciones del clima.

En los estudios clásicos donde se estudia la influencia de la humedad en el comportamiento de los materiales, se ensayan dos condiciones de humedad: la saturada y la no saturada. El material no saturado se ensaya con un contenido de humedad higroscópico correspondiente

a la humedad relativa del ambiente donde se utilizará el material (Lee *et al.* 1967, Fumagalli 1969, Nobari y Duncan 1972, Marsal 1972, Veiga Pinto 1983). Como ejemplo de la diferencia que existe en el comportamiento de materiales granulares saturados y secos, se muestran en la Figura 1.2 los resultados de dos ensayos triaxiales drenados realizados por Nobari y Duncan (1972). Los ensayos se realizaron con una arena gruesa que pertenecía a la presa de Pyramid, a una presión de confinamiento de 3 kg/cm^2 . En estos resultados se observa claramente que la resistencia al corte del material seco es mayor que la del material saturado; así mismo la dilatancia es mayor en el material seco.

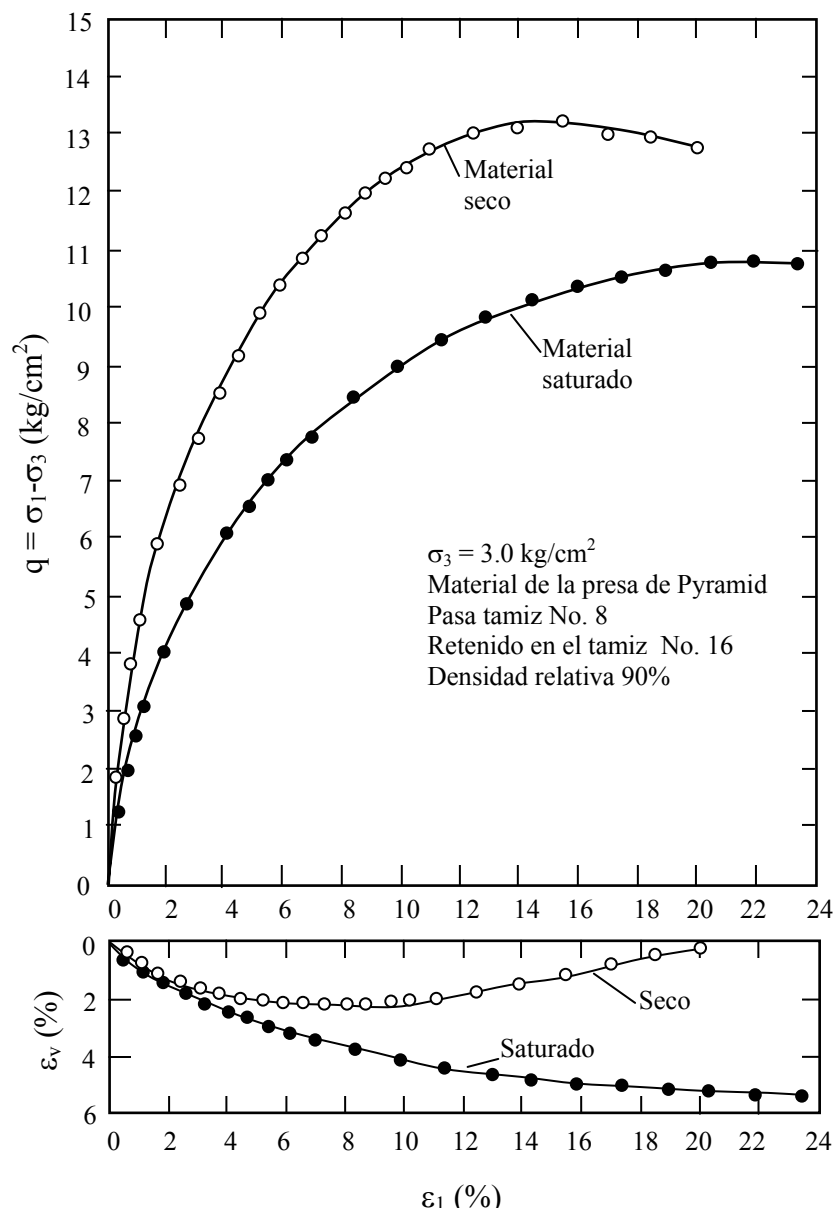


Figura 1.2. Resultados de ensayos triaxiales drenados con material seco y saturado de argilita triturada (Nobari y Duncan 1972). $\sigma_3 = 3.0 \text{ kg/cm}^2$.

En la construcción de pedraplenes es primordial acelerar los asentamientos durante la construcción y minimizar las deformaciones una vez terminado la obra. Como práctica convencional, se humedece el material cuando se compacta para disminuir las deformaciones posconstrucción (Marsal 1972, Maranha das Neves 2002). Esta práctica surgió en base a ensayos experimentales; como por ejemplo los realizados por Marsal (1972). Se ensayó material calizo en un edómetro. Los ensayos se iniciaron con el material secado en condiciones ambientales, se cargó hasta una tensión vertical constante de 0.55 MPa y se humedeció. La cantidad de agua para humedecer el material se fue incrementando en cada ensayo. Los resultados de la deformación en compresión se muestran en la Figura 1.3, y como referencia se grafican los resultados de los ensayos inicialmente saturados y de los ensayos sobre material seco. El estudio indica que existe una cantidad de agua, para la cual la deformación final del material humedecido se iguala a la que corresponde al ensayo saturado.

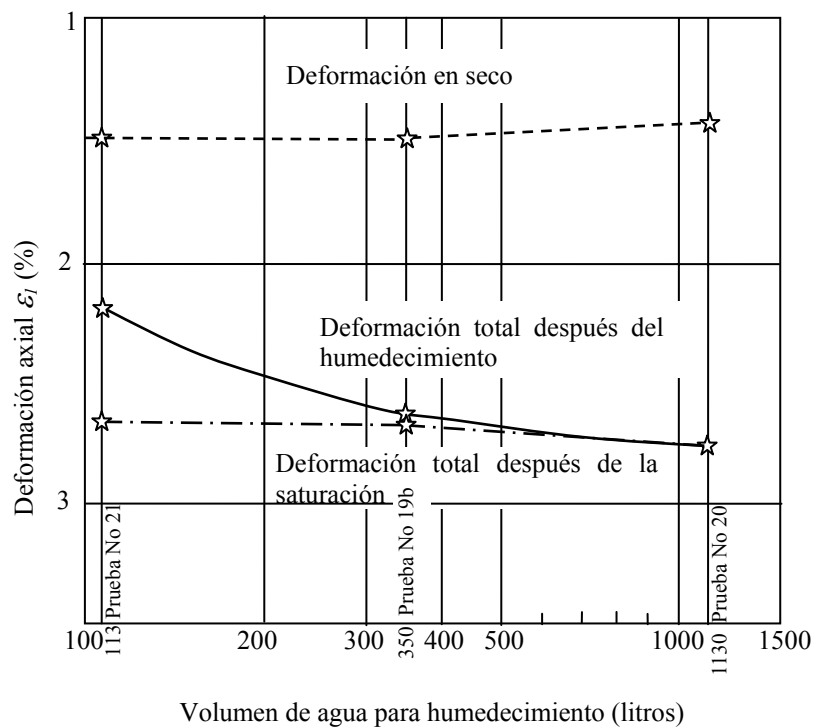


Figura 1.3 Ensayos edométricos de humedecimiento en caliza de la Angostura. Marsal (1972).

Más recientemente en el contexto de los suelos no-saturados, se han hecho investigaciones para entender la influencia del contenido de humedad en la compresibilidad de escolleras

(Oldecop 2000, Oldecop y Alonso 2001). La parte experimental novedosa del estudio consistió en controlar el contenido de humedad del material mediante la imposición de una humedad relativa en la probeta. Se observó un incremento de la compresibilidad del material a medida que la humedad se incrementa. En el estudio se observó que con el humedeciendo de las partículas de material en un ambiente cercano a una humedad relativa del 100%, se obtiene una deformación equivalente a la que se produce sobre un material saturado.

Uno de los objetivos de los investigadores en mecánica de suelos ha sido desarrollar herramientas cada vez más completas para el diseño de estructuras de tierra. El método de los elementos finitos ha sido utilizado ampliamente con el propósito de predecir el comportamiento de escolleras (Duncan y Chang 1970, Nobari y Duncan 1972, Alberro 1975, Veiga Pinto 1983, Maranha das Neves y Veiga Pinto 1988). El método de los elementos finitos es una herramienta muy potente, pero su eficiencia depende de las leyes constitutivas de que disponga el código utilizado. En el caso particular de escolleras, generalmente se ha utilizado la ecuación hiperbólica propuesta por Kodner (1963), en ausencia de ecuaciones constitutivas más apropiadas. Además, se desarrollaron rutinas numéricas para introducir el efecto del agua en el material, como la desarrollada por Nobari y Duncan (1972) que utiliza la ecuación hiperbólica como base. El procedimiento consiste en aplicar unas fuerzas nodales equivalentes a la relajación de tensiones que produciría la saturación de un material seco.

Recientemente, Oldecop (2000) desarrolló una ecuación constitutiva elasto-plástica, basada en el análisis de los resultados obtenidos en ensayos edométricos. La ecuación reproduce la compresibilidad de escolleras no saturadas. Alonso y Oldecop (2000) extendieron el modelo de compresibilidad de escolleras a un espacio triaxial, con la ayuda de la superficie de fluencia tipo Cam-Clay y un criterio de rotura tipo Von Mises. El modelo se implementó en el programa CODE_BRIGTH, desarrollado para hacer análisis termo-hidro-mecánicos en medios porosos no saturados (Olivella *et al.* 1996). El modelo se ha utilizado en la reproducción de varios casos prácticos: la modelación de los ensayos edométricos realizados por Oldecop (2000) (Alonso y Oldecop, 2000), la modelación del comportamiento de la presa de Infiernillo (Alonso *et al.* 2003) y la modelación unidimensional del comportamiento de un terraplén de 40 m de altura sometido a lluvias

intensas (Alonso, 2003), localizado en la línea del AVE Madrid-Sevilla (Soriano y Sánchez, 1999). El modelo reproduce cuantitativamente bien los casos mencionados.

Sin embargo, la resistencia al corte juega un papel fundamental en la verificación de las condiciones de estabilidad de una presa y de otras estructuras construidas con materiales granulares gruesos. Por ello es necesario realizar ensayos triaxiales con control de humedad, y poder distinguir con claridad la influencia de la humedad en el comportamiento de las escolleras. La importancia de emprender nuevos estudios experimentales radica principalmente, en obtener información precisa aplicando los procedimientos utilizados en los suelos no saturados. Posteriormente, con el análisis de esta información plantear un modelo constitutivo en condiciones triaxiales, que pueda reproducir el efecto del cambio de la succión en las escolleras.

1.2 Objetivos del trabajo

Los principales objetivos del presente trabajo son los siguientes:

- Diseñar y construir un equipo triaxial de escolleras con control de succión, para probetas de 250 mm de diámetro y 500 mm de altura.
- Estudiar el cambio de comportamiento que experimenta el material granular, cuando se somete a ensayos triaxiales drenados y cambios de succión total.
- Con el análisis de los resultados de los ensayos y el conocimiento previo sobre el comportamiento y modelación de suelos granulares sometidas a elevadas tensiones, proponer un modelo constitutivo capaz de reproducir el comportamiento de las escolleras en estados de tensión triaxial teniendo en cuenta el efecto de la succión sobre el material.

En el Departamento de Ingeniería del Terreno de la UPC se inició el estudio de escolleras con control de succión bajo condiciones edométricas (Oldecop 2000, Oldecop y Alonso 2001). Se estudió el comportamiento de una pizarra. El estudio tuvo como finalidad evaluar la compresibilidad del material frente a los cambios de succión. Con los resultados obtenidos se planteó un modelo constitutivo de compresibilidad de escolleras. El presente estudio es una extensión del estudio edométrico. Debido a este antecedente se fijan algunos condicionales que vienen impuestos del estudio anterior como son: el material utilizado, su

granulometría, su compactación y el método de imposición de succión. Estos aspectos condicionaron también el diseño del equipo triaxial utilizado en el presente trabajo. Por otro lado, la ecuación constitutiva de compresibilidad de escolleras de Oldecop y Alonso (2001) se utilizó como base del modelo elasto-plástico presentado en este trabajo.

En el estudio experimental se llevaron a cabo ensayos de compresión triaxial drenados, saturados y no saturados. Se hicieron ensayos con control de deformación, para determinar las diferencias en el comportamiento del material saturado respecto al no saturado. Se aplicaron deformaciones axiales hasta del 20%, con el propósito de llevar el material a un estado lo más cercano posible al crítico. Conforme avanzó la investigación, se fueron diseñando componentes adicionales como son: la interfase aire-aceite y los transductores de medida local (LDT, Local Deformation Transducer). La interfase sirvió para realizar ensayos con tensión controlada, como las trayectorias p - q utilizadas para obtener la forma de la superficie de fluencia. Los LDT sirvieron para contrastar las mediciones de la deformación axial hechas con los transductores de desplazamiento instalados en el cabezal superior (LVDT, Lineal Variable Differential Transducer). El equipo desarrollado demostró su utilidad en general y es una buena base para que en el futuro se pueda automatizar por completo.

El propósito de la revisión bibliográfica que se presenta en el capítulo 2 fue el de reunir información para identificar las pautas a tener en cuenta para modelar el comportamiento triaxial de las escolleras, poniendo especial interés en la influencia de la succión. En la revisión hecha se encontró que existe una gran cantidad de ensayos triaxiales en arenas a bajas y altas presiones. También existen modelos constitutivos que reproducen adecuadamente el comportamiento de arenas. El comportamiento en arenas que se someten a grandes presiones es similar al de las escolleras, debido a la presencia de rotura de partículas (Biarez y Hicher 1994). Debido a este hecho, y la poca información de modelos constitutivos para escolleras, la revisión se inclinó más hacia las arenas sometidas a elevadas tensiones. La dependencia de la densidad en el comportamiento de los materiales granulares añade un grado de complejidad al desarrollo de modelos constitutivos; en la actualidad se utilizan parámetros de estado para superar este inconveniente. El parámetro de estado define la condición de densidad actual en referencia con el estado crítico. Se eligió que el desarrollo del modelo constitutivo para escolleras presentado en este

documento siguiera esta tendencia de modelación elasto-plástica. Por ello, solo se presenta el conocimiento conceptual y actual, que pueda servir para el desarrollo de un modelo elasto-plástico para escolleras que dependa de la densidad, y tome en cuenta la influencia de la succión. En la revisión bibliográfica se tiene cuidado en incluir cómo la rotura de partículas del material, así como el cambio de humedad en el material, pueden modificar el planteamiento de un modelo elasto-plástico.

1.3 Sinopsis del contenido de la tesis

El documento está formado por seis capítulos. Los capítulos 2 al 5 constituyen el cuerpo principal del documento; es en estos capítulos en donde se presenta cronológicamente el desarrollo de la investigación realizada. En los siguientes párrafos se detalla el contenido de cada uno de los capítulos. El presente capítulo es una breve introducción al tema. En el capítulo 6 se presentan las conclusiones que se derivan de la presente investigación, con una propuesta de líneas de investigación futuras que conduzcan a una mayor entendimiento del comportamiento de los materiales granulares gruesos sometidos a cambios de succión.

En el capítulo 2 se presenta la revisión bibliográfica. Se describe el comportamiento general de los materiales granulares bajo distintas condiciones de carga y contenido de humedad. Se presta un especial interés a las arenas sometidas a altas presiones, y cómo cambia su comportamiento cuando se presenta la rotura de partículas. Posteriormente, se describen las ideas básicas que pueden ser utilizadas para el planteamiento del modelo constitutivo elasto-plástico; éstas se tomaron de modelos desarrollados principalmente para arenas, y algunas otras, de modelos de escolleras. Estas ideas sirven de base para plantear el modelo constitutivo que se presenta en el capítulo 5.

El capítulo 3 contiene una reseña de las ideas que condujeron al diseño final de la célula triaxial de escolleras con control de succión. Un apartado interesante de este capítulo lo constituye el diseño de las células de medición diametral (CMD); donde se presenta también, un análisis teórico de las deformaciones de este transductor. Los resultados del análisis teórico se comparan con las mediciones hechas con las galgas extensométricas instaladas en el transductor. Así mismo, se presentan las características principales de los siguientes equipos: sistema de adquisición de datos, transductores utilizados, prensa de

aplicación de carga, y equipos auxiliares necesarios para el montaje y manejo de la célula triaxial. Por último se describe con detalle el sistema de aplicación de humedad relativa.

El programa experimental se describe con detalle en el capítulo 4. Se comienza con la caracterización del material utilizado, en donde se presentan características como la granulometría, las propiedades índices y la curva de retención. Después se explican las trayectorias seguidas en cada uno de los ensayos, ya sea controlando la deformación y con humedad relativa variable para ver la influencia de la succión, o controlando la tensión, para determinar la forma de la superficie de fluencia. Los ensayos con deformación controlada se llevaron hasta una deformación axial del 20% para verificar la existencia del estado crítico. Se muestra la forma de la superficie de fluencia para materiales en condición saturada y no saturada. Se presentan también los resultados de los ensayos isotropos para determinar los parámetros del modelo de Oldecop y Alonso (2001). Por último se estima la penetración de membrana en las etapas de compresión isotropa y de corte.

En la primera parte del capítulo 5 se hace un análisis de los resultados obtenidos, con el objeto de deducir las características más importantes de su comportamiento, y que ayuden al planteamiento de un modelo constitutivo. En la segunda parte del capítulo 5 se presenta el modelo constitutivo para escolleras, formulado para tomar en cuenta los efectos de la succión. La propuesta se basa en las ideas recopiladas en el capítulo 2 para modelar materiales granulares y en el análisis hecho en la primera parte del capítulo 5. Posteriormente, se presentan los resultados de la reproducción de los ensayos triaxiales con el modelo planteado. En el anexo del capítulo 5 se describe la teoría de la plasticidad utilizando dos superficies; se presenta también las derivadas necesarias para la implementación del modelo.

