



Departamento de Ingeniería del Terreno,
Cartográfica y Geofísica

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DEL
COMPORTAMIENTO HIDROMECÁNICO DE
UNA ARCILLA COMPACTADA.

TESIS DOCTORAL

Presentada por:
Carlos Manuel Buenfil Berzunza

Directores de tesis:
Antonio Lloret Morancho
Antonio Gens Solé

Barcelona, Septiembre de 2007

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS DE LA TESIS.

1.1 Introducción y antecedentes.

La compactación es ampliamente utilizada sobre los suelos requeridos en la construcción de presas, carreteras, terraplenes, etc., con el fin de proporcionarles propiedades mecánicas adecuadas. También, algunas veces se usa para mejorar el terreno natural para cimentaciones. La compactación de suelo puede ser definida como la aplicación de acciones mecánicas al suelo, provocando reacomodo de sus partículas sólidas, que resulta en un rápido incremento de su densidad. Este proceso comprende la reducción de volumen total por la expulsión de aire que ocupa los poros del suelo, manteniendo la cantidad de agua constante.

Proctor (1933) publicó un estudio sobre la compactación de suelos donde se apreciaron los factores que intervienen en la compactación. Los factores condicionantes del proceso de compactación generalmente aceptados son: humedad de compactación, método de compactación, energía de compactación y tipo de suelo. Tradicionalmente, para una energía dada, el resultado del proceso de compactación se refleja en la llamada curva de compactación representada en el plano ρ_d-w . Esta curva muestra un máximo absoluto asociado a una humedad óptima que algunas veces está acompañado de otro secundario de menor valor. La sección de la curva que presenta menores contenidos de agua que el contenido óptimo se denomina “lado seco” y la que presenta mayores valores “lado húmedo”. Un aumento de la energía de compactación incrementa la densidad seca máxima y desplaza, hacia valores bajos, el contenido de agua óptimo de compactación. Extensas descripciones sobre las condiciones de compactación son dadas en Rico y del Castillo (1974), Jiménez Salas (1980) y Balmaceda A. (1991).

Las condiciones de compactación y el comportamiento de suelos compactados bajo distintas trayectorias de tensiones y cambios de contenidos de humedad es un tema que ha recibido gran atención por parte de los ingenieros, existiendo un gran número de trabajos y discusiones

reportados sobre el tema. El amplio cuerpo de conocimiento, sobre la compactación, acumulado en años tiene, en gran medida, un fuerte carácter empírico y está muy ligado a la solución de problemas de diseño y construcción de obras de tierra. Como señalan Mendoza y Alberro (1992), tradicionalmente la compactación de suelos ha sido tratada como una caja negra, relacionando empíricamente las condiciones de compactación (causa) con las propiedades mecánicas del suelo compactado (efecto). Ello ha contribuido a la resolución de problemas prácticos sobre el comportamiento de los suelos compactados. Sin embargo, esta forma de abordar el tema no da respuestas acerca de las causas de ese comportamiento.

En los últimos años se han reportado un gran número de trabajos de investigación cuyos objetivos son principalmente aportar un mejor conocimiento de los suelos compactados con base a modelos de comportamiento. Estos modelos de comportamiento permiten establecer patrones consistentes en el comportamiento de los suelos compactados, integrar resultados experimentales dentro de un esquema ordenado e identificar con mayor facilidad las tendencias existentes. Asimismo, los trabajos experimentales proporcionan la información requerida para crear, mejorar o validar modelos de comportamiento del suelo.

Los suelos compactados están en condiciones “no saturadas” durante su construcción y operación. Según Barden (1965) es razonable aceptar ciertas similitudes de comportamiento entre los suelos compactados y los suelos naturales desecados. En ambos casos, su comportamiento se ve afectado por la presencia de agua y aire en los poros, lo cual repercute en la existencia de una mezcla de fluidos más comprensible y la influencia de las presiones de aire y agua sobre el estado de tensiones. A pesar de la clara evidencia de estas influencias en raras ocasiones el comportamiento del suelo compactado se estudia teniendo en cuenta el efecto de la succión.

Las primeras investigaciones sobre mecánica del suelo fueron encaminadas al conocimiento de suelos saturados, quedando los suelos no saturados relegados a un segundo plano. Los suelos parcialmente saturados son de naturaleza diversa, como arcillas expansivas muy plásticas (con hinchamiento y retracción en ciclos de mojado y secado), suelos colapsables (cuando presentan una estructura abierta), suelos compactados, etc. Muchos de estos problemas se trataron de resolver y estudiar por separado como un problema especial, tal y como señalan Alonso et al.

(1987). Sin embargo, los mismos autores, proponen un estudio global de dichos suelos desde la perspectiva del comportamiento controlado por la succión, como nexo de unión entre los diversos fenómenos característicos de los suelos parcialmente saturados. En las dos últimas décadas se han estado realizando extensos estudios sobre diversos aspectos de los suelos no.

La fábrica de los suelos tiene una gran influencia sobre su comportamiento mecánico, especialmente en suelos no saturados. En este sentido, varios investigadores concluyen que la fábrica de los suelos compactados está condicionada por factores tales como la humedad y la energía de compactación. Lambe (1958) y Seed y Chan (1959) asumieron que los suelos compactados con contenido de agua del lado seco del óptimo poseen una estructura floculada y para los compactados en el lado húmedo presentan una estructura dispersa. Estas ideas han permanecido en los textos durante años pero recientemente han evolucionado gracias a los trabajos realizados usando métodos de observación directa más avanzados (como microscopio electrónico de barrido, SEM) y estudios de porosimetría como los efectuados por Diamond (1970); Ahmed et al. (1974); Prapaharan et al. (1991), Gens et al. (1995) y Delage et al (1996). Los suelos compactados del lado seco del óptimo muestran una fábrica abierta con una doble porosidad formada por agregados de partículas y unos interporos (poros entre agregados) que son apreciablemente mayores que los intraporos (poros dentro de los agregados). Por otra parte, los suelos compactados del lado húmedo tienen una fábrica más homogénea de tipo matricial sin evidencia de poros grandes. El incremento del esfuerzo de compactación densificando la muestra compactada del lado seco, repercute en la fábrica del suelo, fundamentalmente, en una reducción de los poros más grandes (interporos) pero afecta poco a los intraporos.

Los suelos que muestran una fábrica abierta, como los compactados del lado seco del óptimo, han recibido mucha atención por parte de los investigadores. En general, todos los suelos no saturados al ser mojados, sin modificar las cargas aplicadas, pueden presentar un cambio de volumen ya sea aumento (hinchamiento) o reducción (colapso). Este tema se ha estudiado por diversos autores como, por ejemplo Booth (1975), Maswoswe (1985) y Lawton (1989). Barden (1969) expone tres factores que controlan el mecanismo de colapso: la existencia de una estructura potencialmente inestable, donde las partículas o agregados del suelo se mantienen en su posición por enlaces temporales; un estado de carga externa suficientemente grande como para

generar una condición metaestable; y la existencia de enlaces entre partículas, que se debiliten en presencia del agua (por ejemplo, enlaces capilares, enlaces con puentes de partículas arcillosas que unen entre sí partículas mayores y enlaces por cementación). El efecto de la densidad seca, humedad y la carga externa en la magnitud del colapso ha sido estudiado entre otros por Booth (1975), Maswoswe (1985), Lawton (1989) y Rao y Revanasiddappa (2003).

Otro fenómeno característico de los suelos no saturados es el aumento de su rigidez con el aumento de la succión, de modo que la presión de preconsolidación aparente aumenta con la succión (Alonso *et al.* 1987). Este fenómeno ha sido observado por numerosos autores (por ejemplo Sivakumar (1993); Cui y Delage (1996); Rampino *et al.* (1999); Barrera (2002); Mancuso *et al.* (2002)).

Un aspecto poco estudiado es la anisotropía inducida en la fábrica del suelo, que podría generarse por compresión anisótropa durante y después de la preparación de los suelos compactados. Fábricas anisótropas conducen a la anisotropía de las propiedades mecánicas. En este sentido, algunos investigadores han observado evidencias de un comportamiento mecánico anisótropo en suelos compactados y suelos de depósitos naturales no saturados. Los resultados aportados por Cui y Delage (1996), sobre un limo compactado en forma unidimensional, y Futai y Almeida (2005) en un suelo residual, sugieren que las curvas de fluencia a succión constante son inclinadas en el plano ($q:p$, donde p representa la tensión media neta, $p-u_a$, en esta sección). Es posible que la deformación anisótropa sufrida por la muestra durante la compactación genere una estructura anisótropa transversal, que presenta una mayor rigidez y resistencia en la dirección axial. Cui y Delage (1996) presentaron datos experimentales donde las curvas de fluencia, a succión constante, son elípticas, inclinadas en el plano $q : p$, con el eje mayor coincidiendo muy cercanamente con la línea K_0 (coeficiente de empuje en reposo). Esto es consistente con el comportamiento de suelos saturados anisótropos. Romero *et al.* (2003) presentan las deformaciones experimentadas durante etapas de mojado, sobre muestras obtenidas por compactación isótropa y por compactación estática unidimensional (anisótropa), donde se observan patrones de deformación acordes a su historia de compactación.

Un punto importante en el estudio comportamiento de suelos consiste en analizar sus características en el estado crítico. Wheeler y Sivakumar (1995) Rampino et al. (1999) y Wang et al. (2002) y Barrera (2002) presentaron datos experimentales que demuestran la existencia de líneas de estado crítico tanto en el plano (p,q) como en el plano (p,v) . Estos autores concluyen que la pendiente de la línea de estado crítico en el espacio (p,q) , M , no depende de la succión, lo que corresponde a un ángulo de fricción constante. Wheeler y Sivakumar (2000) sugiere que las relaciones de estado crítico, aparentemente, no se ven afectadas por las diferentes presiones de compactación iniciales y diferentes trayectorias de corte triaxial. Por lo general, se considera que durante el estado crítico la fábrica inicial del suelo queda completamente destruida.

Un modelo de estado crítico elastoplástico para suelos no saturados, no altamente expansivos, fue presentado primeramente en forma cualitativa por Alonso, Gens y Hight (1987), y luego desarrollado como modelo matemático por Alonso, Gens y Josa (1990). En años recientes se han desarrollado varios modelos elastoplásticos para suelos no saturados, por ejemplo: Jommi y Di Prisco (1994), Karube (1988), Wheeler y Sivakumar (1993, 1995). El modelo de Alonso, Gens y Josa (1990) considera curvas de fluencia en el plano (q,p) características en suelos con comportamiento isótropo. Por lo tanto, no es posible representar el comportamiento observado por Maatouk et al. (1995), Cui y Delage (1996) y Futai y Almeida (2005). Un modelo para suelos no saturados que incluye la anisotropía fue presentado por Cui y Delage (1996). Adicionalmente, existen modelos para suelos saturados anisótropos que sugieren cambios en la inclinación de la curva de fluencia causada por deformaciones plásticas (como Wheeler et al., 2003).

En principio, las leyes constitutivas para suelos no saturados, pueden ser usadas para modelar los suelos compactados. Si un tipo de suelo (definido por su mineralogía, granulometría, etc.) es compactado, su fábrica y estado tensional inicial (que podría estar definido por las tensiones, la succión y la superficie de fluencia) dependerán del proceso de compactación, contenido de agua usado w y la densidad seca ρ_d generada después de la compactación (Gens 1995). En este sentido, se debe investigar el rol que tiene la fábrica inicial y el estado inicial, en forma separada, sobre el comportamiento de un suelo. Los resultados de Gens et al. (1995) muestran que, al menos para el suelo usado (arcilla de Barcelona), el distinto comportamiento entre las muestras compactadas en el lado seco y el húmedo es parcialmente causado por las diferentes fábricas iniciales del suelo,

pero una parte de tales diferencias pueden ser atribuida al estado inicial de tensiones/succión asociado a diferentes condiciones de compactación. Sivakumar y Wheeler (2000) y Estabragh et al. (2004) determinaron que la presión de compactación afectó el estado inicial, cambiando la posición inicial de la superficie de fluencia (a mayor presión de compactación se genera un mayor tamaño de la superficie de fluencia). Wheeler y Sivakumar (2000) señalan que este efecto, por lo tanto, puede ser modelado considerando únicamente la variación del estado inicial del suelo. Pero en los resultados de Sivakumar y Wheeler (2000) también se observó, en un grado limitado, la influencia de la compactación en la posición de la línea de compresión normal para diferentes valores de succión. Este efecto no puede ser explicado únicamente a partir del estado inicial del y se sugiere que este efecto podría ser modelado sólo en términos de estado inicial si se usa un modelo elastoplástico anisótropo con endurecimiento rotacional.

Por otra parte, la mayoría de los modelos elastoplásticos existentes, para suelos no saturados, no toman en consideración relaciones que describan la variación del contenido de agua (w) o el grado de saturación (S_r) del suelo. Esto los hace poco apropiados para ser usados en análisis de flujo-deformación acoplados y para predecir el comportamiento mecánico del suelo en condiciones no drenadas. En los últimos años se han presentado varios modelos hidromecánicos, acoplados, que incorporan la variación del contenido de agua (w) o el grado de saturación (S_r) del suelo, como los realizados por Vaunat et al. (2000) y Gallipoli et al (2003). Romero y Vaunat (2000) y Karube y Kawai (2001) consideran que la curva de retención en el rango de bajas succiones, representado como función de la relación de agua, es altamente dependiente del índice de poros. Vaunat et al. (2000) propuso un modelo de curvas de retención limitantes (bounding retention curves), en el plano relación de agua (o contenido de agua):succión, que describe los cambios de humedad dentro de los macroporos, tomando en cuenta la histéresis de la curva de retención y su dependencia con el índice de poros.

Para poder estudiar el comportamiento hidromecánico de suelos no saturados, con base a un esquema de estado crítico elastoplástico, es indispensable contar con equipos triaxiales con control (o medida) de succión, capaces de realizar trayectorias diversas en el espacio ($p-u_a: s: q$). Para caracterizar el comportamiento de un suelo no saturado es necesario describir su estado de

tensión mediante las siguientes variables: la tensión media neta, $p-u_a$, la tensión de corte $q=\sigma_a-\sigma_r$, y la succión matricial $s=u_a-u_w$. La interpretación de resultados de un ensayo sobre suelo no saturado llega a ser ambigua cuando alguna de las variables de estado de tensiones es desconocida. Por otra parte, como el cambio del volumen de agua es independiente del cambio de volumen total, los cambios de ambos volúmenes deben ser medidos simultáneamente.

El primer equipo triaxial desarrollado para estudiar la resistencia en suelos no saturados fue presentado por Bishop y Donald (1961). A partir de estos estudios se desarrollaron varios equipos siguiendo las mismas bases conceptuales de aplicación y control de la succión. En los últimos años, se han realizado diversas investigaciones con equipos triaxiales con control de succión, como, por ejemplo: Cui (1993), Sivakumar (1993), Anderson et al. (1997), Romero et al. (1997), Rampino et al (1999), Barrera et al. (2000), Aversa y Nicotera (2002), Ng et al. (2002), Leong et al. (2004) y Sun et al. (2004).

1.2 Objetivos del trabajo.

En base a los antecedentes mencionados en el apartado anterior, se han establecido los siguientes objetivos para el presente trabajo:

-Construir y poner a punto un equipo triaxial con control de succión, con automatización en el control de tensiones y con instrumentación electrónica completa, capaz de realizar trayectorias de tensiones continuas, tanto isótropas como anisótropas.

- Estudiar el comportamiento hidromecánico que experimenta un suelo compactado, con fábrica abierta, cuando se le somete a ensayos isótropos, anisótropos y de compresión triaxial drenados con succión constante, así como cuando se le aplican trayectorias de cambios de succión matricial; considerando la historia de tensiones experimentada por el suelo durante la compactación y la succión matricial al final de la compactación. También, se trata de obtener pautas de comportamiento útiles para validar hipótesis empleadas en el modelo conceptual constitutivo.

En el departamento de Ingeniería del Terreno de la UPC se han realizado varios estudios sobre suelos compactados con control de succión, bajo condiciones edométricas y/o triaxiales (Josa 1988, Balmaceda 1991, Gens et al. 1995 y Barrera 2002). Así mismo, Alonso, Gens y Hight (1987) presentaron un esquema de estado crítico elastoplástico para suelos no saturados, no altamente expansivos, que fue desarrollado como modelo matemático por Alonso, Gens y Josa (1990). Josa et al. (1992) presentó una forma ligeramente modificada del modelo, para poder representar el colapso máximo.

El presente trabajo se realiza para ampliar los estudios mencionados. En especial, se busca conocer la influencia de la anisotropía sobre el comportamiento mecánico de un suelo compactado estáticamente, a muy baja densidad; y analizar el comportamiento hidromecánico acoplado de este material ante cambios del índice de poros. Se hace énfasis en el análisis del posible comportamiento anisótropo inducido por la compactación unidireccional en condiciones de deformación lateral nula y la interpretación del cambio de contenido de agua con base a curvas de retención. De modo adicional, se analizan en forma detallada los aspectos relevantes del comportamiento del suelo ensayado ante las distintas trayectorias efectuadas, de acorde al modelo de Alonso, Gens y Josa (1990).

1.3 Organización de la tesis.

El documento está formado por ocho capítulos. Los capítulos 2 al 7 constituyen el cuerpo principal del documento. En los siguientes párrafos se detalla el contenido de cada capítulo. El presente capítulo es una introducción al tema y en el capítulo 8 se exponen las conclusiones que se derivan de la presente investigación, con una propuesta de líneas de investigación futuras.

En el capítulo 2 se presenta una revisión bibliográfica. Contiene el estado del conocimiento sobre el comportamiento de los suelos compactados. El estado del conocimiento se divide en tres partes: la primera, compuesta por los apartados 2.2, 2.3 y 2.4, se compone de una muy breve descripción de elementos que juegan un rol importante para entender el comportamiento de suelos parcialmente saturados, como son : la fábrica de suelos compactados; las características más importantes en la interacción agua-suelo (succión, curvas de retención, etc); y variables que describen el estado de tensiones y de deformación en suelos no saturados. Debido a que una parte

importante de esta tesis se refiere a la construcción y puesta a punto de un equipo triaxial con succión controlada, en apartado 2.5, se presenta una reseña de equipos triaxiales con control de succión, enfatizando en las técnicas para controlar la succión y en los procedimientos para medir cambios de volumen total de la muestra. En la tercera parte, compuesta por los apartados 2.6 y 2.7, se presenta el estado de conocimiento sobre el comportamiento del suelo no saturado; y se presenta la teoría del modelo elastoplástico de Barcelona (Alonso *et al.* 1990; Barcelona Basic Model: BBM).

El capítulo tres contiene una descripción detallada del nuevo equipo triaxial con succión controlada incluyendo las calibraciones realizadas en la etapa de prueba del equipo y la implementación sus dispositivos auxiliares. En el inicio del capítulo se realiza una descripción general del equipo, sin entrar en detalles de las características de los diversos elementos que componen el equipo triaxial y que serán posteriormente descritos en detalle de forma individual en los apartados siguientes. Se pone gran énfasis en describir la fiabilidad de los elementos que controlan y miden las tensiones, así como la precisión de las medidas obtenidas en el equipo. Al final del capítulo se presenta una descripción de otros equipos de ensayo adicionales, usados en este programa de investigación, como: célula edométrica con medida de tensión lateral y un equipo triaxial estándar para suelos saturados.

En el capítulo 4 se describe el suelo usado durante la investigación. En la parte inicial se presentan características como la granulometría y límites de consistencia y se analizan las diferentes curvas de compactación del suelo. Posteriormente, se describe el procedimiento adoptado para elaborar la muestra compactada, de baja densidad, que se usará en los ensayos de la presente investigación. Después, se presentan la descripción de la fábrica mediante estudios de la distribución de tamaño de poros por Porosimetría por Intrusión de Mercurio (MIP) y por Microscopio Electrónico de Barrido Ambiental (ESEM). Se describe también la obtención de las condiciones tensionales iniciales de las muestras compactadas con la ayuda de un edómetro con medida de tensión lateral y un tensiómetro de alto rango; y la obtención curvas de retención bajo diferentes situaciones.

En el capítulo 5 se describen las trayectorias de tensiones realizadas dentro del programa de investigación, así los procedimientos de ensayo utilizados. Los diversos ensayos realizados constan de varias etapas cuyos resultados fueron agrupados con base a los objetivos de la tesis para realizar una mejor descripción y comparación de los mismos..

Los capítulos 6 y 7 contienen el análisis de los resultados de los ensayos ejecutados. Para realizar una mejor descripción, los resultados se han agrupado de la siguiente manera: Etapa de equilibrio; Etapas de compresión isótropa; Etapas de compresión anisótropa; Etapas de reducción de succión matricial bajo condiciones de relación de tensión $q/(p-u_a)$ constante; Etapas de compresión triaxial drenada con succión constante. En el capítulo 6 se presentan los resultados de los primeros cuatro grupos descritos anteriormente y los resultados de las etapas de compresión triaxial se presentan en el capítulo 7. El análisis de resultados se realizó con base al modelo de Alonso, Gens y Josa (1990) para suelos no saturados, aunque fue necesario usar, también, el modelo formulado por Wheeler et al. (2003) para considerar la anisotropía transversal. El comportamiento hidromecánico acoplado, observado en los ensayos, se ha interpretado usando el modelo de curvas de retención limitantes (bounding retention curves), propuesto por Vaunat et al. 2000.