ISSN 0188-7297

Certificado en ISO 9001:2000‡

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

SCT

"IMT, 20 años generando conocimientos y tecnologías para el desarrollo del transporte en México"

DETERMINACIÓN DE CURVAS CARACTERÍSTICAS EN SUELOS NO SATURADOS CON CELDAS DE PRESIÓN

Natalia Pérez García

Publicación Técnica No. 313
Sanfandila, Qro. 2008

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

Determinación de curvas características en suelos no saturados con celdas de presión

Publicación Técnica No. 313
Sanfandila, Qro. 2008

Este trabajo fue realizado en la Universidad Estatal de Arizona durante el desarrollo del proyecto de tesis de Doctorado de la autora, y dirigido por la Dra. Sandra Houston y el Dr William Houston, profesores de la misma Universidad.

Se agradece el apoyo del Instituto Mexicano del Transporte por la beca proporcionada durante la estancia en la Universidad Estatal de Arizona, así como todo el respaldo proporcionado por los profesores mencionados.

Índice

Resumen III

Abstract V

Resumen ejecutivo VII

1. Aproximación jerárquica para la determinación de propiedades de suelos no saturados 1

1.1 Introducción 1
1.2 Aproximaciones para la determinación de funciones de suelos no saturados 1
1.2.1 Funciones de suelos no saturados 1

2. Definición y medición de la curva característica con celdas de presión 5

2.1 Definición de curva característica 5
2.2 Regiones de la curva característica 7
2.3 Determinación de la curva característica con celdas de presión 8
2.3.1 Celdas de presión con membrana 8
2.3.2 Celda con membrana (10 000 kPa) 9
2.3.3 Celdas de presión con disco de cerámica de alto valor de entrada de aire 10
2.3.4 Celda de extracción volumétrica 10
2.3.5 Celda Tempe 11
2.3.6 Celdas de presión volumétrica modificada 12

3. Factores que afectan la determinación de la curva característica 15

3.1 Tipo de suelo 15
3.2 Energía de compactación 16
3.3 Efecto del contenido de agua de compactación 18
3.4 Tipo de compactación 20
3.5 Influencia del estado de esfuerzos 21
3.6 Técnica de saturación del espécimen 22
3.7 Histéresis 23

4. Descripción y evaluación de la celda de presión modificada 25

4.1 Descripción de la celda de presión 25
4.1.1 Control de la presión de poro del agua 26

4.1.2 Control de la presión del aire 27
4.1.3 Control de la temperatura 28
4.1.4 Aplicación de la sobrecarga 29
4.1.5 Discos de cerámica de alto valor de entrada de aire 30
4.2 Evaluación de la celda modificada 31
4.2.1 Determinación del contenido de agua 31
4.2.1.1 Efecto de los cambios de temperatura 32
4.2.2 Medición de la succión mátrica (rango 0-5 kPa) 34
4.2.3 Difusión de aire a través de los discos de cerámica 35

5. Resultados obtenidos 37
5.1 Introducción 37
5.2 Propiedades de los suelos de prueba 37
5.3 Factores que afectan la curva característica 40
5.3.1 Efecto de la sobrecarga 40
5.3.2 Contracción del espécimen en trayectoria de secado 42
5.3.3 Efecto del grado de saturación inicial 44
5.4 Curvas características finales 45

Conclusiones 51

Bibliografía 53

Resumen

El presente documento muestra un estudio sobre curvas características. Se describen algunos de los factores que afectan su determinación, y se muestran algunas de las celdas de presión que se han utilizado en agricultura para determinar dicha relación. Se mencionan sus rangos de operación, sus ventajas y desventajas. Se describe además una nueva celda de presión diseñada en la Universidad Estatal de Arizona con algunas ventajas sobre las ya existentes (simular la sobrecarga que se tendrá en condiciones reales, y estudio de cambio de volumen en trayectorias de secado y humedecimiento, medición de varios puntos de la curva característica sin mover la muestra, etc). En la última parte se muestran las propiedades de los suelos estudiados, y las curvas características obtenidas con las celdas modificadas.

Palabras clave: curva característica, succión, celda de presión, suelos no saturados

Abstract

This research work presents a study on soil water characteristic curves. It describes some of the factors affecting its determination and also it discusses aspects of the pressure plates that have been used to determine such relationship. It mentions the ranges of application, the advantages and disadvantages. In addition, it is shown a new pressure plate apparatus that was designed at the Arizona State University together with Geotechnical Consulting and Testing Systems and Dr. D. G. Fredlund. This new pressure plate overcomes some of the disadvantages of the cells already in the market. Among other characteristics of the new cell are: the application of overburden load, the measurement of volume change at any time during the test, the determination of the soil water characteristic curve following the drying or wetting paths, etc.

The last part of the document provides a series of soil water characteristic curves that were obtained with the modified pressure plate at three different overburden pressures (20, 75 y 196 kPa). These curves can be used for those interested in forming databases

Key words: soil water characteristic curve, suction, pressure plate, unsaturated soils

Resumen ejecutivo

La relación succión contra grado de saturación, o mejor conocida como curva característica de un suelo, ha cobrado gran importancia en el estudio de los suelos no saturados. Una de las aplicaciones más importantes de esta curva es la determinación de funciones de propiedades de suelos no saturados, que además de ser difíciles de determinar en laboratorio, tienen la característica de ser no lineales (por ejemplo, la función de resistencia al esfuerzo cortante).

Uno de los aspectos más importantes en mecánica de suelos no saturados es proponer metodologías viables para determinar dichas funciones.

El primer capítulo de esta investigación muestra una metodología propuesta por Fredlud, Houston y Houston (2002) para determinar las funciones de suelos no saturados. Dicha metodología está dividida en cuatro aproximaciones. La primera se ha diseñado para proyectos de importancia, como por ejemplo, carreteras, presas, etc. En esta aproximación la determinación de las funciones se basa completamente en ensayes de laboratorio; es decir, se deben determinar desde propiedades índice hasta propiedades en suelos no saturados.

En la segunda aproximación se determinarán las propiedades índice y propiedades de suelos en condiciones saturadas, además de la curva característica. Los resultados se usarán en conjunto para obtener las funciones del suelo no saturado.

La tercera y cuarta aproximaciones son quizá las más viables. En la tercera sólo se requiere la determinación de propiedades índice para tomarlas como base e inferir la curva característica, y después emplearla para determinar las funciones. La aproximación número cuatro está pensada para aquellos casos en los que únicamente se puedan determinar propiedades índice. Si se conocen dichas propiedades se puede hacer uso de bases de datos, y buscar un suelo con características parecidas al suelo en cuestión. Al encontrarlo, se extrae toda la información para ser empleada en la inferencia de las funciones de comportamiento de interés.

El capítulo 2 inicia con la definición de curva característica y las regiones en las que ha sido dividida de acuerdo con el estado en el que se encuentra el agua. También se muestran los tipos de curvas que se pueden obtener dependiendo del tipo de suelo.

Este mismo capítulo muestra que la determinación de la curva característica puede llevarse a cabo con diferentes métodos; sin embargo, sólo se analiza el de las celdas de presión ya que el trabajo presenta la evaluación de una celda modificada.

Los factores que influyen en la determinación de la curva característica se presentan en el capítulo 3. De éstos se pueden mencionar el peso volumétrico seco, el contenido de agua inicial, el efecto de histéresis, el método de saturación del espécimen, el tipo de suelo, etc. Se enfatiza la necesidad de determinar la curva característica simulando las condiciones de campo tanto como sea posible.

El capítulo 4 trata acerca de los resultados de la evaluación de pruebas realizadas en las celdas modificadas. Se demuestra que si existe variación en la temperatura del lugar donde se encuentran localizadas las celdas, se observará el fenómeno de condensación que trae como consecuencia un error en los cálculos de contenido de agua o de grado de saturación de los especímenes para los diferentes niveles de succión. Sin embargo, este factor puede controlarse si se coloca un bloque calentador sobre la celda. Se muestran los resultados donde se presenta el error que se tenía en la determinación de las curvas características antes y después de colocar el bloque calentador.

En la parte final del documento (capítulo 5) se presentan las curvas características de los suelos de prueba. Estos suelos son fundamentalmente arcillas de baja plasticidad, arenas limosa, arena uniforme, clasificadas según el sistema de clasificación de suelos, como CL, SM, SP y CL-ML. El rango de comportamientos de estos es amplio, por tanto, la variación que presentan las curvas características también es amplia. Las curvas demuestran que los suelos arenosos poseen baja capacidad para retener agua; además el agua que retienen, fluye a valores bajos de succión. Por el contrario, los suelos finos retienen bastante agua y la pierden en forma gradual a medida que la succión se incrementa.

1 Aproximación jerárquica para determinación de propiedades de suelos no saturados

1.1 Introducción

Las investigaciones sobre el comportamiento de suelos no saturados ha sido materia de investigación desde hace ya varias décadas. Hasta la fecha se tienen bastantes datos de campo y laboratorio; sin embargo, ha resultado difícil poner en práctica todos estos conocimientos debido a los costos excesivos involucrados en la determinación de propiedades. En general, los propietarios de laboratorios de mecánica de suelos no invierten en equipos de prueba onerosos y altamente sofisticados. Aunado a lo anterior, están los tiempos de prueba que van desde algunos días hasta meses, lo cual a simple vista es impráctico para aquellos ingenieros que necesitan la información en un tiempo relativamente corto.

Por tanto, uno de los retos en el área de mecánica de suelos no saturados es proponer metodologías viables para determinar las funciones que describen el comportamiento de estos suelos.

En los últimos años se ha propuesto el uso de la curva característica como parte primordial para la predicción de dichas funciones. Este capítulo presenta en forma breve una metodología propuesta por Fredlund, Houston y Houston (2002), la cual parece ventajosa ya que incluye cuatro opciones para determinar las funciones. Tales opciones contemplan el caso en el que se pueden tener todos los equipos disponibles que ayuden a determinar todas las propiedades y funciones, hasta el caso donde el ingeniero podrá inferirlas basándose en propiedades índice.

1.2 Aproximaciones para la determinación de funciones de suelos no saturados

1.2.1 Funciones de suelos no saturados

Antes de presentar la metodología para definir las funciones de propiedades de suelos no saturados, se muestra una lista de algunas de las funciones que son fundamentales en la resolución de problemas geotécnicos.

Entre las funciones más utilizadas se tienen las siguientes (Houston, Houston, y Fredlund):

- La función de conductividad hidráulica que se emplea para llevar a cabo análisis de flujo de agua

- La función de resistencia al esfuerzo cortante fundamental para el análisis de capacidad de carga, estabilidad de taludes, presión lateral de tierras, etc
- La función de relación de vacíos. Este tipo de función es importante en el análisis de levantamiento o expansión de suelos
- La función de contenido de agua o curva característica, que es la que muestra la capacidad que tiene el suelo para almacenar agua

Según Fredlund, Houston y Houston (2002), la determinación de las funciones de suelos no saturados se puede dividir en cuatro niveles (fig. 1.1).

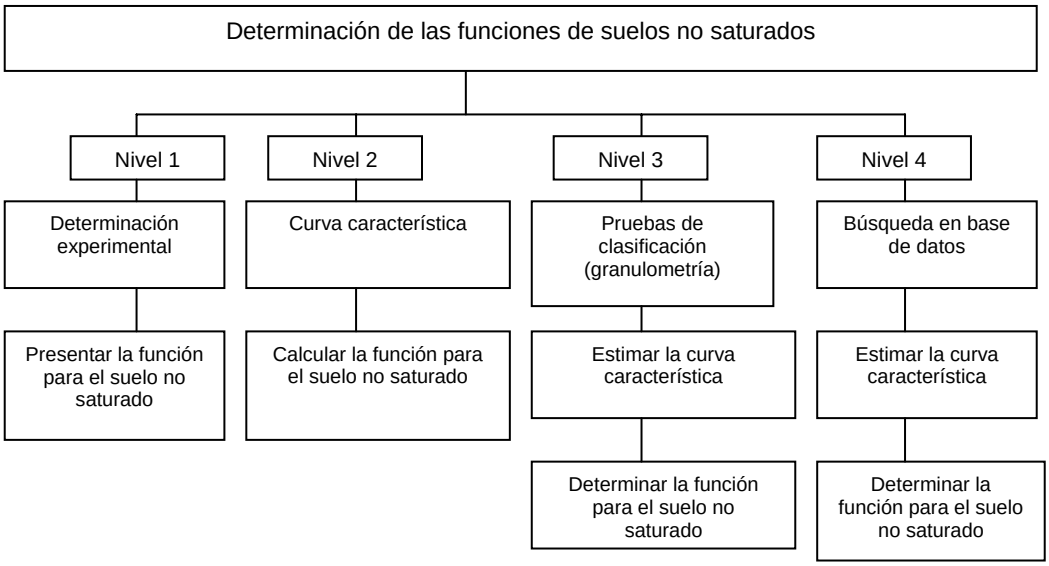


Figura 1.1
Aproximaciones para la determinación de las funciones de suelos no saturados (Fredlund, Houston y Houston, 2002)

En palabras de los autores, el primer nivel puede describirse de la siguiente manera:

"… Este nivel está pensado para diseños de estructuras que involucran costos muy altos y con consecuencias graves en el caso de falla, para cuestiones de investigación, para proyectos en los que se puedan tener grandes ahorros, etc. En este nivel es necesario llevar a cabo todas las pruebas de laboratorio para la determinación de las funciones. Los equipos a utilizar pueden ser equipos triaxiales, equipos de corte directo modificados, celdas de presión, celdas de membrana, etc."

Este nivel implica la determinación de propiedades índice (granulometría, gravedad específica, características de compactación, límites de Atterberg, etc), determinación de propiedades en muestras saturadas (c' y ϕ', permeabilidad, etc).

Por otro lado, en el nivel dos se debe determinar la curva característica para tomarla como base en el cálculo de las funciones de los suelos no saturados. Dicho nivel implica no sólo la obtención de la curva característica, sino también propiedades índice o propiedades de los suelos en condiciones saturadas que se usarán en conjunto para estimar las funciones.

El nivel tres, que podría considerarse como uno de los más viables para ingenieros prácticos. De las propiedades índice se infiere la curva característica, y como consecuencia se lleva a cabo la predicción de las funciones.

Finalmente, el nivel cuatro está pensado para los casos en los que sólo se tienen a disposición propiedades índice. Con ellas se entra a bases de datos, y se extrae la curva característica y otras propiedades para un suelo parecido. Toda la información se usa para inferir las funciones del suelo no saturado.

Este último nivel se ha pensado para ingenieros que necesitan una estimación rápida, u órdenes de magnitud de los parámetros geotécnicos que les ayude a iniciar sus cálculos.

En el nivel cuatro, todo estará basado en correlaciones, por tanto, es de esperarse que las funciones obtenidas tendrán una incertidumbre alta.

Los párrafos anteriores muestran que la metodología propuesta por Fredlund, Houston y Houston (2002) contempla la determinación de las funciones de suelos no saturados, tomando en cuenta que existirá quién pueda llevar a cabo todas las pruebas en laboratorio y quién sólo podrá determinar las propiedades índice o propiedades rutinarias. En tal metodología, la curva característica juega un papel muy importante. Por ejemplo, el nivel uno y el dos requieren su determinación en laboratorio y en los niveles tres y cuatro se determina con base en propiedades índice del suelo en cuestión. Dada la importancia de la curva característica en el campo de la mecánica de suelos no saturados, los capítulos siguientes presentan su definición; los factores que afectan su determinación, la evaluación de un equipo de laboratorio para obtenerla, y finalmente resultados obtenidos con el equipo evaluado. Las curvas mostradas pueden ser utilizadas para determinar modelos o correlaciones que describan la curva característica, sin llevar a cabo pruebas tan largas y complejas.

2 Definición y medición de la curva característica con celdas de presión

2.1 Definición de curva característica

Consideremos una muestra de suelo que está en contacto con un disco de cerámica que permite el paso de fluido, pero no de suelo. Si se conecta el disco con una bureta flexible llena de agua y el nivel se ajusta de tal forma que sea el mismo que se tiene en la superficie del suelo, entonces el suelo se encuentra en una condición saturada (fig. 2.1)

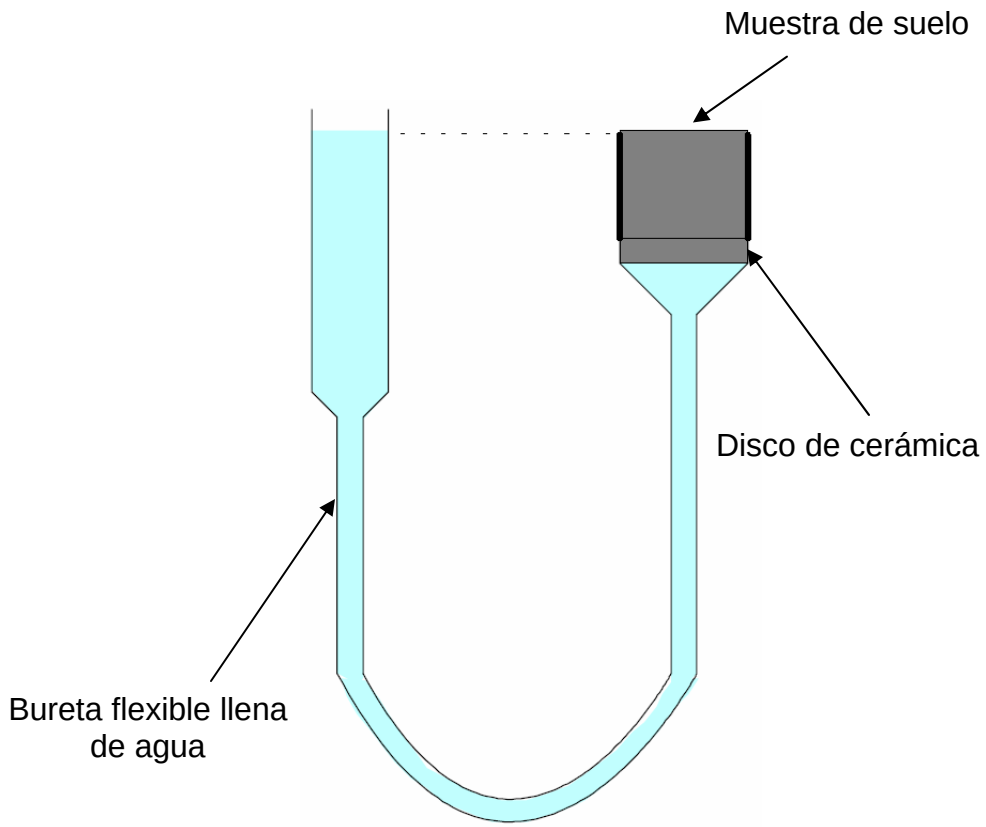


Figura 2.1
Esquema de un suelo saturado conectado a una bureta llena de agua

Si se cambia la posición de la bureta a una posición más baja, existirá un gradiente entre el nivel del agua en la muestra de suelo y el nivel del agua en la bureta, lo que trae como consecuencia flujo de agua del suelo hacia la bureta, proceso que termina hasta que exista un equilibrio. La cantidad de agua que permanece en la muestra (agua en tensión) para diferentes gradientes, se puede presentar mediante la relación llamada curva característica.

La curva característica es la relación que existe entre el contenido de agua del suelo (grado de saturación, contenido de agua volumétrico) y la succión (tensión del agua) del suelo (fig. 2.2). Esta relación también se llama curva de retención del suelo, curva de succión, etc, dependiendo del área de aplicación. Para cuestiones de ingeniería geotécnica, la mayor parte de la literatura hace referencia a la curva característica del suelo.

La naturaleza de la curva característica está directamente asociada a la composición granulométrica y estructura del suelo (T. J., 1993); por tanto, la relación puede variar para diferentes tipos de suelos (fig. 2.2). Nótese que para el caso de suelos finos (arcillas), estos se desaturan en forma gradual; mientras que para suelos granulares, la pérdida de agua ocurre en forma muy rápida.

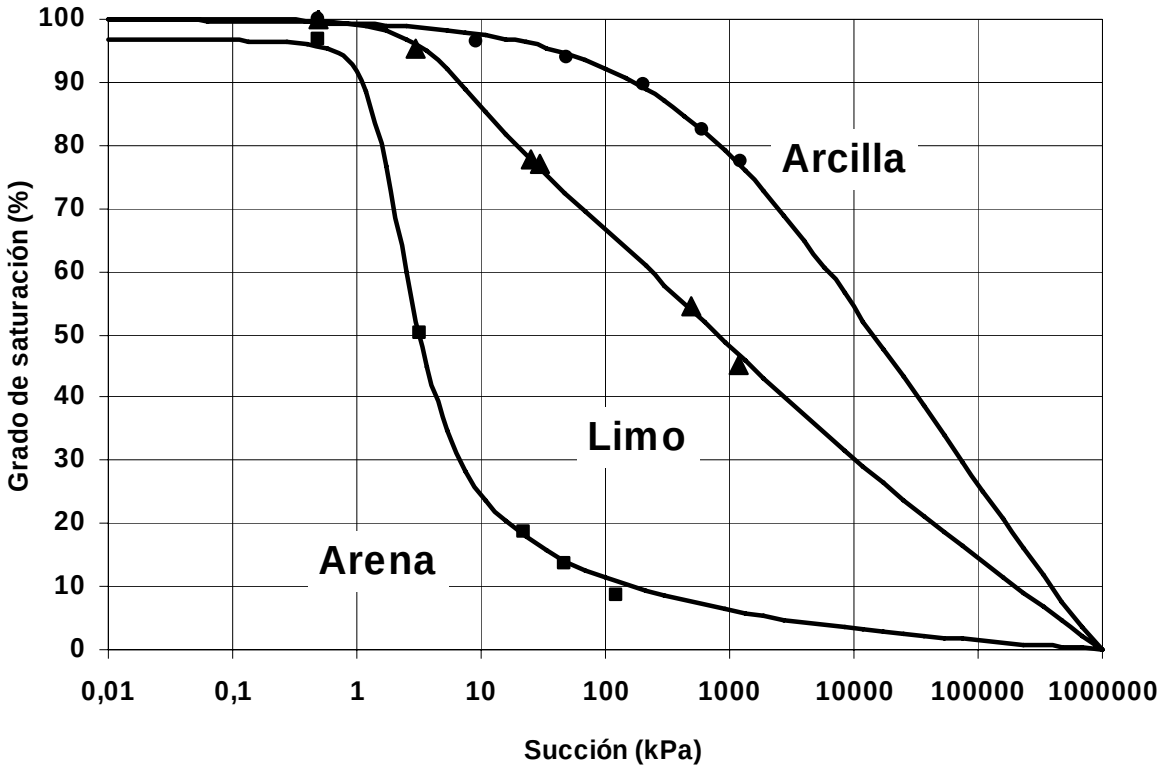


Figura 2.2
Curvas características para suelos con diferentes texturas (Pérez, 2006)

En otras palabras, la curva característica no es más que una representación de la capacidad de un suelo para retener agua, bajo cierto valor de succión aplicada. Por ejemplo, refiriéndonos a la fig. 2.2, se observa que para arcillas el grado de saturación es cerca de 92 % para una succión de 100 kPa; para limos, el grado de saturación disminuye a 68 % (mismo valor de succión); y el caso extremo es la arena, que para el valor de 100 kPa de succión, sólo presenta un grado de saturación de 10 %, lo cual muestra que a medida que el suelo cambia de un

suelo con textura fina a uno con textura gruesa, la capacidad de retención del agua es mucho menor.

Como ya se mencionó, una forma de presentar la curva característica es en términos de contenido de agua gravimétrico; sin embargo, la desventaja es que esta forma no refleja el cambio de volumen que sufre la muestra durante el incremento o reducción de la succión. Por tanto, es deseable que la curva característica se reporte como una relación entre succión y grado de saturación.

2.2 Regiones de la curva característica

La curva característica se compone de tres zonas: la capilar, la de desaturación, y la residual.

La zona capilar es aquella en la cual el suelo se mantiene en un estado de saturación, y termina en el valor de entrada de aire (Fredlund, 1999), el cual está definido como el valor que debe de exceder la succión mátrica, antes de que el aire empiece a entrar en los macroporos del suelo (fig. 2.3).

En la zona de desaturación, el agua es desplazada por aire; por tanto, la fuerza con la que el agua se encuentra adherida a las partículas del suelo se incrementa a medida que el suelo pierde más agua. Al finalizar esta zona, el agua se encuentra en un estado discontinuo y el coeficiente de permeabilidad se reduce en forma importante (fig. 2.3).

Para la zona residual, un incremento de succión no produce un cambio importante en el contenido de agua, la cual es tan escasa que no fluye entre los poros y la remoción puede ser sólo por evaporación (Hosagasi, 2006). En esta región en donde las succiones son muy altas, el agua está adsorbida a las partículas (fig. 2.3).

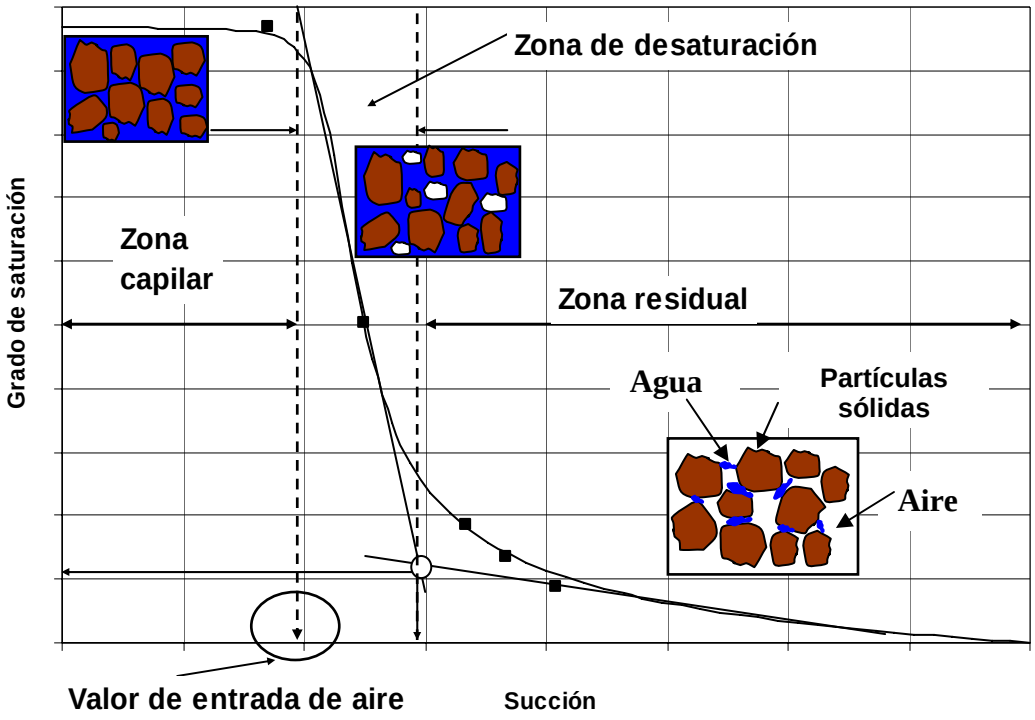


Figura 2.3
Regiones típicas de la curva característica

2.3 Determinación de la curva característica con celda de presión

Existen varios métodos para determinar la curva característica. Algunos de ellos son: celdas de presión, el método del papel filtro, determinación por medio de muestras colocadas en equipos triaxiales, métodos que usan soluciones salinas, etc. En este inciso, sólo se presentan las celdas de presión; los otros métodos se tratarán en documentos posteriores.

Las celdas de presión que se ofrecen en el mercado se dividen generalmente por el rango de succiones que pueden aplicarse, el número de especímenes a ser ensayados o el tipo de material que se coloca en la base de la celda para separar la presión de aire y agua; es decir, el uso de discos de cerámica o membranas celulosas. A continuación se describe cada una de las celdas; también se mencionan sus ventajas y desventajas.

2.3.1 Celda de presión con membrana

Este equipo consiste en una celda metálica en la cual se pueden ensayar varios especímenes al mismo tiempo (fig. 2.4).

Una membrana de celulosa saturada es el medio que permite el flujo de agua, pero no de aire. El rango de succiones factible de aplicar en esta celda es de 0 a 1 500 kPa.

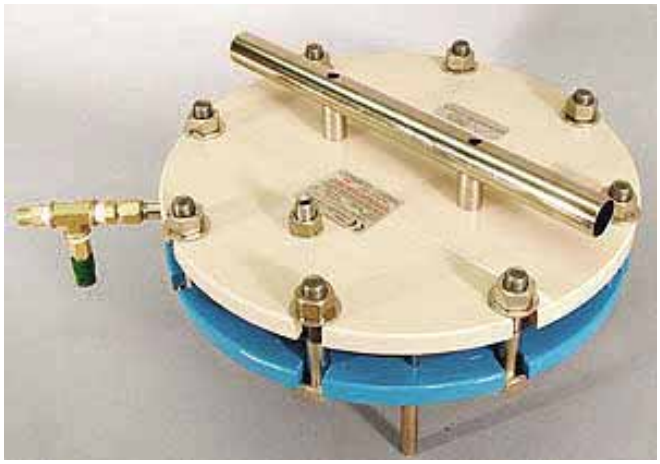


Figura 2.4
Celda de membrana (Soilmoisture web page)

2.3.2 Celda con membrana (10 000 kPa)

Esta celda funciona de la misma forma que la anterior; sin embargo, en este caso el valor máximo de succión que puede aplicarse, es de 10 000 kPa (figura 2.5).

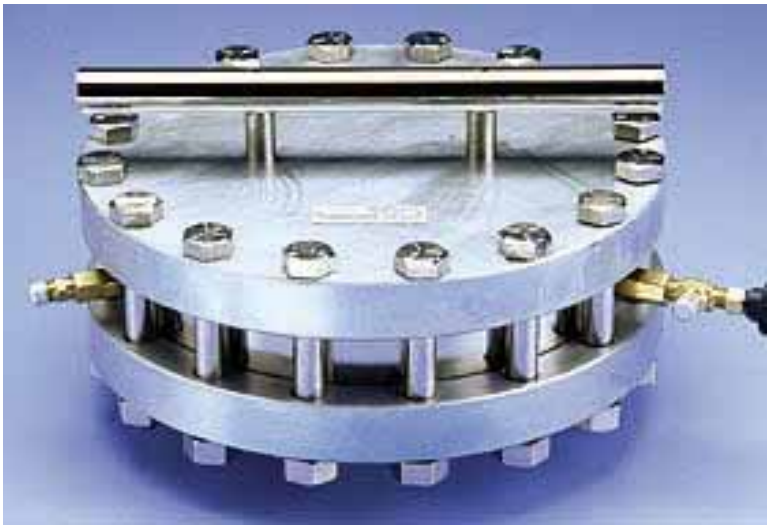
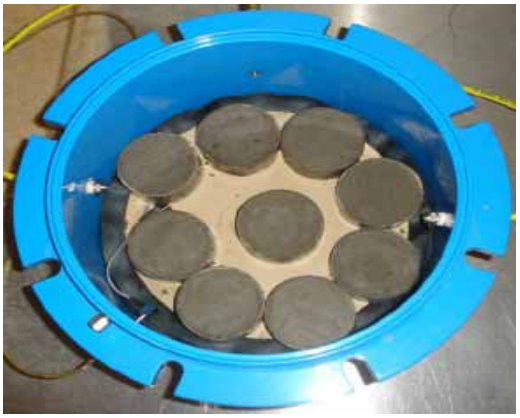


Figura 2.5
Celda de membrana con capacidad de 10 000 kPa (soilmoisture webpage)

2.3.3 Celda de presión con disco de cerámica

Esta celda al igual que las anteriores, sirve para determinar la curva característica. La celda utiliza discos de cerámica de alto valor de entrada de aire para controlar en forma independiente la presión de poro de agua y aire. Se pueden acomodar varios especímenes para un incremento de presión de aire específico, lo cual es una ventaja en el caso de que se requiera determinar la curva característica para varios suelos al mismo tiempo (fig. 2.6).



(a) **(b)**

Figura 2.6
(a) celda de presión con disco de alto valor de entrada de aire; (b) vista del interior de la celda

2.3.4 Celda de extracción volumétrica

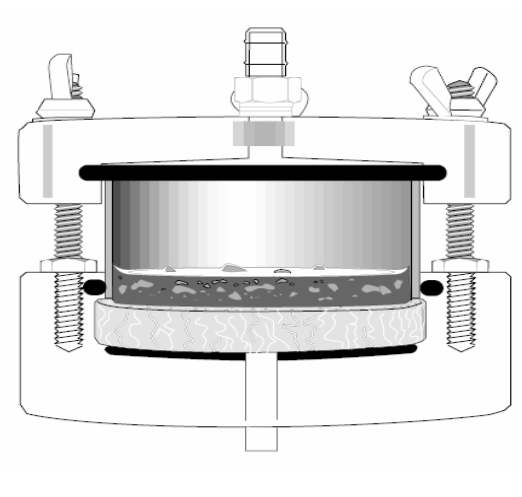
El principio de trabajo de esta celda es el mismo que en las anteriores, sólo que en este caso se puede medir en forma exacta, la cantidad de agua que fluye hacia el espécimen o fuera de él en cada incremento o decremento de la presión de aire. Por otro lado, es factible definir la curva característica en trayectoria de humedecimiento o secado del suelo, ya que el equipo cuenta con aditamentos histeréticos. Una de sus desventajas es que el rango de succiones que puede medirse es muy bajo (0-200 kPa) (fig. 2.7).

Figura 2.7
Celda volumétrica (figura de la página de Internet de Soil Moisture Equipment Company)

2.3.5 Celda Tempe

Esta celda consiste de dos partes fabricadas en lucita que se ensamblan juntas para contener el espécimen de suelo (fig. 2.8a). La parte inferior de la celda es la que mantiene la piedra cerámica de alto valor de entrada de aire. Después de saturar la piedra, se coloca el espécimen que ha sido saturado previamente. Se coloca la parte superior de la celda y se conecta hacia el suministro de aire para después iniciar la prueba.

Una de las desventajas es que está fabricada con lucita, material que no resiste presiones de aire altas; por tanto, el rango de succiones que se pueden aplicar es bajo. Quizás este tipo de equipo sea recomendable sólo para el caso de suelos que se desaturan a muy bajos valores de succión mátrica (por ejemplo, las arenas).



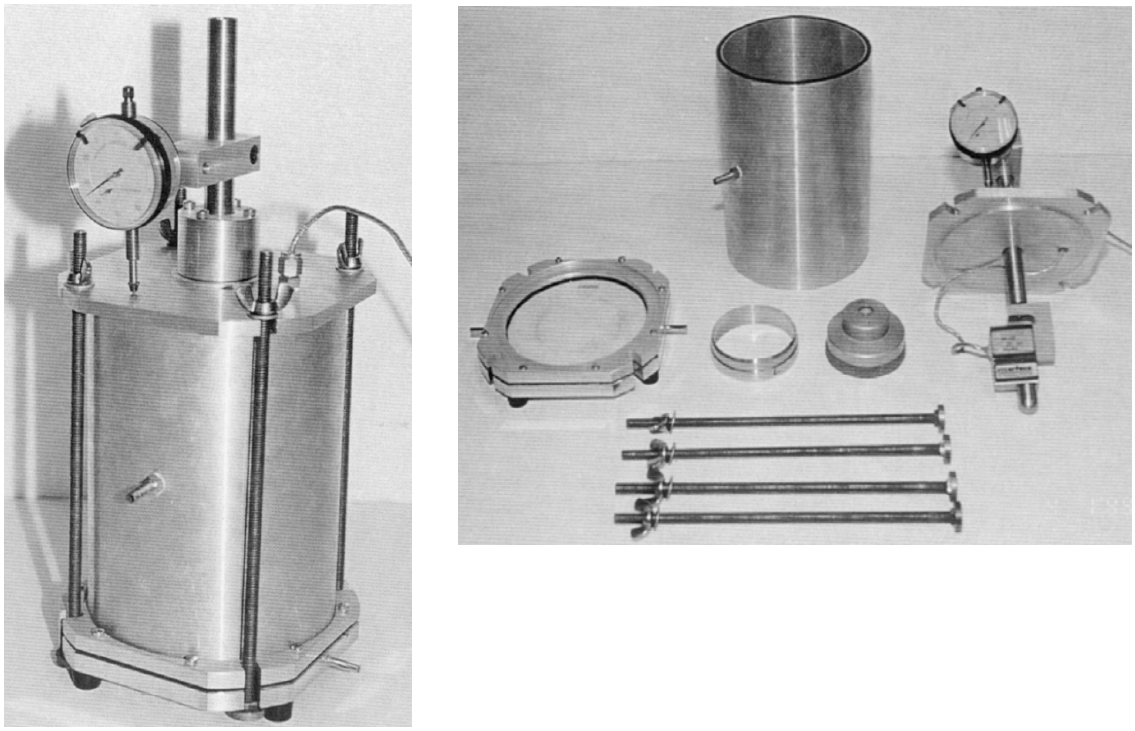
(a)

(b)

Figura 2.8
Celda Tempe para controlar succión en el rango 0-100 kPa

2.3.6 Celda de presión volumétrica modificada

Las celdas presentadas anteriormente fueron diseñadas para la ciencia del suelo, por tanto, ninguna de las celdas tiene aditamentos para la determinación de la curva característica en donde se pueda controlar la presión de sobrecarga. Sin embargo, varios investigadores en el área de suelos no saturados han modificado algunas de estas celdas; de tal forma que se pueda simular algunas otras condiciones que son importantes en ingeniería geotécnica. Un ejemplo es la celda volumétrica presentada por Ng y Pang (2000). Ellos adicionaron una celda de carga sujeta al pistón de carga, y localizada en el interior de la celda para evitar que la carga medida incluya el error de la fricción. Para esta celda, la carga axial se aplica en el exterior (fig. 2.9). Dicha celda también cuenta con un micrómetro para determinar el desplazamiento vertical.



(a) (b)

Figura 2.9
Celda de presión volumétrica modificada (Ng and Pang, 2000). (a) celda volumétrica modificada; (b) componentes de la celda

Todas las celdas mencionadas trabajan con el siguiente principio: La presión de aire se aplica en el interior de la celda, presión que a su vez se transmite a la muestra de suelo. Entonces, el agua de la muestra de suelo incrementa su presión

en la misma cantidad de presión de aire. Debido a esto, existe un gradiente de presiones entre el agua del suelo y el agua en el sistema de medición, lo cual trae como consecuencia que el agua de la muestra empiece a fluir hacia el sistema de medición hasta que se alcance un equilibrio (fig. 2.10). Una vez que se alcanza el equilibrio, la diferencia entre la presión de aire y agua es la succión del suelo. Para el caso de las celdas mostradas previamente, la presión de poro del agua se mantiene a valores atmosféricos, es decir, con un valor de cero.

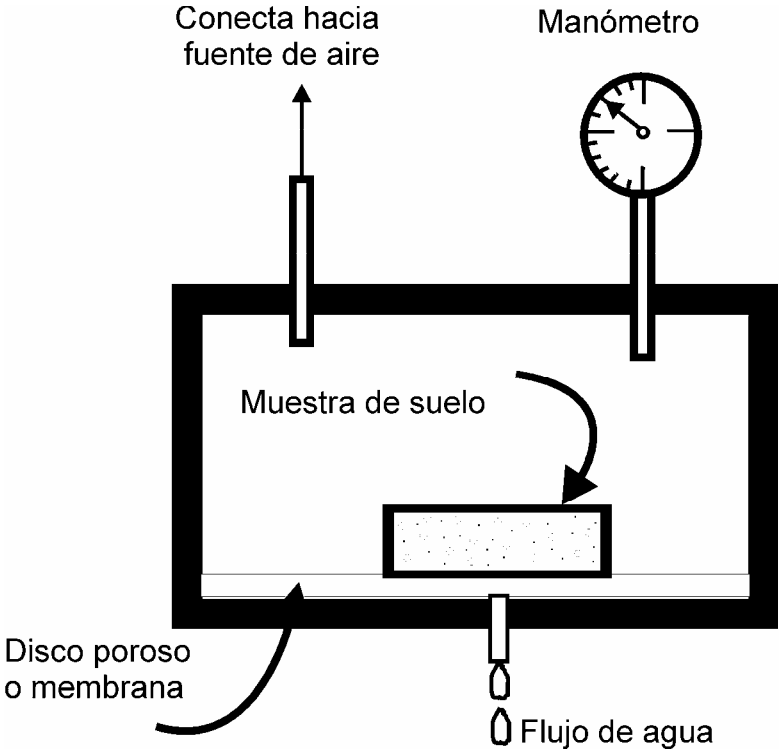


Figura 2.10
Fenómeno físico en el que se basa la celda de presión

3 Factores que afectan la determinación de la curva característica

De igual forma que algunas otras propiedades de los suelos, la determinación de la curva característica también depende de varios factores. Entre otros, están: la densidad del espécimen de prueba, el contenido inicial de agua, el tipo de suelo, la energía de compactación usada en la preparación del espécimen, etc. A continuación se describe el impacto de cada factor en la determinación de la curva característica.

3.1 Tipo de suelo

Como se explicó en el capítulo 2, la forma de la curva característica depende del tipo del suelo. La fig. 3.1 muestra tres curvas correspondientes a tres tipos de suelos clasificados como SM, CL y CH, según el sistema unificado de clasificación de suelos.

Se puede observar que a medida que el suelo es más plástico, la capacidad de retención de agua es mucho mayor; además, los suelos con menos plasticidad presentan una curva más plana (retienen muy poca agua) cuando la gráfica se presenta en una escala aritmética (fig. 3.1)

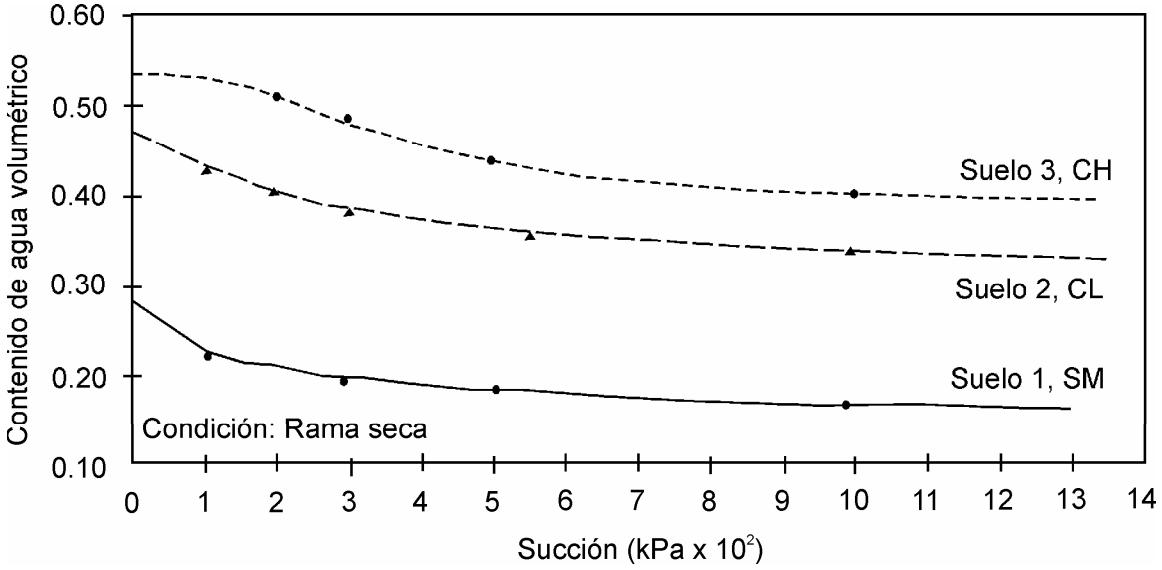


Figura 3.1
Curvas características para tres tipos de suelo (suelo 1: SM, suelo 2: CL, y suelo 3: CH) (Miller, et al, 2002)

3.2 Energía de compactación

Miller, et al (2002), presentaron una serie de curvas características obtenidas a diferentes energías de compactación (reducida, estándar, y modifica) para un suelo tipo CH. Los resultados muestran que el efecto de la energía de compactación es menos marcado para el caso de la estándar y de la modificada; sin embargo, para la energía reducida (15 golpes, tres capas), la curva se localiza muy por debajo de las otras dos curvas (fig. 3.2), lo cual se explica por la diferencia en la porosidad de la muestra. A medida que la energía de compactación se incrementa, los vacíos existentes son mucho menores.

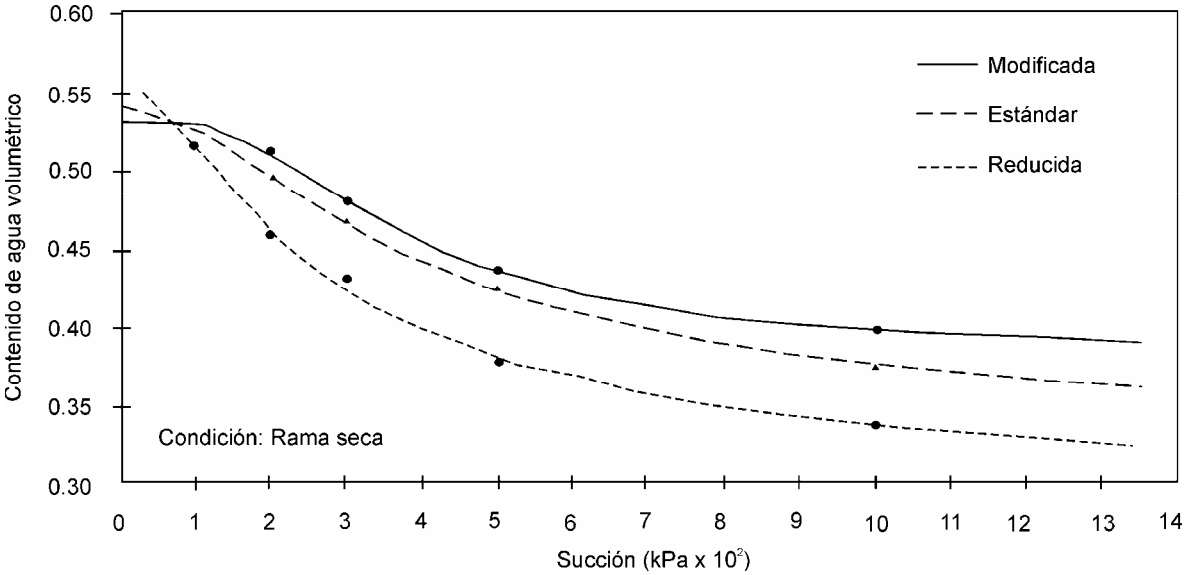


Figura 3.2
Efecto de la energía de compactación en la curva característica (Miller, et al., 2002). Suelo CH

Yang, et al (2004), también presentaron el efecto de la relación de vacíos en la determinación de la curva característica para una arena arcillosa compactada a dos valores de densidad seca. La curva muestra que el espécimen con una densidad seca menor tiene un valor de entrada de aire mucho menor. Por otro lado, para el suelo con una mayor densidad, la curva se localiza por encima de la de menor densidad a partir de 10 kPa, lo que demuestra que para un valor de succión mátrica mayor al valor de entrada de aire y para un mismo valor de succión, el suelo con más densidad o menor relación de vacíos puede mantener más agua a medida que el valor de la succión mátrica se incrementa (fig. 3.3). Por ejemplo, para 100 kPa de succión mátrica, el suelo con mayor densidad tiene un contenido de agua volumétrico de aproximadamente 0.26; mientras que para la muestra con densidad menor, el contenido de agua volumétrico es de 0.24 (fig. 3.3).

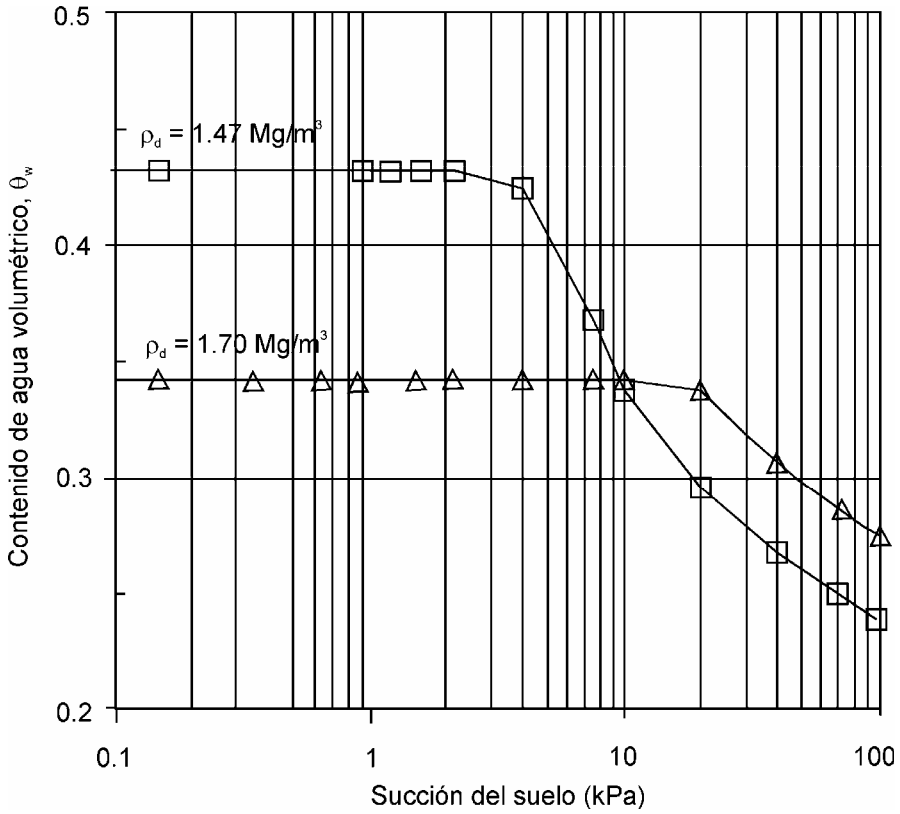


Figura 3.3
Efecto de la densidad en la curva característica

Como se mostró en los párrafos anteriores, la curva de compactación de suelos finos compactados sí muestra algunos cambios, dependiendo de la energía de compactación que se aplique; sin embargo, Sugii, et al (2003), citado por Cevat (2006), mostró que la curva característica para arenas es independiente de la energía de compactación (fig. 3.4). Lo que se observa en la figura pareciera obvio, ya que en arenas, aunque la energía de compactación se incremente, no se logra mayor acomodo de las partículas, lo que trae como consecuencia que para el rango de contenidos de agua que se manejaron, las densidades varían muy poco. Por tanto, la curva característica para suelos granulares es independiente de la energía de compactación.

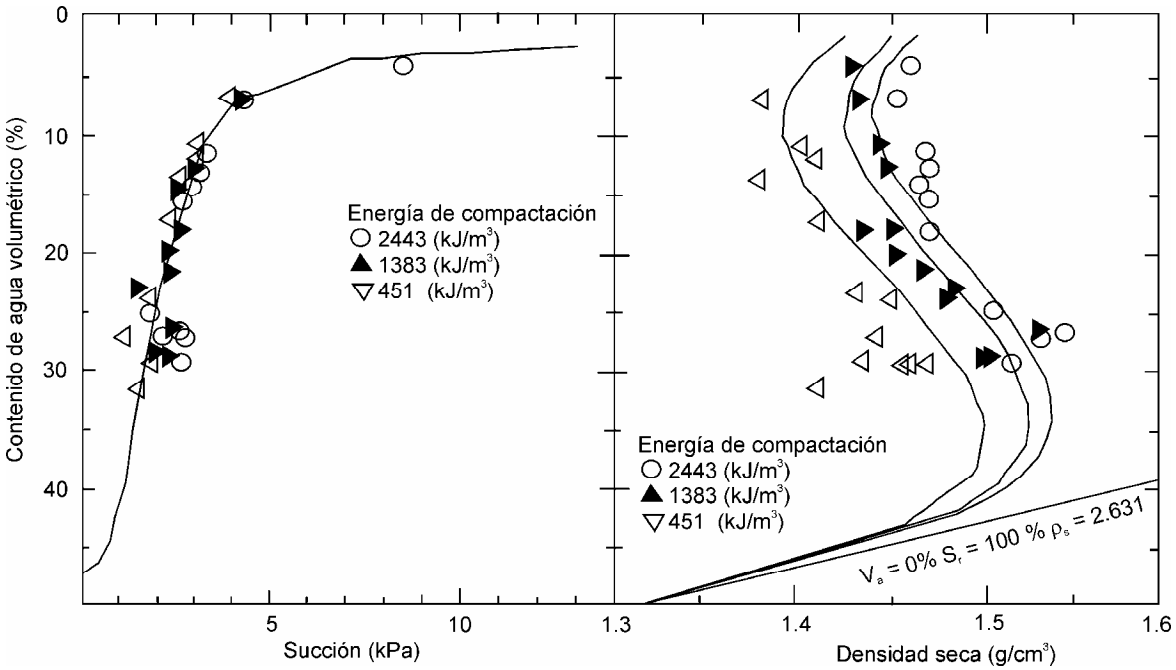


Figura 3.4
Compactación y curvas características (Sugii, et al., 2003)

3.3 Efecto del contenido de agua de compactación

Miller, et al (2002), llegaron a la conclusión de que el contenido de agua inicial de la muestra no influye de manera importante en la determinación de la curva característica. Por ejemplo, la fig. 3.5 muestra que las curvas características para dos muestras compactadas con energía de compactación modificada, pero a diferentes contenidos de agua iniciales (contenido de agua en la rama seca y húmeda) no presentan diferencia, a excepción de la variación que presenta en el rango de 0 a 200 kPa, que es precisamente en el rango en donde no se realizaron mediciones.

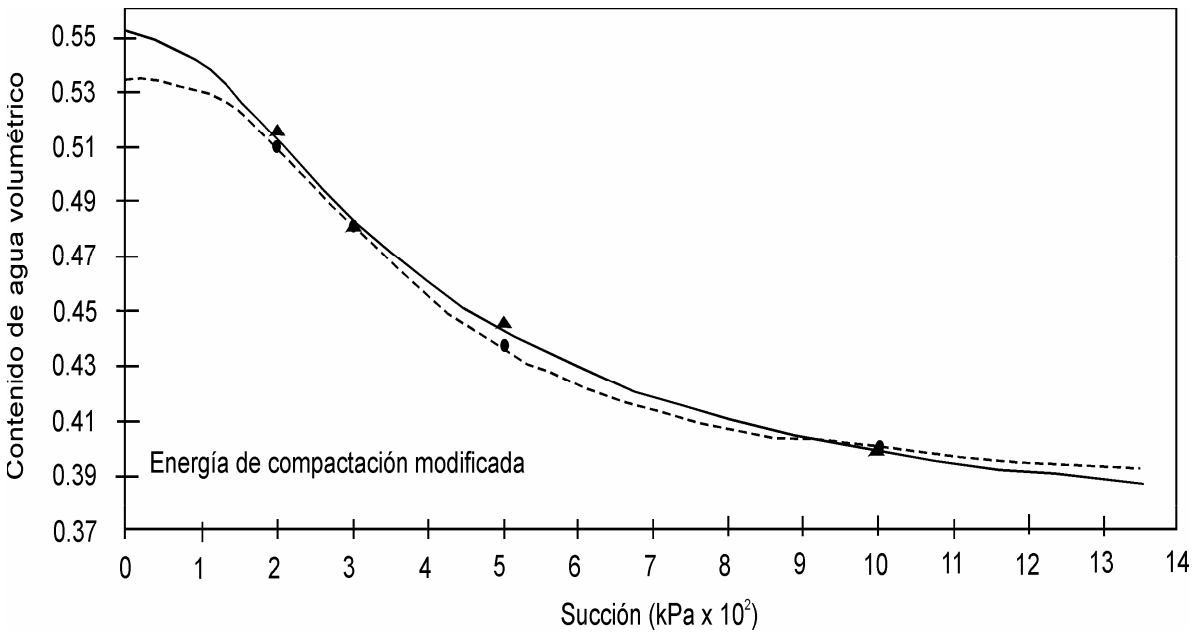


Figura 3.5
Efecto del contenido de agua de compactación en la curva característica (Miller, et al 2002)

Vanapalli (1994), al igual que algunos otros investigadores, también realizó un estudio para observar el efecto del contenido inicial de agua en las curvas características. El suelo en estudio fue un till de Saskatchewan, Canadá. Los contenidos de agua utilizados en los especímenes fueron: el óptimo, por debajo del óptimo, y un valor mayor al óptimo.

Sus resultados muestran que el contenido de agua inicial del espécimen tiene cierto efecto en la determinación de la curva para cierto rango de succiones (fig. 3.6). Nótese que para el espécimen ensayado con contenido de agua inicial menor, la curva se localiza en la parte inferior cuando la succión es menor a 10 000 kPa; para valores mayores, las tres curvas tienden a converger. Por otro lado, las curvas obtenidas de especímenes compactados con contenido de agua óptimo y con un valor más alto al óptimo, parecen tener diferencias ligeras.

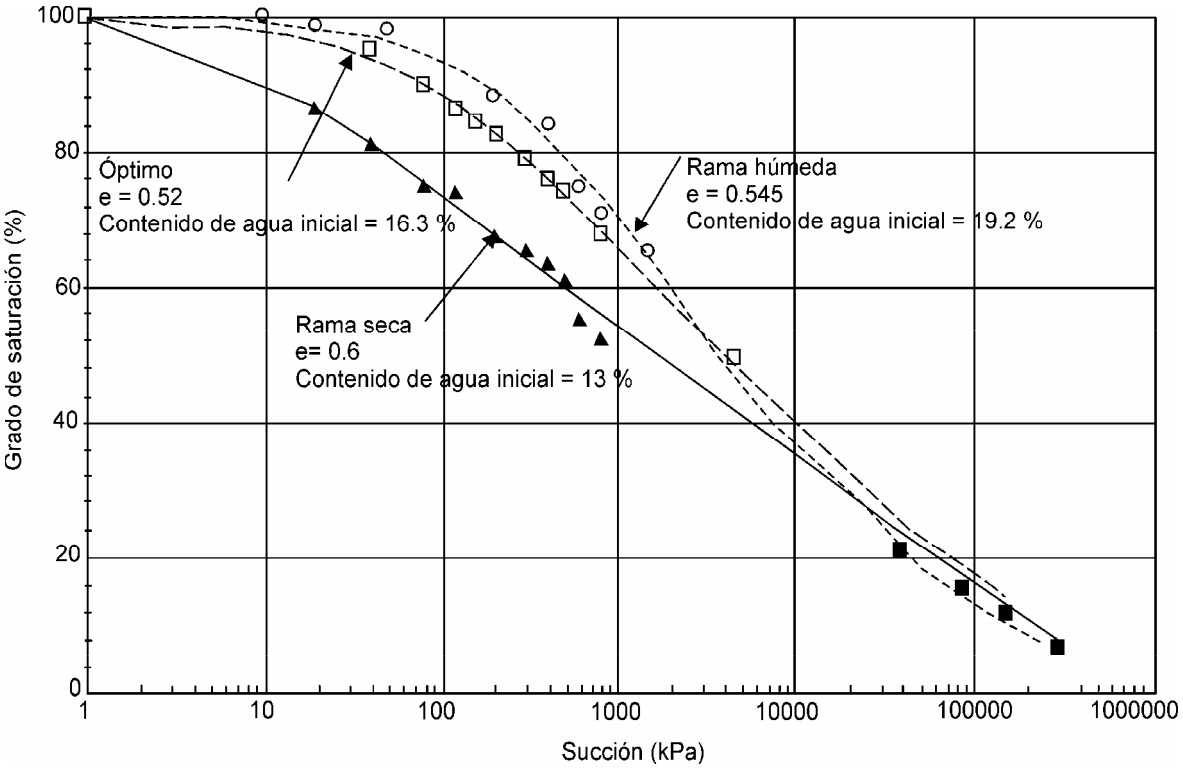


Figura 3.6
Curvas características para un till de Canadá a diferentes contenidos de agua inicial (Vanapalli, 1994)

3.4 Tipo de compactación

El tipo de compactación utilizado dará como resultado diferencias en la estructura que el espécimen adquiera; por tanto, la curva característica también se verá afectada como lo muestra la fig. 3.7. Los resultados señalan que al compactar en condiciones estáticas, la curva característica presentará mayores contenidos de agua que si se compacta en forma dinámica.

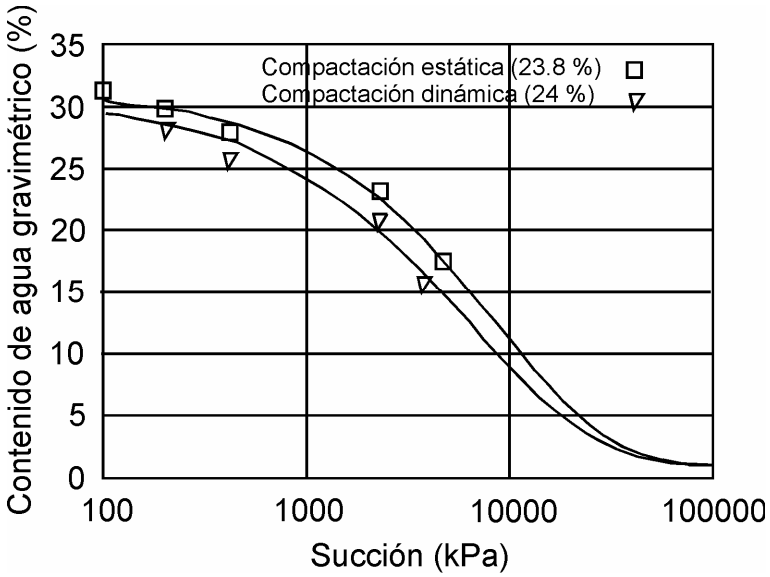


Figura 3.7
Efecto del tipo de compactación en la relación succión contra contenido de agua gravimétrico

3.5 Influencia del estado de esfuerzos

La influencia del estado de esfuerzos en la curva característica es quizá uno de los factores que se ha estudiado menos. Vanapalli (1994), y Ng y Pang (2000), son algunos de los investigadores que han presentado resultados con respecto a este efecto. Ng y Pang (2000) señalan que las curvas características obtenidas de especimenes inicialmente cargados y descargados en un consolidómetro convencional y después ensayados en una celda de presión volumétrica, muestran una variación importante. Por ejemplo, la fig. 3.8 se observa que el espécimen que no fue sometido a ningún esfuerzo previo a la determinación de la curva característica se desatura más rápido; mientras que para el caso del espécimen sujeto a una mayor precarga, la curva es más plana; y para un mismo valor de succión la cantidad de agua que retiene es mucho mayor. Además, el valor de entrada de aire se incrementa para la curva de 80 kPa de precarga. Para el caso de las otras dos curvas, el valor de entrada de aire tiene poca diferencia.

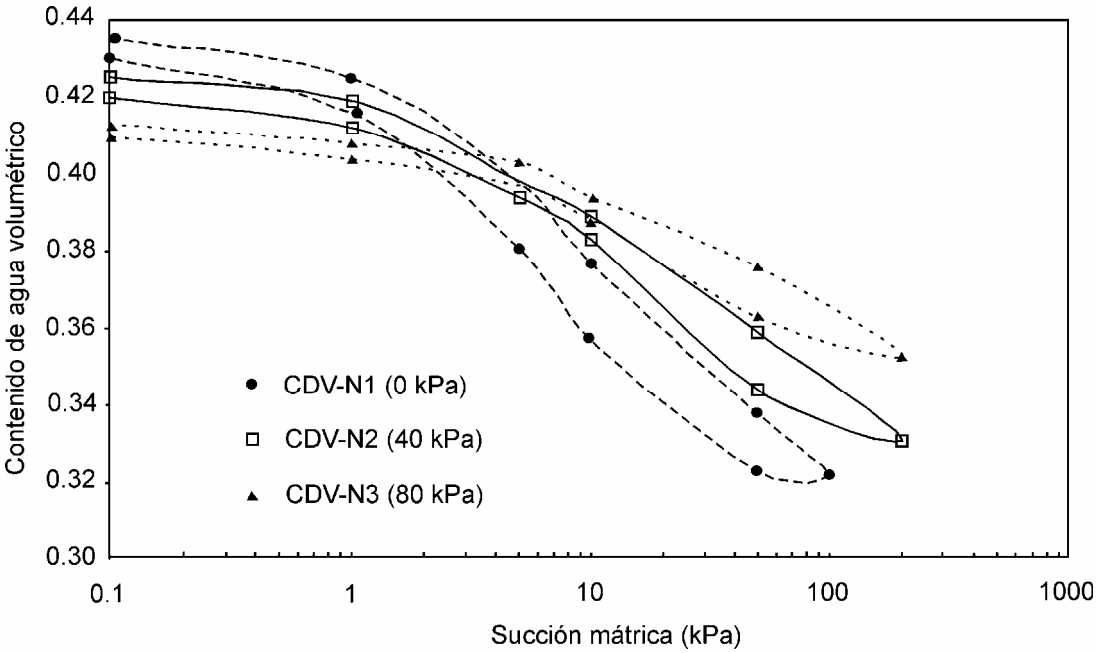


Figura 3.8
Efecto del estado de esfuerzos en la curva característica

3.6 Técnica de saturación del espécimen

Barbosa, et al (2002), citado por Cevat (2006), muestra dos curvas características en donde se utilizaron dos métodos para saturar los especímenes compactados. El primero consistía en colocar el espécimen en agua y después someterlo a vacío; mientras que el segundo era saturar el espécimen con vacío y después sumergirlo en agua.

Los resultados mostraron que el espécimen que se sumergió en agua y después se le aplicó vacío, presentó un grado de saturación mayor (fig. 3.9); por tanto, las curvas características de ambos especímenes son diferentes al menos en el rango de 1 a 50 kPa. Para succiones mayores, las curvas convergen.

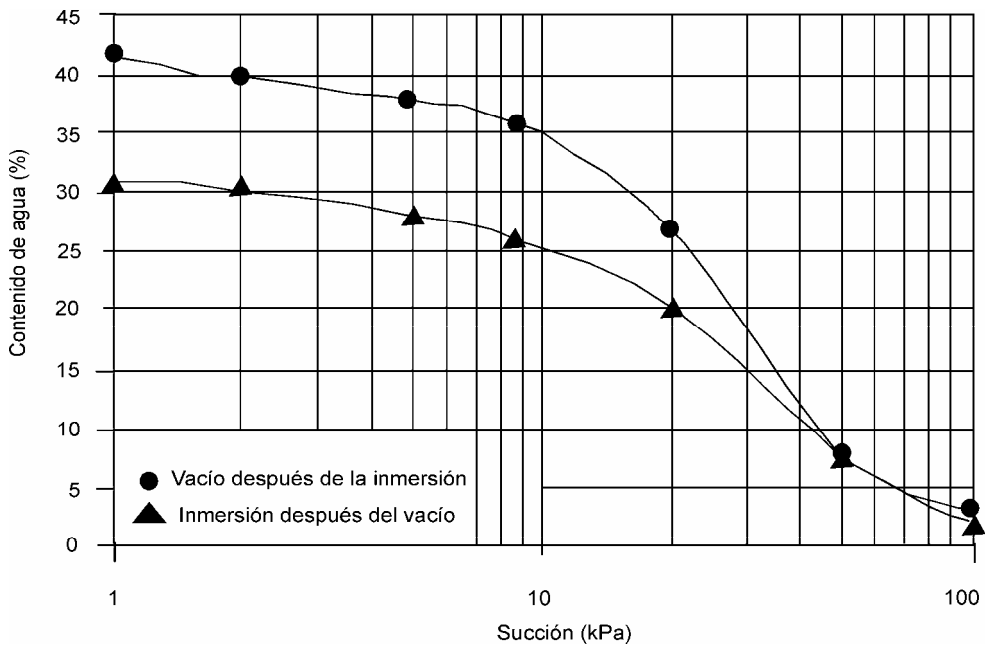


Figura 3.9
Efecto de la técnica de saturación en la determinación de la curva característica

3.7 Histéresis

La relación succión contra contenido de agua de un suelo no es única. Considérese, por ejemplo, un suelo que sufre un proceso de secado ya sea por evaporación o por drenaje, y otro en un proceso de humedecimiento por efecto de la lluvia o por capilaridad. En ambos casos y para el mismo valor de succión, se tiene que el suelo en proceso de secado retiene más agua que el que sufre humedecimiento. Este fenómeno se llama “histéresis”. Puede deberse al aire atrapado, la no uniformidad, y a diferentes tamaños de los poros, expansión y contracción del suelo que puede alterar la estructura del suelo, etc. (Tuller y Or, 2005; Likos y Lu, 2004).

Como se señaló en los párrafos anteriores, la definición de la curva característica depende de varios factores. Hasta la fecha no existe ninguna norma para su determinación, por lo que cada uno de los investigadores usa diferentes métodos, equipos y procedimientos. Al respecto, sería deseable contar con una norma de tal forma que al realizar comparaciones de resultados obtenidos por diferentes investigadores las bases de datos no involucren muchas variables, y así poder mejorar las correlaciones y modelos respaldados por estos resultados.

4 Descripción y evaluación de la celda de presión modificada

Las celdas de presión del capítulo anterior determinan la curva característica sin tomar en cuenta dos aspectos muy importantes en problemas geotécnicos: el efecto del cambio de volumen del espécimen cuando se incrementa o reduce la succión durante la prueba; y el efecto de sobrecarga.

La medición de cambio de volumen se dejó de lado, ya que las celdas usadas en la obtención de la curva característica se diseñaron para estudiar el comportamiento del suelo desde un punto de vista de la ciencia del suelo en donde la característica principal a determinar, es la capacidad de éste para retener agua.

Debido a lo anterior, profesores del área de geotecnia de la Universidad Estatal de Arizona en conjunto con la empresa Geotecnical Consulting and Testing Systems (GCTS) y el Dr Delwyn Fredlund de la Universidad de Saskatchewan, Canadá, desarrollaron una celda de presión modificada que contara con aditamentos para simular el efecto de sobrecarga, y se pudiera llevar a cabo la medición del cambio de volumen del espécimen. En los siguientes párrafos se presenta la descripción de la celda, modificaciones realizadas, y su funcionamiento.

4.1 Descripción de la celda de presión

Las celdas fabricadas en la Universidad Estatal tienen las siguientes características (Perera, 2003):

- Capacidad de simular la presión de sobrecarga mediante la aplicación de pesos muertos colocados sobre la placa de carga
- Determinación del volumen de agua que fluye hacia adentro del espécimen o fuera de el en cualquier momento de la prueba
- Capacidad de medir la deformación vertical del espécimen
- Determinación de varios puntos de la curva característica sin que el espécimen sea removido en los diferentes cambios de succión mátrica
- Expulsión del aire difuso cuando así se requiera
- Compensación del movimiento del pistón debido a la aplicación del aire, etc

La fig. 4.1 muestra el grupo de celdas de presión puestas en operación.

Figura 4.1
Celdas de presión para determinación de curva característica (Zapata, 2006)

Los equipos de prueba para suelos no saturados deben cumplir con el requisito de poder medir o controlar en forma independiente la presión de poro de agua y de aire. A continuación se muestra y describen la forma de controlar o medir la presión de poro de agua, aire, temperatura, etc, para la celda en cuestión.

4.1.1 Control de la presión de poro del agua

La presión de poro del agua se mantiene en condiciones atmosféricas por medio de dos buretas conectadas a la base de la celda y abiertas a la atmósfera (fig. 4.2). Para evitar la evaporación de las buretas se coloca un tapón de papel aluminio en la parte superior de éstas.

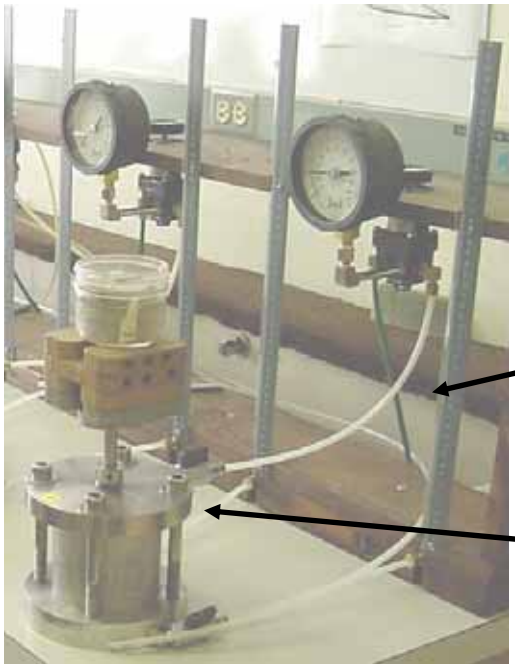
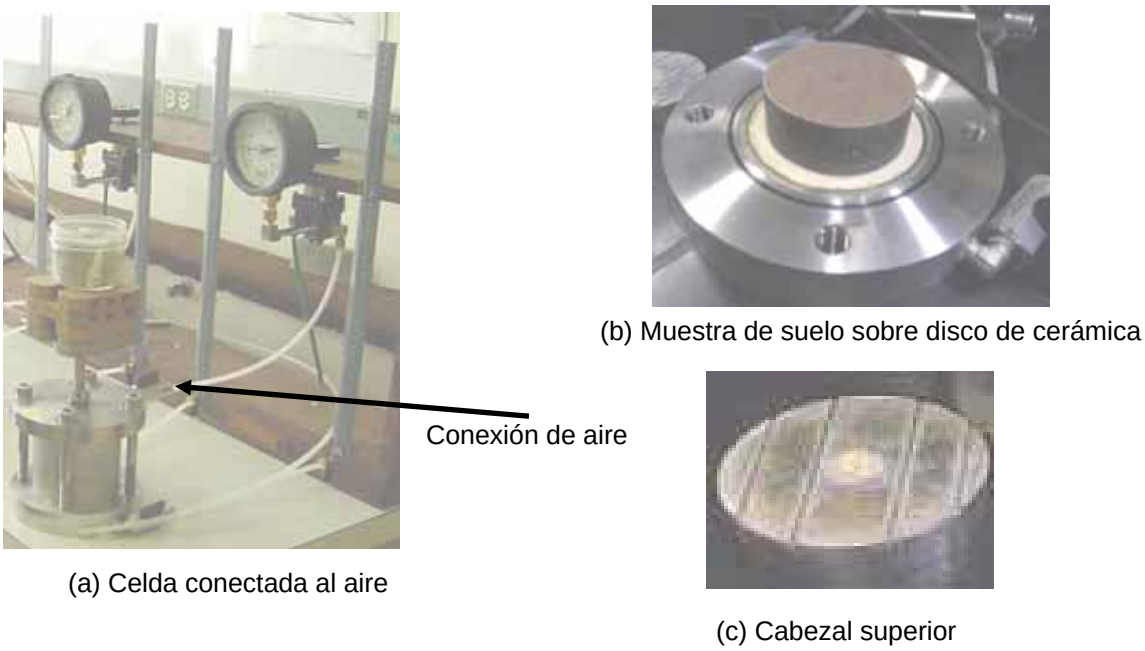


Figura 4.2
Celda de presión y buretas para control de la presión de poro del agua

4.1.2 Control de la presión de aire

El suministro de presión de aire hasta una presión máxima de 650 kPa se lleva a cabo mediante un compresor; para presiones mayores, las celdas se conectan a un tanque de nitrógeno.

Para permitir el flujo de aire al espécimen de suelo, el cabezal superior cuenta con unas ranuras de aproximadamente 1 mm de profundidad y ancho, como lo ilustra la fig. 4.3c.



(a) Celda conectada al aire

(b) Muestra de suelo sobre disco de cerámica

(c) Cabezal superior

Figura 4.3
Componentes del control de presión de aire

4.1.3 Control de la temperatura

La determinación de la curva característica por medio de las celdas de presión requiere varios cuidados; entre otros, el control de la temperatura del lugar donde se localizan los equipos de prueba.

El laboratorio de la Universidad Estatal de Arizona se mantiene controlado a una temperatura de $\pm$ 1ºC; sin embargo, en varias pruebas se observó que aun cuando la temperatura no tenía un amplio rango de variación, el vapor de agua se condensaba en algunas partes de la celda durante el proceso de prueba. Algo similar fue registrado por Tanner y Elrick y reportado en el Journal de Soil Science en 1958. La solución a este problema fue colocar un bloque calentador sobre la parte superior de la celda; no obstante, los autores no mencionan si esto resolvió el problema completamente.

Durante el proceso de experimentación del trabajo mostrado en este documento se colocaron bloques calentadores a cada una de las celdas para evitar la condensación del vapor de agua, y así eliminar errores en el cálculo del contenido de agua, o grado de saturación de la muestra (fig. 4.4).

(a)

(b)

(c)

Figura 4.4
(a) Condensación del vapor de agua en el interior de la celda; (b) bloque calentador; (c) bloque calentador colocado sobre la parte superior de la celda

4.1.4 Aplicación de la sobrecarga

Para aplicar la sobrecarga al espécimen, la celda cuenta con una placa circular atornillada a al pistón de carga (fig. 4.4c) en donde se colocan los pesos muertos de la magnitud requerida para provocar el esfuerzo de sobrecarga deseado. Para contrarrestar la fricción que se produce en el pistón se coloca peso adicional a la sobrecarga, de tal forma que el pistón se mueva libremente.

Otro de los aditamentos es el compensador, cuya función es evitar que el pistón experimente un movimiento debido a la aplicación del aire en el interior de la celda.

4.1.5 Discos de cerámica de alto valor de entrada de aire

Uno de los componentes más importantes de la celda es el disco de cerámica de alto valor de entrada de aire (fig. 4.5b). Éstos discos se pegan a un anillo de acero inoxidable, y posteriormente se colocan en la base de la celda (fig. 4.5a). Los discos de cerámica son el medio para controlar en forma independiente la presión de poro de agua y de aire. En condiciones saturadas, únicamente permiten el flujo de agua, e impiden el paso de aire. Sin embargo, a medida que la presión de aire se incrementa, éste inicia un proceso de difusión a través del agua del disco y se acumula en el sistema de medición de la presión de poro de agua, trayendo como consecuencia errores en los volúmenes de agua registrados en las buretas.

Generalmente, no existen reglas para el uso de tales discos; no obstante, al seleccionarlo se deberán tomar en cuenta factores, tales como: la permeabilidad del suelo en estudio; la difusión del aire; el tiempo de prueba; etc. Por ejemplo, cuando el disco de cerámica es muy delgado, las cantidades de aire difuso se incrementan pero la trayectoria de drenaje es mucho más corta; por tanto, el tiempo de prueba se acortará. Por otro lado, se usan discos con valor de entrada de aire de 1 500 kPa (15 bar) cuando el nivel de succión a aplicarse es mayor. En este caso los poros de la cerámica son demasiado pequeños, entonces, los tiempos de equilibrio se incrementan.

Al realizar pruebas en este tipo de celda, es recomendable emplear discos de cerámica con permeabilidad más alta, para rangos de succión mátrica baja y cambiarlo para succiones mayores. Esto reduce los tiempos de prueba de forma importante.

(a) **(b)**

Figura 4.5
(a) Base de la celda; (b) discos de cerámica de alto valor de entrada de aire

4.2 Evaluación de la celda modificada

4.2.1 Determinación del contenido de agua

Un aspecto importante del procedimiento para determinar la curva característica con la celda de presión modificada es la determinación del contenido de agua o grado de saturación del espécimen. Este cálculo se puede llevar a cabo mediante los siguientes métodos:

- Determinación del grado de saturación o contenido de agua tomando en cuenta las lecturas de volumen de agua en las buretas y

- Sacando la muestra de la celda una vez que se logra el equilibrio bajo una cierta succión, determinar su peso y realizar un retrocálculo para determinar el contenido de agua para cada nivel de succión aplicado

En esta investigación se llevaron a cabo varias pruebas en las que se calculó el grado de saturación del espécimen a diferentes valores de succión mátrica, con los métodos señalados. De los resultados se observó que existían diferencias. Para el caso analizado (fig. 4.6), en el punto final se tiene una diferencia de 6.3 % en grados de saturación, y 1.32 % con respecto a contenido de agua.

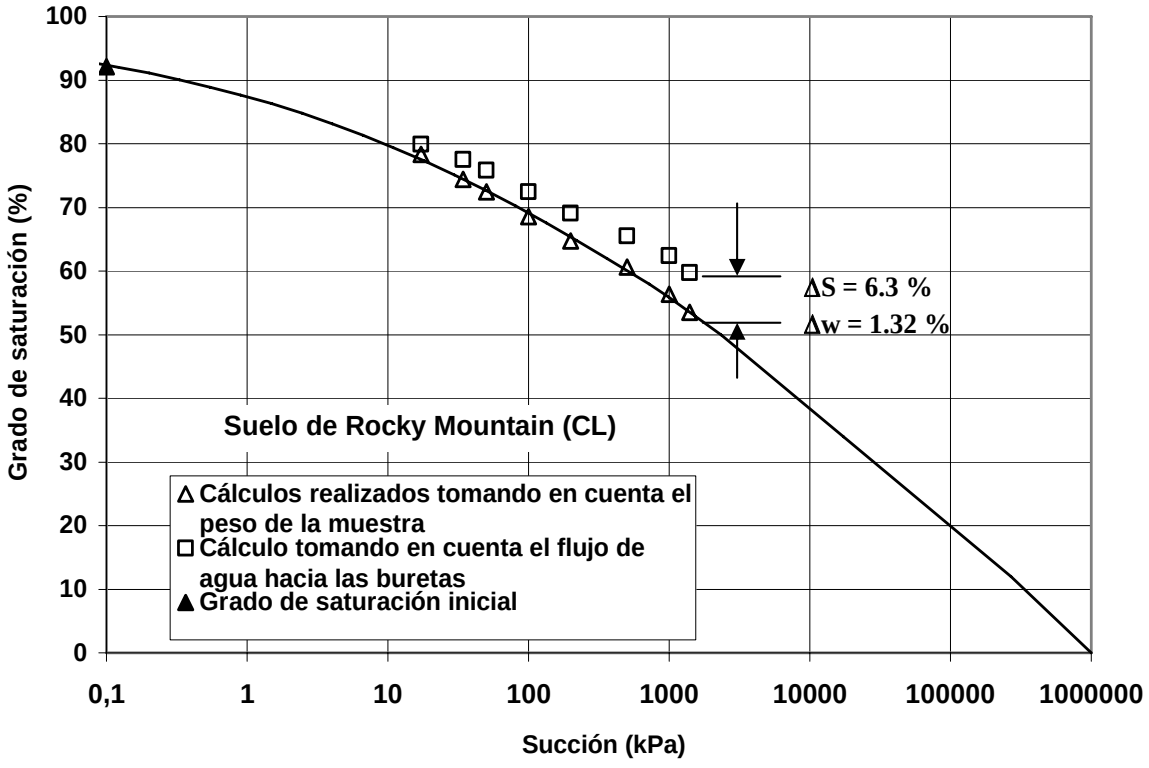


Figura 4.6
Curvas características obtenidas con ambos procedimientos

En la misma gráfica se observa que a menor succión el error es menor, por tanto, el error máximo se obtiene en el último valor de succión aplicado a la muestra.

Algunas de las causas a la que se atribuyeron estas diferencias fueron las siguientes:

- Cambios de temperatura en el cuarto de prueba (condensación del vapor de agua)
- Errores debidos a la pérdida de material que se adhiere a la cerámica cuando se extrae la muestra para ser pesada
- Pérdida de agua durante el proceso de pesado de la muestra
- Fugas de aire en las conexiones de la celda, lo que ocasiona vapor de agua y hace que el espécimen pierda agua, etc

El siguiente inciso muestra la evaluación del efecto de temperatura, ya que es uno de los factores que influyen en forma importante en las diferencias que se obtuvieron en los cálculos.

4.2.1.1 Efecto de los cambios de temperatura

Como se mencionó en el inciso previo, una vez que el espécimen alcanzaba el equilibrio a un valor de succión, la celda se abría para extraer el espécimen y pesarlo. Durante este proceso, generalmente se observó que el agua se condensaba en las paredes de la celda, en la pared del anillo que contiene la muestra, y en la placa de acero colocada en la parte superior del espécimen para transmitir la sobrecarga, etc. (fig. 4.4a).

El problema de condensación se solucionó colocando un bloque calentador en la parte superior de la celda como lo hicieron Tanner y Elrick (1958). De hecho, Fredlund y Rahardjo (1993), también recomiendan el uso de este bloque calentador, además de un saturador de aire seco para evitar que el espécimen pierda humedad.

Después de colocar el bloque calentador, se realizó una prueba en una arcilla de baja plasticidad. En esta prueba no se removió el espécimen en cada incremento de succión mátrica para evitar introducir más variables en el estudio. Sólo se tomo el peso del espécimen al final de la prueba. Por tanto, únicamente en el punto mencionado se realizó la comparación de grados de saturación (fig. 4.7).

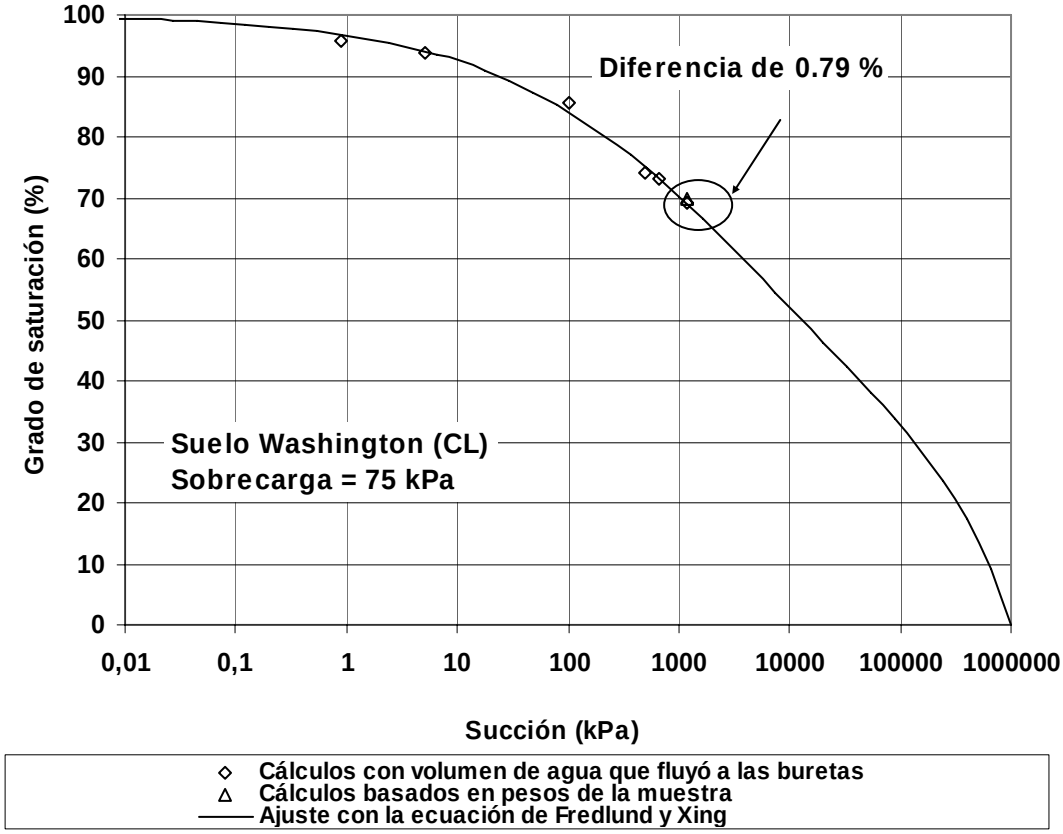


Figura 4.7
Curva característica obtenida después de colocar el bloque calentador sobre la celda

La fig. 4.7 indica que la diferencia en grados de saturación fue mínima (0.79%) comparada con las que se obtenían antes de colocar los bloques calentadores. De hecho, para el caso de una prueba con arena de Yuma, la diferencia que se obtuvo al final, aun cuando ya se había colocado el bloque calentador fue mayor. Por tanto, pareciera ser que el bloque calentador resolvió el problema para el caso de suelos finos, pero no en arenas. Debido a eso, se recurrió a otra solución como fue colocar un controlador de temperatura para el bloque calentador; además de un instrumento para medir la temperatura en el interior de la celda y un ventilador pequeño para circular el aire en el interior de la celda. Se cambió también el sello del pistón de carga para evitar fugas de aire.

La fig. 4.8 corresponde a la curva obtenida después de haber realizado las modificaciones mencionadas. Los resultados muestran que para esta prueba, el error al final es sólo un 1.2 %, valor pequeño comparado con los errores obtenidos anteriormente.

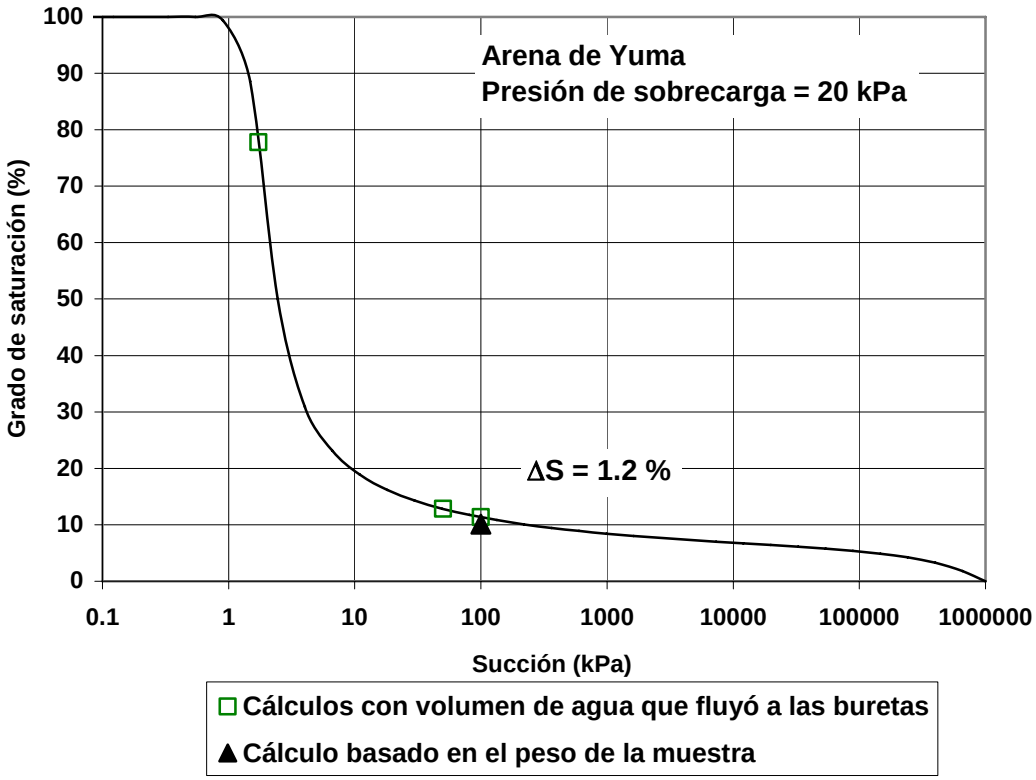


Figura 4.8
Curva característica determinada después de colocar el control de temperatura para el bloque calentador y algunos otros aditamentos

Los tres aspectos restantes a los que se atribuyó el error, también se evaluaron; sin embargo, se encontró que estos no influían de forma importante en el error que se estaba presentando en los cálculos de grado de saturación o contenido de agua; por tanto, no se discuten como el caso del efecto de temperatura.

4.2.2 Succión mátrica en el rango de 0-5 kPa

Para suelos granulares es importante obtener la curva característica a valores de succión mátrica muy bajos (0-5 kPa), ya que es la región en donde la mayor parte del volumen de agua drena si se lleva a cabo la determinación de la curva característica en trayectoria de secado. A pesar de ello, con los reguladores de presión de aire usados normalmente, no se pueden controlar presiones tan bajas. Una forma de aplicar tales presiones es por medio de una columna de agua.

Además, al controlar o medir succiones en este rango es importante tomar en cuenta la corrección al valor de succión debida a la presión aplicada por la columna de agua que se tiene en las buretas. Esta corrección deja de tener sentido para valores altos de succión.

4.2.3 Difusión de aire a través de los discos de cerámica

Aun cuando los discos de cerámica están fabricados para evitar el paso del aire, al llevar a cabo pruebas en suelos no saturados se presenta el fenómeno de difusión del aire a través del agua que se encuentra en los poros de la piedra. Durante la evaluación del equipo, también se realizaró una serie de pruebas en las que se midieron los volúmenes de aire difuso.

La fig. 4.9 muestra que los volúmenes de aire difuso se incrementan en forma lineal a medida que el valor de la presión de aire aplicada se incrementa. La gráfica mencionada corresponde a discos de cerámica de 1 500 kPa.

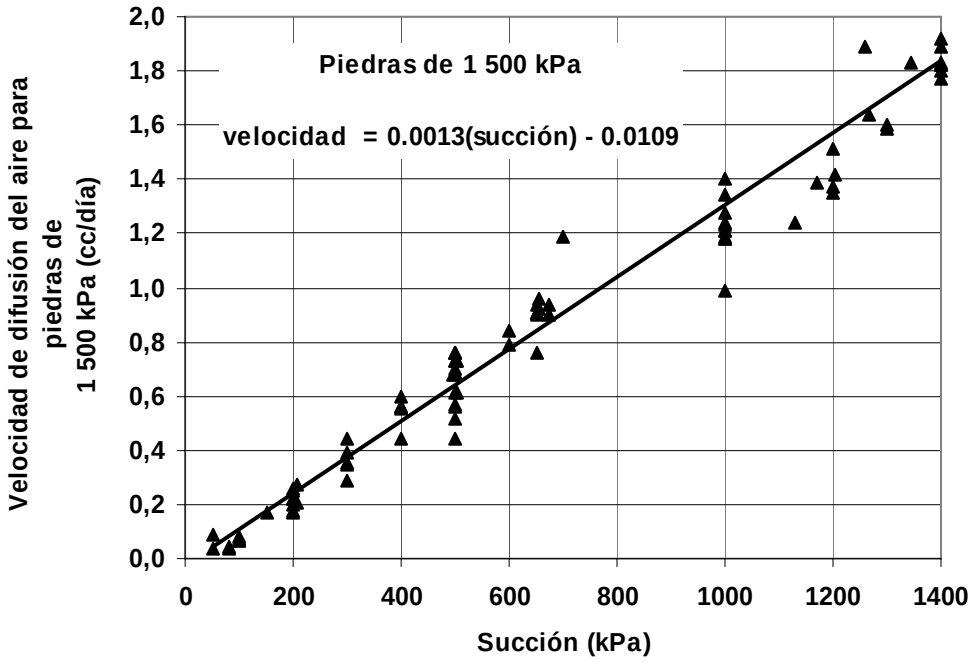


Figura 4.9
Aire difuso en piedras con valor de entrada de aire de 1 500 kPa

En el caso de la celda evaluada, el aire difuso no constituye un problema ya que la base va conectada a dos buretas. En una de ellas se aplica una pequeña presión de aire para provocar un movimiento del agua hacia la otra bureta. Cuando esto ocurre, el aire también se mueve y es expulsado por la segunda bureta; por tanto, las medidas de volumen no requieren ninguna corrección.

5 Resultados obtenidos

5.1 Introducción

En los inicios de la mecánica de suelos e ingeniería de pavimentos, las propiedades índice fueron uno de los principales indicadores del comportamiento de los suelos. Sin embargo, con el transcurso de los años, el conocimiento de las propiedades índice ya no fue suficiente para poder predecir el comportamiento de los materiales, debido a que las cargas impuestas al terreno de cimentación se incrementaron. Por ejemplo, para el caso de carreteras, el nivel de carga aplicada por el tránsito aumentó y el número de vehículos creció de algunos miles de unidades a millones. Por otro lado, en el caso de cimentaciones para edificios, el nivel de carga aplicado continúa incrementándose ya que con el paso de los años, el hombre sigue construyendo edificaciones cada vez más altas lo cual provoca presiones de contacto mucho mayores.

Ahora es necesario llevar a cabo pruebas mucho más sofisticadas para determinar parámetros que describan en una forma más adecuada el comportamiento de los materiales. Dentro de dichas pruebas se pueden mencionar las que se llevan a cabo para suelos no saturados, es decir, pruebas de permeabilidad, de resistencia al esfuerzo cortante, de consolidación, etc.

Una de las tendencias actuales en la mecánica de suelos no saturados es formar bases de datos con diferentes tipos de suelos, y con propiedades que van desde propiedades índice, propiedades mecánicas determinadas en suelos saturados, hasta propiedades determinadas en condiciones no saturadas y que sirven de base para determinar las correlaciones y modelos enfocados a la predicción de propiedades más complejas.

El capítulo anterior presentó la evaluación de una celda de presión modificada para determinar curvas características. En tanto que el presente capítulo describe y presenta la recopilación de resultados de curvas características para varios tipos de suelos muestreados en algunos estados de la Unión Americana. No obstante, a pesar de que el énfasis de los resultados es sobre curva característica, también se presentan los resultados de propiedades índice y características de compactación para los suelos de prueba. Esta información puede ser útil a investigadores interesados en obtener datos que sirvan como base para verificar modelos o determinar correlaciones.

5.2 Propiedades índice de los suelos de prueba

Los suelos ensayados corresponden a muestras alteradas seleccionadas de diversos estados de la Unión Americana. La idea inicial del proyecto fue establecer una base de datos con todas las propiedades de los suelos, tales como

propiedades índice, propiedades de compactación, curvas características, parámetros mecánicos obtenidos de muestras saturadas, parámetros para suelos no saturados, etc, de tal forma que combinados con datos de literatura se formara una base de datos de tal calidad que se pudieran respaldar la determinación de correlaciones para las funciones de suelos no saturados; sin embargo, por cuestiones de tiempo, sólo se determinaron las curvas características para siete tipos de suelos.

Las tablas 5.1, 5.2 y 5.3 muestran las propiedades de los suelos ensayados en el estudio.

Tabla 5.1
Propiedades índice de los suelos

Nombre del suelo	Clasific SUCS	Características de compactación		Límites de Atterberg			G_s	Pasa malla 200 %	wPI
		w_{opt} %	γ_{dmax} kN/m^3	LL %	PL %	PI %			
Suelo de Price Club	CL-ML	10,8	19,57	26	18	8	2,71	54,8	4,4
Suelo de Ocotillo	CL	15,5	17,78	36	20	16	2,75	70,0	11,2
Suelo de Sheely	CL	22,5	15,97	41	24	17	2,79	94,8	16,1
Suelo de ASU east	SM	10,5	19,54	NP	NP	NP	2,71	27,0	-
Arena de Yuma	SP	-	-	NP	NP	NP	2,66	0,36	-
Suelo de Rocky Mountain	CL	13,0	18,15	29	17	12	2,70	63,7	7,6
Suelo de Washington	CL	18,3	16,56	39	21	18	2,73	94,3	17,0

Tabla 5.1
Texturas

Nombre del suelo	Textura			
	% grava	% arena	% limo	% arcilla
Suelo de Price Club	0,00	45,20		
Suelo de Ocotillo	1,06	28,92	40,02	30,0
Suelo de Sheely	0,00	5,20	49,78	45,02
Suelo de ASU east	5,92	67,05	19,63	7,4
Arena de Yuma	0,23	99,41	0,36	0,00
Suelo de Rocky Mountain	0,03	36,28	37,19	26,5
Suelo de Washington	0,37	5,35	67,28	27,0

Tabla 5.3
Granulometrías

Nombre del suelo	Tamaños (% más fino que)							
	¾ in	3/8 in	No. 4	No.8	No. 10	No.40	No.100	No.200
Suelo de Price Club	100	100	100	96,8	88,6	72,5	63,4	54,8
Suelo de Ocotillo	100	99,8	98,9	97,4	96,8	87,0	77,3	70,0
Suelo de Sheely	100	99,9	99,9	99,9	99,9	99,3	97,5	94,8
Suelo de ASU east	99,7	97,8	94,1	87,3	85,0	54,6	34,8	27,0
Arena de Yuma	100	100	99,8	99,5	99,4	65,2	5,3	0,36
Suelo de Beumont	100	100	99,7	99,3	99,1	98,3	97,4	88,9
Suelo de Rocky Mountain	100	100	99,9	99,9	99,9	96,4	77,3	63,7
Suelo de Washington	100	99,9	99,6	99,2	99,2	98,5	97,9	94,3

Ee las tablas se puede observar que los suelos tienen un amplio rango en cuanto a texturas. Se ensayaron desde arenas hasta suelos muy finos clasificados como arcilla de baja plasticidad (Sheely Soil, Ocotillo, Rocky Mountain y Washington).

Por su parte, en la tabla 5.1 se presenta el parámetro “wPI”, que en algunos casos puede usarse para predecir la curva característica de suelos finos (Zapata, 1999), y está definido como:

$$wPI = PI * \frac{Pasa200}{100} \qquad (1)$$

Donde:

PI = índice plástico del suelo
Pasa200 = porcentaje de material que pasa la malla No 200

Otra de las propiedades que se determinaron para el proyecto fueron las características de compactación. La tabla 5.1 muestra los valores de contenido de agua óptimo y el peso volumétrico seco máximo obtenidos para cada uno de los suelos.

La fig. 5.1, incluye todas las curvas de compactación. Tales curvas pueden dar una idea de la ubicación de los diferentes tipos de suelos en el espacio de compactación Proctor Estándar.

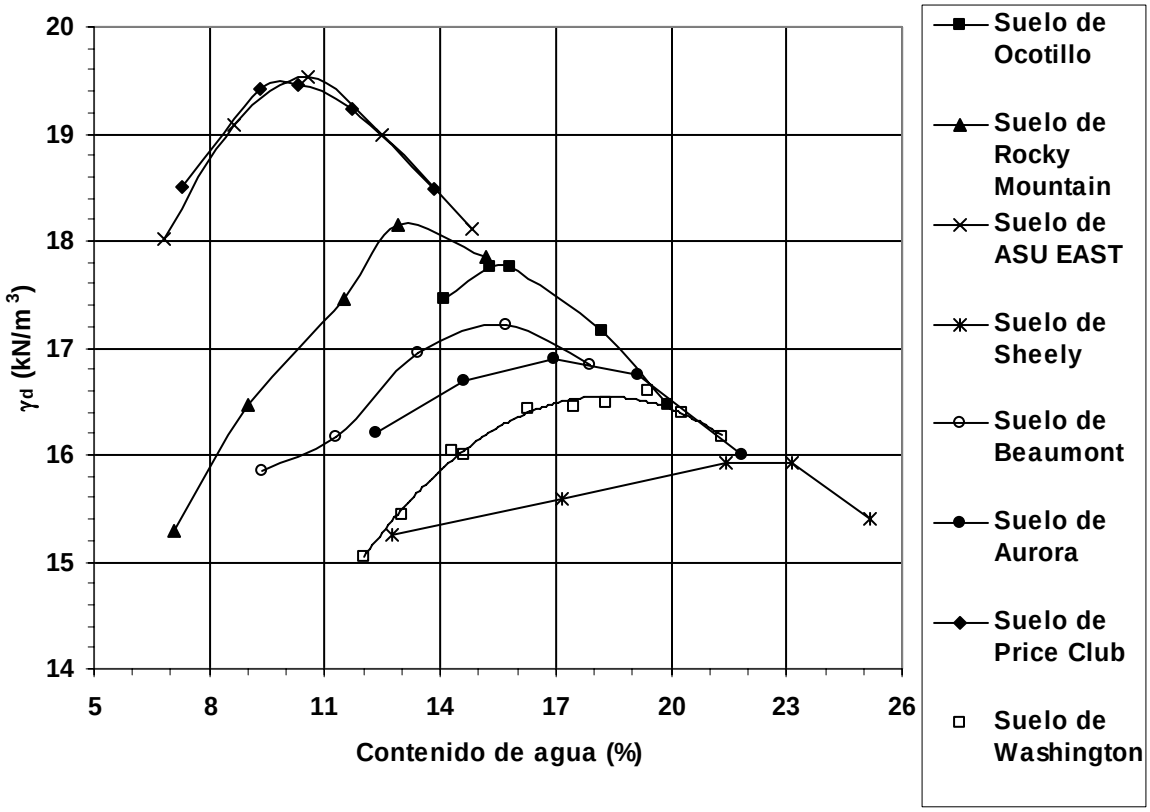


Figura 5.1
Curvas de compactación de los suelos ensayados

5.3 Factores que afectan la curva característica

Antes de presentar las curvas características para los suelos estudiados, se señalará el efecto de algunos factores que influyen en su determinación, y que fueron evaluados como parte del estudio.

5.3.1 Efecto de la sobrecarga

Uno de los factores de los que depende la curva característica es la presión de sobrecarga. En el presente estudio se llevaron a cabo pruebas para presiones de 20, 75 y 196 kPa.

La gráfica 5.2 muestra que para el limo de Price Club, la presión de sobrecarga no ejerce gran efecto en la curva. Por otro lado, los valores de entrada de aire para las sobrecargas de 20 y 75 kPa son alrededor de 2 kPa; mientras que para el caso de 196 kPa, el valor de entrada de aire únicamente presenta un ligero incremento (6 kPa).

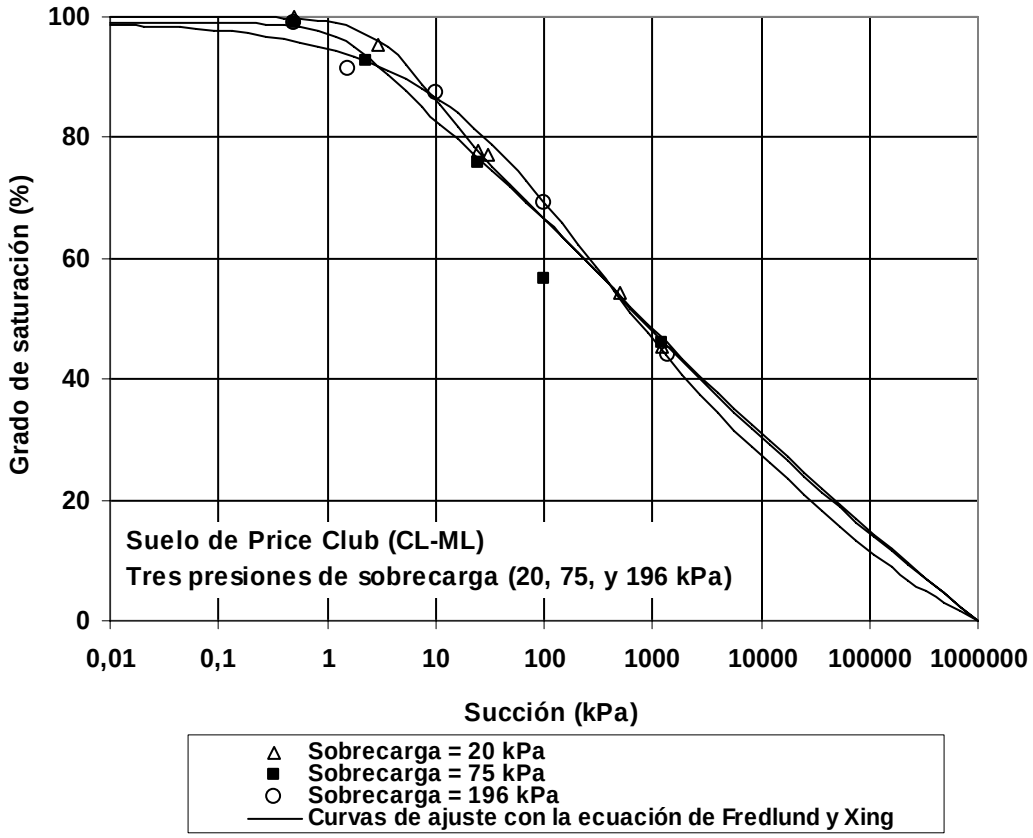


Figura 5.2
Curvas características para el suelo de Price Club a tres diferentes presiones de sobrecarga

El suelo de ASU east fue otro de los suelos que se ensayaron a diferentes presiones de sobrecarga. Al igual que el suelo de Price Club, muestra sólo ligeras diferencias en las curvas con el incremento en la presión de sobrecarga (fig. 5.3).

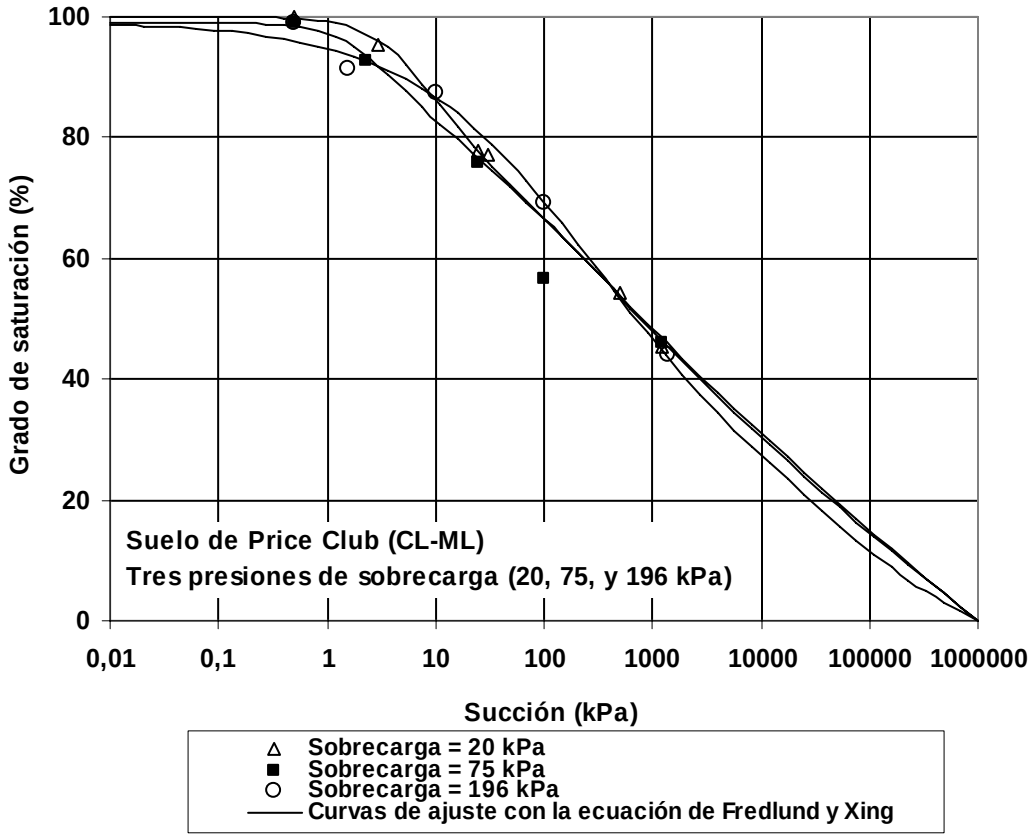


Figura 5.3
Curvas características a tres presiones de sobrecarga para el suelo de ASU east

De las curvas anteriores, pareciera ser que el efecto de sobrecarga se puede despreciar. Sin embargo, posiblemente es necesario ensayar más suelos con diferentes texturas, por ejemplo, arcillas de alta compresibilidad y así obtener suficientes evidencias a fin de poder concluir que en verdad el efecto de sobrecarga es despreciable.

5.3.2 Contracción del espécimen

Al llevar a cabo la determinación de la curva característica en la celda de presión, no se puede evitar la contracción de los especímenes a medida que la succión se incrementa (fig. 5.4); este efecto no es importante en suelos donde la plasticidad es nula, no obstante, es más notorio en suelos arcillosos.

Figura 5.4
Contracción del espécimen durante la determinación de la curva característica en trayectoria de secado

En varias de las pruebas llevadas a cabo se observó que el efecto de contracción, al menos para los suelos ensayados, se nota a partir de 200 kPa de succión. Durante la realización de los ensayes se optó por desarrollar la curva característica con dos o tres puntos por debajo de 200 kPa de succión (en donde no es necesaria ninguna corrección por contracción del espécimen), y aplicar el último valor de succión a 1 400 kPa. En este punto se tomaban las medidas del espécimen, de tal forma que se pudiera calcular su volumen lo más preciso posible, y tomar ese valor para el cálculo del grado de saturación.

La fig. 5.5 muestra una curva característica para el suelo de Ocotillo (CL) obtenida con el procedimiento mencionado. Obsérvese que la corrección en el último punto es muy pequeña; sin embargo, podría especularse que a succiones mayores la corrección podría ser una cantidad importante, y más en el caso de suelos clasificados como arcillas de alta plasticidad.

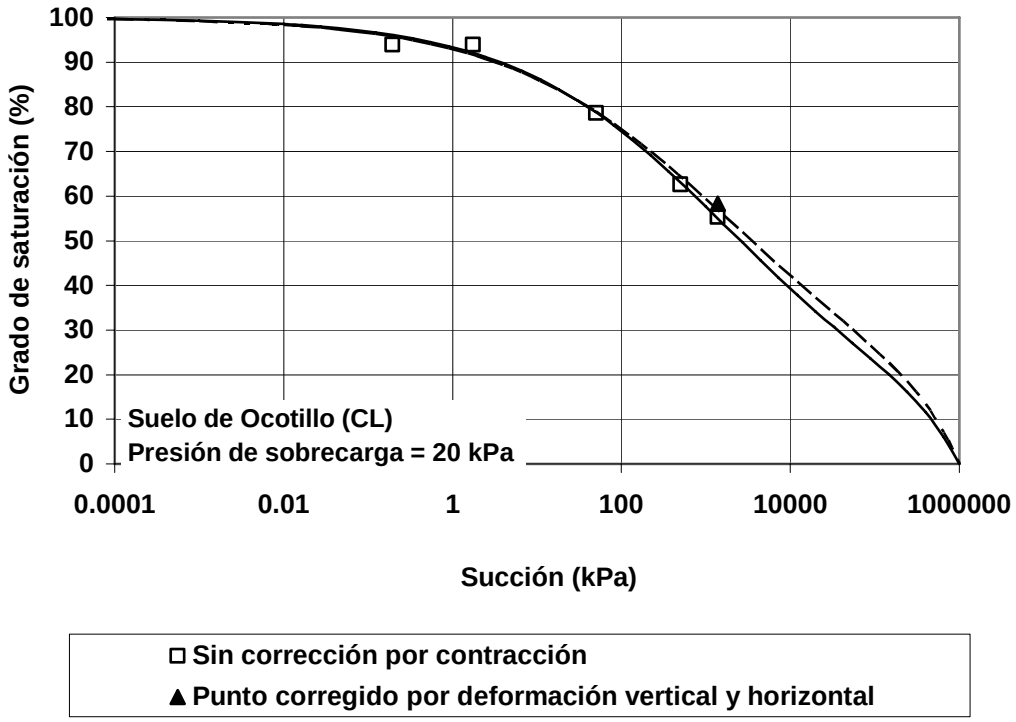


Figura 5.5
Curva característica en donde se muestra el punto corregido por contracción del espécimen de suelo

5.3.3 Efecto del grado de saturación inicial

El grado de saturación inicial del espécimen del suelo es otro de los factores importantes en la determinación de la curva característica. Algunos otros investigadores como Barbosa, et al (2002), citado por Cevat (2006), mostró que el grado de saturación inicial que se adquiera dependerá del procedimiento de saturación. Sus resultados muestran que las curvas para rangos menores a 50 kPa son diferentes cuando los grados de saturación inicial difieren (gráficas del capítulo 3).

En el presente trabajo también se determinó el efecto del grado de saturación inicial, y se llegó a la misma conclusión. En este caso se saturaron dos especímenes del suelo de ASU east. La única diferencia en ambos fue el tiempo de saturación. Aunque el grado de saturación inicial pareciera no ser tan importante, la muestra que inicia con grado de saturación más bajo se encuentra en la parte inferior; pero a medida que la succión se incrementa, las curvas tienden a converger (fig. 5.6).

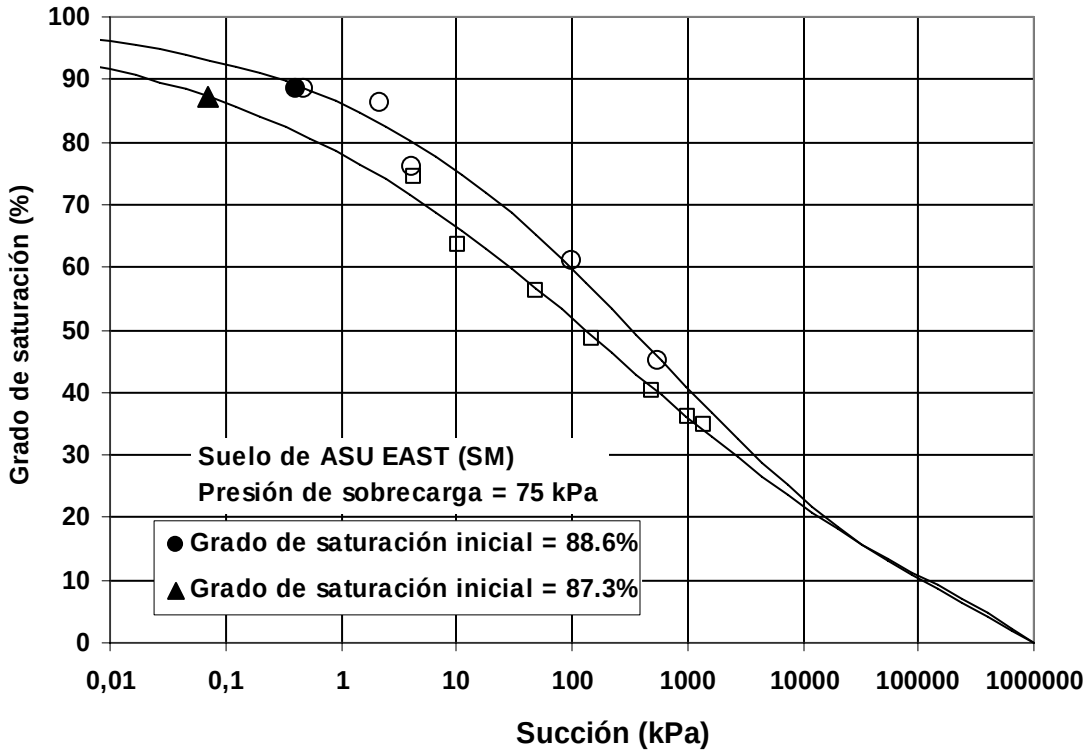


Figura 5.6
Efecto del grado de saturación en la curva característica

5.4 Curvas características finales

En los incisos anteriores se habló de algunos factores que afectan la determinación de la curva característica y que fueron estudiados en la investigación. Este inciso presenta una serie de curvas obtenidas para presiones de sobrecarga de 20, 75 y 196 kPa que se llevaron a cabo en las celdas de presión modificadas.

Como se ha venido mencionando a lo largo del trabajo, las curvas características se pueden presentar en función del contenido de agua gravimétrico, contenido de agua volumétrico, o grado de saturación. Sin embargo, el parámetro que se toma depende del autor que presente los resultados. A pesar de ello, es recomendable usar el grado de saturación; de esta forma se toman en cuenta los cambios de volumen de la muestra. De cualquier forma, aquí se hace alusión a las curvas para los tres parámetros (w, θ y S).

Las curvas de ajuste que se muestran para los datos se basan en la ecuación de Fredlund y Xing. Para obtener la curva de ajuste en términos de contenido de agua volumétrico, se utilizó el programa SvFlux.

Las figs. 5.7, 5.8, 5.9, 5.10, 5.11, 5.12, 5.13, 5.14, y 5.15 muestran el grupo de curvas características en función de w, θ y S para presiones de sobrecarga de 20, 75 y 196 kPa.

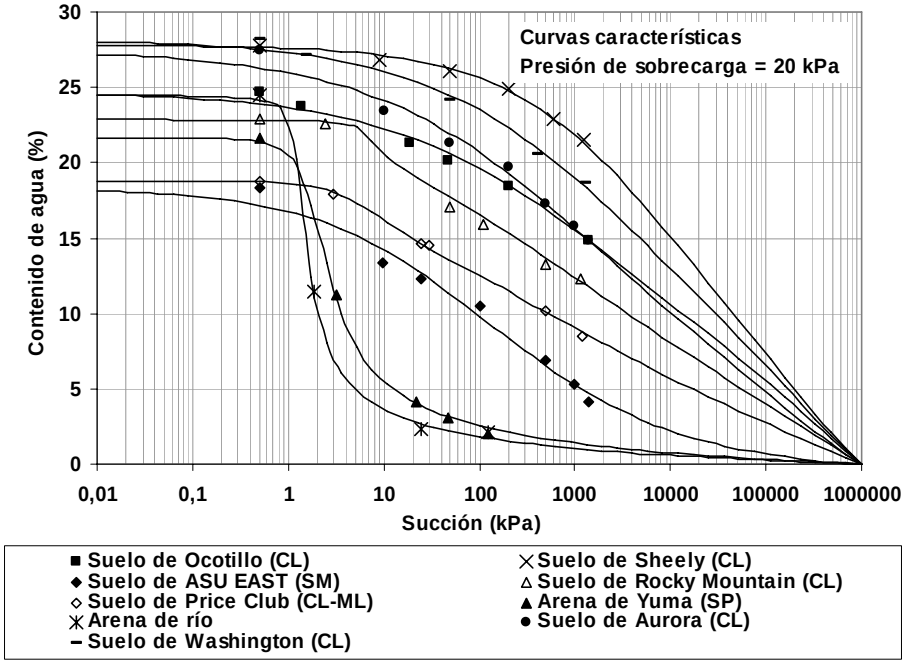


Figura 5.7
Curvas características para presión de sobrecarga igual a 20 kPa en función del contenido de agua gravimétrico

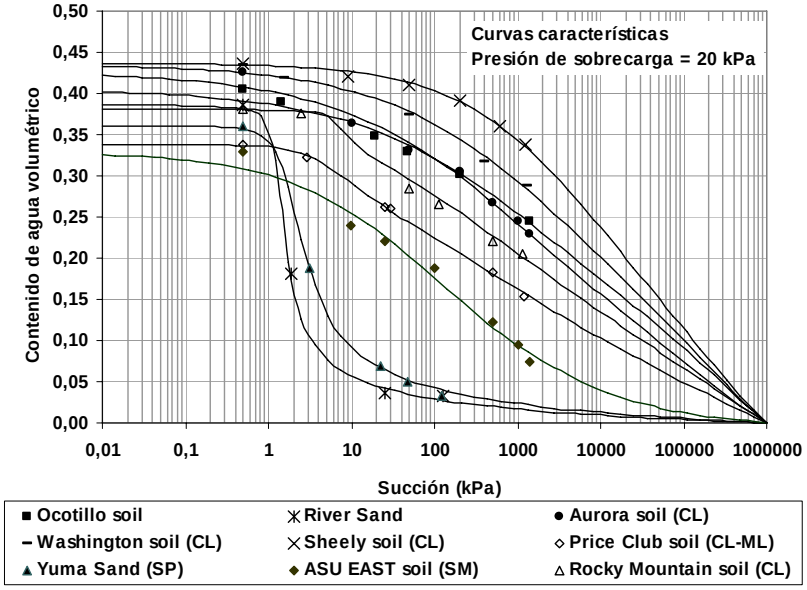


Figura 5.8
Curvas características para presión de sobrecarga igual a 20 kPa en función del contenido de agua volumétrico

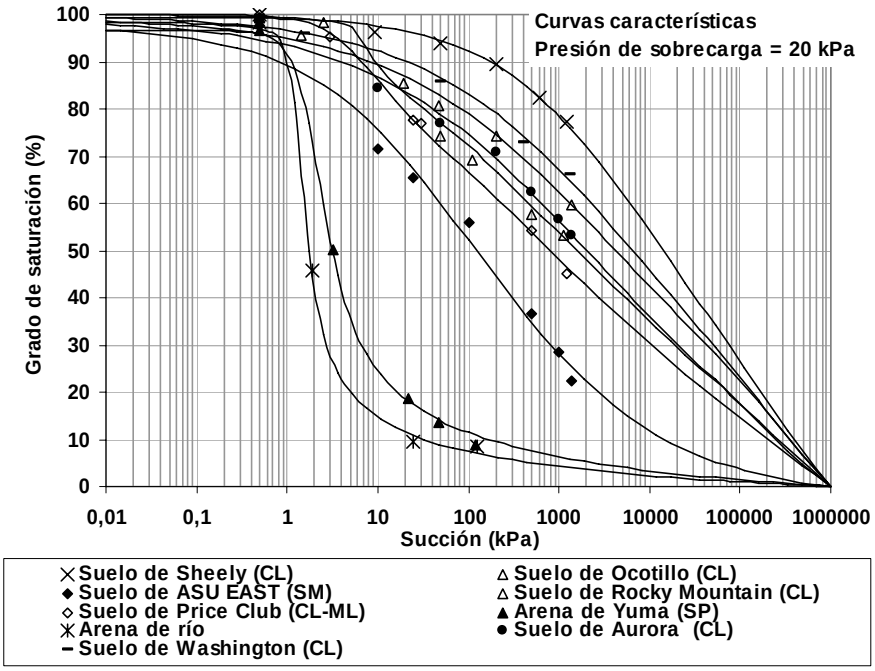


Figura 5.9
Curvas características para presión de sobrecarga igual a 20 kPa en función del grado de saturación

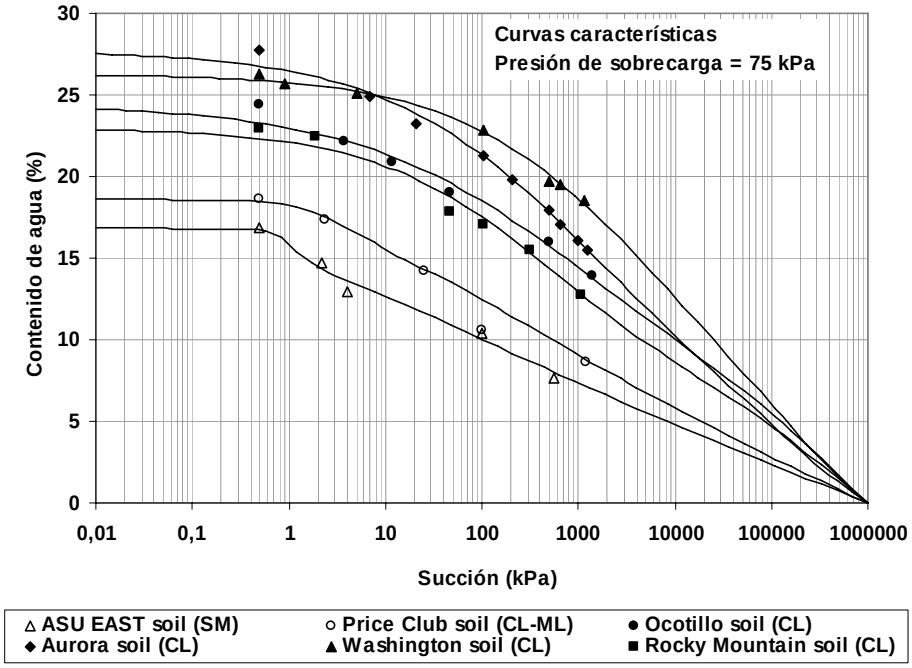


Figura 5.10
Curvas características para presión de sobrecarga igual a 75 kPa en función del contenido de agua gravimétrico

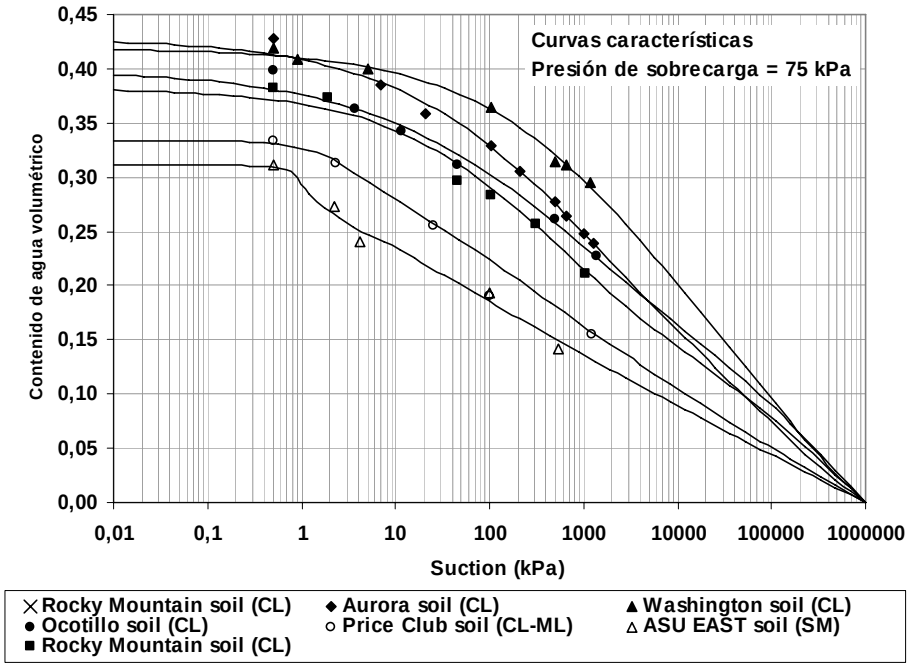


Figura 5.11
Curvas características para presión de sobrecarga igual a 75 kPa en función del contenido de agua volumétrico

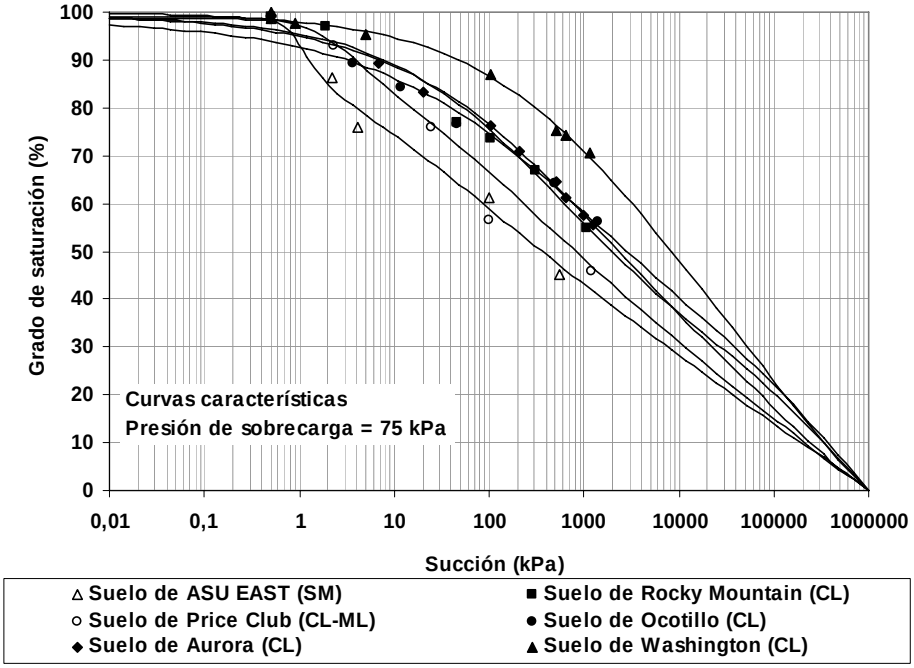


Figura 5.12
Curvas características para presión de sobrecarga igual a 75 kPa en función del grado de saturación

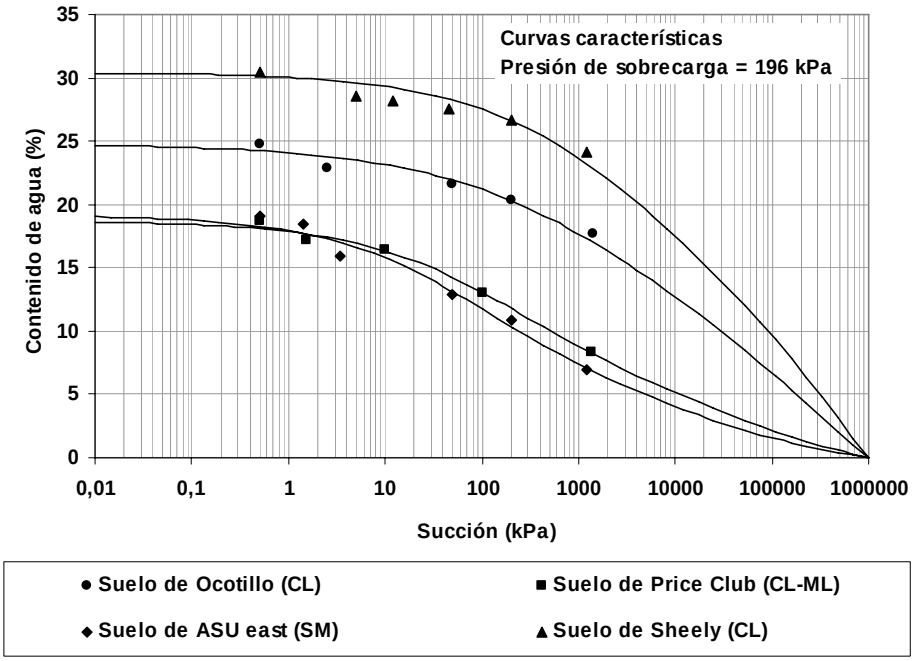


Figura 5.13
Curvas características para presión de sobrecarga igual a 196 kPa en función del contenido de agua gravimétrico

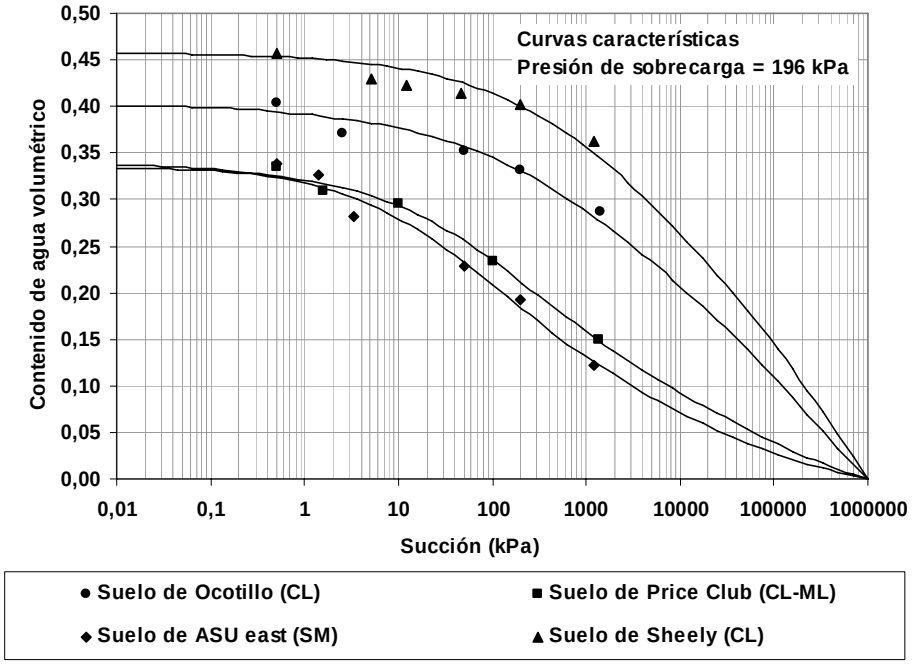


Figura 5.14
Curvas características para presión de sobrecarga igual a 196 kPa en función del contenido de agua volumétrico

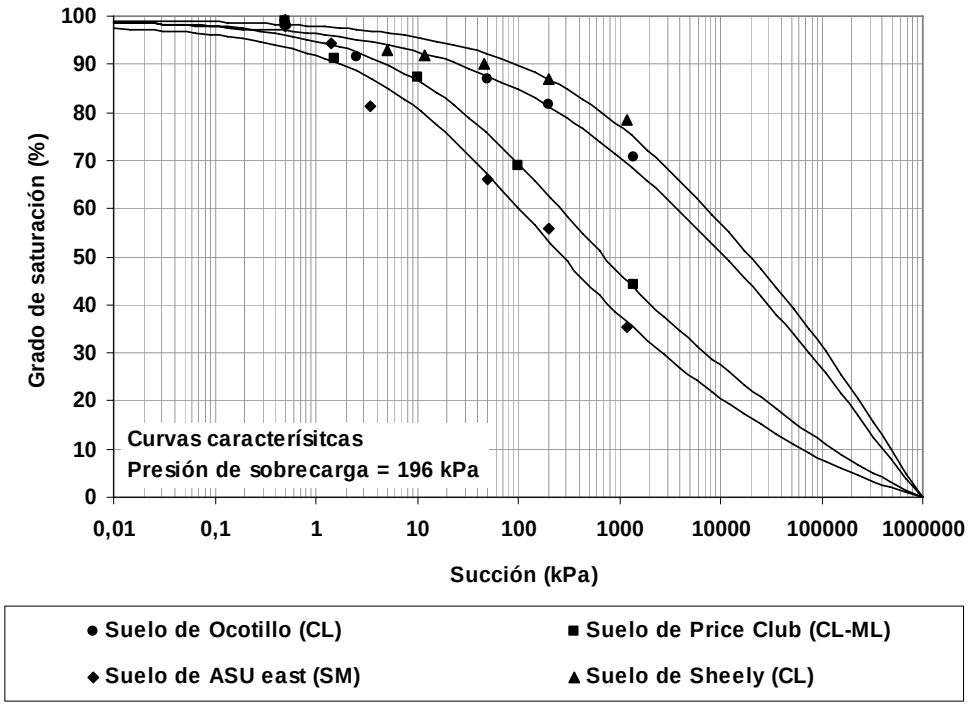


Figura 5.15
Curvas características para presión de sobrecarga igual a 196 kPa en función del grado de saturación

Las figuras anteriores muestran que las arenas se desaturan a niveles de succión muy bajos; mientras que los suelos finos, tienden a perder el agua en una forma gradual. De hecho, para el suelo de Sheely, el grado de saturación se mantiene a 80 % para el nivel máximo de succión aplicado (1 400 kPa).

Por otro lado, los suelos con limos como la arena limosa de ASU east (SM) y el suelo de Price Club, se localizan entre las curvas de la arena y arcillas de baja plasticidad (suelo de Sheely), lo que muestra que una vez que el suelo contiene cierta cantidad de material fino, la velocidad de desaturación se hace más lenta.

Conclusiones

La información presentada muestra que la determinación de la curva característica depende de varios factores. Algunos de ellos son la estructura del suelo, el peso volumétrico, el contenido inicial de agua, la historia de esfuerzos del suelo, el método de compactación, la presión de sobrecarga, etc. Por tanto, al llevar a cabo la determinación de dicha curva deberán de tenerse en cuenta dichos factores y tratar de simular en el laboratorio las condiciones que se tendrán en campo.

El trabajo también incluye la descripción de toda una serie de celdas de presión que se han utilizado en la determinación de la curva característica, mencionándose sus ventajas y desventajas para después presentar el grupo de celdas que se fabricaron en la Universidad Estatal de Arizona. Éstas trabajan con el mismo principio de las celdas que existen en el mercado, con la excepción de que tienen algunas modificaciones para poder simular el efecto de la presión de sobrecarga y poder realizar mediciones de cambio de volumen.

Al final del documento se presentan algunas curvas características en las que se muestra el efecto de algunos de los factores mencionados en el capítulo 2. De estos resultados se concluyó que al menos para el suelo de ASU east y Price Club, la presión de sobrecarga no afecta en forma importante la determinación de la curva característica. Por otro lado, es importante el cuidado de la variación de temperatura en el lugar donde se coloquen las celdas de presión. Si la temperatura varía, habrá condensación dentro de la celda durante el proceso de prueba, lo cual traería como consecuencia errores en los grados de saturación calculados para los diferentes valores de succión aplicados.

También se presentan todas las curvas características obtenidas para 20, 75 y 196 kPa de presión de sobrecarga. Todas las gráficas se muestran en términos de contenido de agua gravimétrico, contenido de agua volumétrico y grado de saturación. En todas ellas se observa que a medida que un suelo es más fino, el proceso de desaturación se hace más lento y para el caso de las arenas, el proceso de desaturación se lleva a cabo a valores de succión mátrica muy bajos.

Referencias

Cevat-Catana, M. Compaction and Water Retention Characteristics of Champlain Sea Clay. MS thesis. University of Ottawa, Canada (2006).

Hosagasi-Fuselier, T. Evaluation of Soil Water Characteristic Curves and Permeability Functions for Modelling of Seepage in Unsaturated Soils. MS thesis. Tufts University (2006)

Fredlund, M. The Role of Unsaturated Soil Property Functions in the Practice of Unsaturated Soil Mechanics. PhD thesis. University of Saskatchewan, Canada (1999)

Fredlund, D.G., Houston, S. L., y Houston, W. General Protocol for the assessment of unsaturated soil properties. Unpublished Paper (2002)

Fredlund, D. G., and Rahardjo, H. Soil Mechanics for Unsaturated Soils. John Wiley & Sons, Inc. New York (1993)

Perera, Y. Moisture Equilibria Beneath Paved Areas. PhD Dissertation. Arizona State University (2003)

Pérez, N. Development of a Protocol for the Assessment of Unsaturated Soil Properties. PhD thesis. Arizona State University (2006)

Reddy-Thudi, H. Assessment of Soil-Water Retention Properties of Lime and Cement Treated Clays. MS thesis. The University of Texas at Arlington (2006)

Zhou, J. y Yu, J.l. Influences Affecting the Soil-Water Characteristic Curve. Journal of Zhejiang University SCIENCE. 6A(8): 797-804 (2005)

Likos, W. J., and Lu, N. Hysteresis of Capillary Stress in Unsaturated Granular Soil. Journal of Engineering Mechanics, Vol. 130, No. 6 (2004)

Miller, C.J., Yesiller, N., Yaldo, K., and Merayyan, S. Impact of Soil Type and Compaction Conditions on Soil Water Characteristic. Journal of the Geotechnical and Geoenvironmental Enginering. Vol. 128, No. 9 (2002)

Ng, C.W.W., and Pang, Y.W. Influence of Stress State on Soil-Water Characteristic and Slope Stability. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. Vol 126, No. 2 (2000)

Vanapalli, S. K. Simple Test Procedures and their Interpretation in Evaluating the Shear Strength of an Unsaturated Soil. PhD Thesis, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada (1994)

Yang, H., Rahardjo, H., Leong, E.-C., and Dredlund, D. G. Factors Affecting Drying and Wetting Soil-Water Characteristic Curves of Sandy Soils. Canadian Geotechnical Journal. 41:908-920 (2004)

Taner y Elrick. Volumetric Porous (pressure) Plate Apparatus for Moisture Hysteresis Measurements. Journal of Soil Science, 575-576 (1958)

Tuller, M., and Or, D. Water Retention and Characteristic Curve. Elsevier (2005).

http://www.css.cornell.edu/faculty/hmv1/watrsoil/charcurv.htm (forma de las curvas de varios suelos)

http://www.soilmoisture.com

CIUDAD DE MÉXICO
Av. Nuevo León 210
Col. Hipódromo Condesa
CP 06100, México, D F
Tel +52 (55) 52 653600
Fax +52 (55) 52 653600

SANFANDILA
Carretera Querétaro-Galindo km 12+000
CP 76700, Sanfandila
Pedro Escobedo, Querétaro, México
Tel +52 (442) 216 9777
Fax +52 (442) 216 9671

www.imt.mx
publicaciones@imt.mx