

Comportamiento volumétrico de un suelo de la formación Capdevila en condiciones de saturación parcial

Jenny García Tristá

correo electrónico: jenny@civil.cujae.edu.cu

Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana, Cuba

Artículo Original

Willian Daniel Cobelo Cristiá

correo electrónico: wcobelo@civil.cujae.edu.cu

Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana, Cuba

Gilberto Julio Quevedo Sotolongo

correo electrónico: quevedo@uclv.edu.cu

Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Villa Clara, Cuba

Carlos Alberto García Fernández

correo electrónico: cgarcia@cemat.cujae.edu.cu

Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana, Cuba

Resumen

En la actualidad ha aumentado la necesidad de profundizar en el conocimiento de los suelos parcialmente saturados. En este trabajo se presenta la obtención y simulación de la curva de compresibilidad (e vs σ) de la formación Capdevila, ubicada en la provincia de La Habana. Se realiza una caracterización del suelo objeto de estudio, mediante el empleo de ensayos de laboratorios siguiendo las especificaciones de las normas correspondientes. La simulación de la curva de compresibilidad de suelo se realizará utilizando un modelo que parte de considerar la curva de retención del suelo y la curva de compresibilidad en condiciones saturadas, obteniéndose de las mismas las succiones y los coeficientes κ (comportamiento elástico) y λ (comportamiento plástico) del suelo estudiado, lo cual permitirá predecir el asentamiento que ocurre en los suelos parcialmente saturados.

Palabras claves: suelos parcialmente saturados, curva de compresibilidad, succión

Recibido: 17 de septiembre del 2014 Aprobado: 29 de marzo del 2015

INTRODUCCIÓN

El estudio del comportamiento geotécnico de los suelos se ha desarrollado considerando que los suelos se encuentran saturados o secos. Sin embargo, existen importantes problemas geotécnicos donde el estudio de la saturación parcial es fundamental. Gran parte de las formaciones geológicas del planeta, está constituidas por suelos parcialmente saturados [1] y [2]. Los suelos parcialmente saturados pueden presentar características o comportamientos particulares, entre los que se encuentran los suelos expansivos, los colapsables y los residuales, que pueden experimentar cambios de volumen en presencia de humedad de origen natural o provocada

por el hombre, causando variaciones en la resistencia y la deformación de los mismos, para lo cual es preciso conocer el comportamiento de los suelos parcialmente saturados con vista a prevenir desastres naturales.

Gran parte del comportamiento que presenta un suelo parcialmente saturado está relacionado con las deformaciones volumétricas, por tal motivo se han venido desarrollando formulaciones y modelos que intenten explicar este fenómeno. En la actualidad ha aumentado la necesidad de profundizar en el conocimiento de los suelos parcialmente saturados, desde un punto de vista experimental, con nuevas tecnologías que permitan un conocimiento más profundo del comportamiento tenso-

deformacional de estos suelos. La estimación de la curva de retención y de la curva de compresibilidad del suelo, tiene diversos intereses, pudiéndose emplear para obtener varios parámetros utilizados en la caracterización y permitiendo una mejor comprensión del comportamiento de los suelos parcialmente saturados. El conocimiento de los suelos parcialmente saturados es imprescindible, ya que por la variación de la succión se ve afectado la permeabilidad, la resistencia al cortante, la capacidad de carga, así como el comportamiento volumétrico en estos suelos.

El objetivo de esta investigación es simular la curva de compresibilidad (e vs σ) en condiciones de saturación parcial del suelo de la formación Capdevila partiendo de conocer los valores experimentales, para obtener la simulación de la curva de compresibilidad del suelo, esta se realiza a partir de conocer la curva de compresibilidad (e vs σ) pero para el suelo saturado y la curva de retención o curva característica del suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio del comportamiento volumétrico en los suelos parcialmente saturados ha sido objeto de investigaciones en las últimas décadas, debido a la influencia de la succión en el comportamiento de estos [3]. Los fenómenos más característicos de los suelos en estado no saturados son los relacionados con sus deformaciones volumétricas al modificar el grado de saturación. Estas deformaciones pueden ser de colapso o expansión [4].

El suelo por encima de la línea freática tiene presiones de poro de agua negativas y el suelo debajo de la línea freática tiene efectos de presiones positivas de agua intersticial. En la mecánica de suelos saturados se aplican los conceptos al suelo debajo de la superficie freática y de la mecánica de suelos no saturados se aplican los conceptos por encima de la línea freática. La variable de estado de tensiones asociada con el suelo saturado es el esfuerzo efectivo, $(\sigma - u_w)$, donde (σ) tensiones normales totales, y (u_w) la presión del agua intersticial. Los efectos del cambio de tensión total y los cambios de presiones de agua deben ser tratados de forma independiente para un suelo parcialmente saturado. Por lo tanto, $(\sigma - u_a)$ se define como la tensión neta total donde (u_a) presión de aire, y $(u_a - u_w)$ se define como la succión matricial del suelo. El estado de tensión que se produce por la presión de agua se utiliza como la delimitación entre la mecánica de suelos saturados y no saturados [5].

Para la caracterización del comportamiento hidromecánico de suelos parcialmente saturados son comúnmente usadas tres técnicas de control de succión: *técnica de traslación de ejes*; *transferencia de vapor*; *técnica osmótica*. Las *técnicas de traslación de ejes* y *osmótica* controlan la succión matricial del suelo, mientras, la *transferencia de vapor* controla la succión total. En la presente investigación se trabajó con la de *traslación de ejes* para la imposición de succión, empleando el equipamiento existente en el laboratorio de Geotecnia de la Universidad Autónoma de Querétaro.

El funcionamiento del edómetro de succión controlada se basa en la medición de deformaciones y los cambios del contenido de agua de la bureta graduada, cuando se aplican las presiones requeridas en el ensayo. Las presiones que se requieren durante el ensayo son, la presión de aire (u_a), la presión de agua (u_w) y la presión vertical sobre la muestra (σ).

Para la obtención de la curva de compresibilidad (e vs σ) en condiciones de saturación parcial de manera experimental del suelo objeto de estudio, se emplea un edómetro de succión controlada (figuras 1 y 2). El cambio de volumen global de una muestra debe ser igual a la suma de los cambios parciales de volumen de cada fase, cumpliéndose el principio de continuidad. Como las partículas sólidas y el agua son fundamentalmente incompresibles, los cambios globales de volumen se deben al agua que entra o sale de la muestra de suelo.

Descripción del edómetro de succión controlada

En la figura 1 se representa un diagrama del edómetro de succión controlada y las partes que lo componen, pretendidas para el funcionamiento durante los ensayos de consolidación.

El funcionamiento del edómetro de succión controlada se basa en la aplicación y control de presiones; dichas presiones se realizan por medio de un compresor donde el valor máximo de presión es de 600 kPa, este es la fuente de alimentación de los dos reguladores empleados en el ensayo (R_1 y R_2) que se encuentran en un panel. Con el regulador (R_1) se aplica la presión de agua (u_w) y con el regulador (R_2) la presión de aire (u_a). La presión de agua (u_a) se controla por medio de un manómetro (M_1) comprobándose que marque siempre la presión de agua requerida a la entrada y salida del edómetro de succión controlada, en el ensayo. La presión de aire (u_a) se controla por medio de manómetro (M_2) del panel principal garantizándose que durante el tiempo que dure el ensayo la presión requerida se mantenga constante. La presión vertical sobre la muestra (σ) se aplicó por medio de incrementos de pesos sobre el vástago del equipo. En la bureta graduada (B_1) se miden las variaciones de los volúmenes de agua que experimenta la muestra ensayada.

En la figura 2 se muestra un esquema del edómetro de succión controlada, con las partes que lo conforman, el equipo trabaja bajo el principio de traslación de ejes aplicándose simultáneamente (u_a) y (u_w). En la figura 3 se observan las imágenes del edómetro de succión empleado en la investigación.

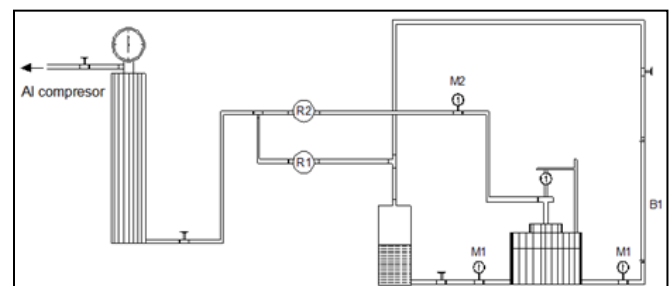


Fig. 1. Diagrama de funcionamiento del edómetro de succión controlada

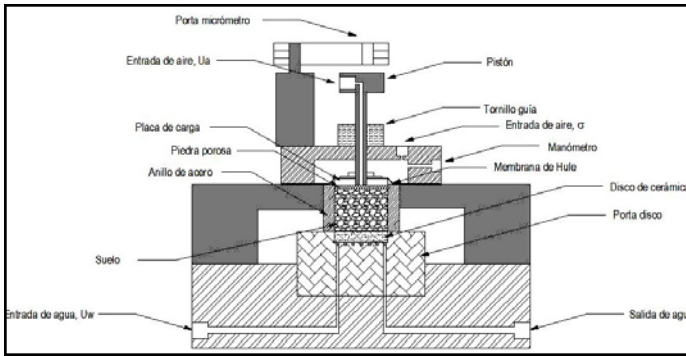


Fig. 2. Edómetro de succión controlada [6]

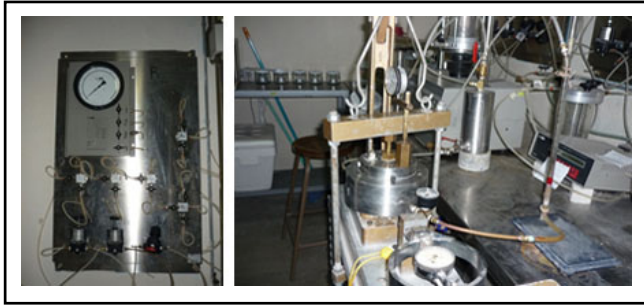


Fig. 3. Foto del edómetro de succión controlada y su funcionamiento. Cortesía de los laboratorios de mecánica de suelos de la Universidad Autónoma de Querétaro

Cuando se aplica la presión de aire (u_a), el agua de los poros se retrae a los pequeños espacios vacíos del suelo, como ocurre cuando se somete a un proceso de desecación, debido a que la succión matricial del suelo es igual a la diferencia entre las presiones de aire y de agua.

Al aplicar la presión de succión requerida en el ensayo hay que garantizar que la presión de aire (u_a) y la presión de agua (u_w) se apliquen de forma simultáneas, de esta forma se induce la succión matricial en el suelo ($S = u_a - u_w$). Por otra parte es importante garantizar que la membrana de hule cuando se comience el proceso de consolidación del suelo se encuentre estable, ya que la misma tiende a desplazarse cuando la presión (u_a) es aplicada, por lo que para estabilizarla se debe aplicar una presión que será llamada (σ_1) que debe ser igual a la presión de aire, garantizándose que el valor la presión vertical que se aplique en el vástago que es la presión vertical sobre la muestra (σ) sea la requerida para que la muestra se consolide.

Se debe tener en cuenta que la presión de aire (u_a) no rebase la presión de entrada de aire del disco de cerámica, que para este caso es de 1 500 kPa. También es importante garantizar que el vástago del edómetro de succión controlada se deslice libremente dentro de su guía y que no se produzca pérdida de presión entre ambos elementos [6].

Modelos de cambios volumétricos

La formulación planteada por Alonso y Lloret para determinar la relación de vacíos para intervalos de esfuerzos totales, tiene las siguientes particularidades [7]:

- Para la relación de vacíos y una variación limitada del intervalo de tensiones totales se tiene que:

$$e = a + b(\sigma - \bar{u}_a) + c \log(u_a - u_w) + d(\sigma - \bar{u}_a) \log(u_a - u_w) \quad (1)$$

- Si el intervalo de tensiones totales es mayor se recomienda emplear:

$$e = a + b \log(\sigma - \bar{u}_a) + c \log(u_a - u_w) + d(\sigma - \bar{u}_a) \log(u_a - u_w) \quad (2)$$

Siendo:

e : Relación de vacíos del suelo.

a, b, c, d : Constantes diferentes en cada caso que dependen del tipo de suelo.

σ : Tensiones normales totales.

u_w : Presión del agua.

u_a : Presión de aire.

$(u_a - u_w)$: Succión matricial del suelo.

Alonso y Lloret plantean que si el grado de correlación entre los resultados experimentales y los propuestos por las expresiones anteriores es muy alto, se puede deber a que el intervalo de succión empleado en el ensayo de laboratorio no ha sido muy elevado [7].

La expresión (3) puede emplearse para estudiar la deformación volumétrica inducida por cambios en la saturación del suelo, a partir del estado inicial (e_0) y el estado final saturado (e) se define la deformación volumétrica por [7]:

$$e_v = \frac{(e_0 - e)}{(1 + e_0)} \quad (3)$$

A partir de (3) se tiene que:

$$e_v = \frac{1}{(1 + e_0)} + c \log \frac{(u_a - u_w)}{(u_a - u_w)_{sat}} + d \log(\sigma - \bar{u}_a) \log \frac{(u_a - u_w)}{(u_a - u_w)_{sat}} \quad (4)$$

Un cambio en la succión de 10^α veces conduce a la expresión (4)

$$e_v = \frac{1}{(1 + e_0)} [\alpha c + d \log(\sigma - \bar{u}_a)] \quad (5)$$

Otro método propuesto es el de Fredlund [8], donde se plantea que los cambios volumétricos experimentados por un suelo parcialmente saturado se define por cambios en la relación de vacíos en respuesta a variaciones en el estado tensional donde:

$$de = \frac{\partial e}{\partial(\sigma - u_a)} d(\sigma - u_a) + \frac{\partial e}{\partial(u_a - u_w)} d(u_a - u_w) \quad (6)$$

Siendo:

e : Relación de vacíos.

σ : Tensiones normales totales.

u_w : Presión del agua.

u_a : Presión de aire.

$(u_a - u_w)$: Succión matricial del suelo.

A su vez como $\frac{\partial e}{\partial(\sigma - u_a)}$ y $\frac{\partial e}{\partial(u_a - u_w)}$ están en función de $(\sigma - u_a)$ y $(u_a - u_w)$ en ambos casos se pueden expresar por medio del coeficiente de compresibilidad constante para cada parte de la ecuación pudiéndose expresar:

$$de = a_{v1} d(\sigma - u_a) + a_{v2} d(u_a - u_w) \quad (7)$$

Siendo:

a_{v1} y a_{v2} : Coeficientes de compresibilidad.

Un nuevo modelo es el formulado por Rojas y Alanís, que parte de realizar las siguientes consideraciones [9] y [10]:

1. El modelo de proporcionalidad natural se utilizará no en términos de volumen específico, si no en términos de la relación de vacíos $e = \frac{V_v}{V_s}$, ya que la relación de vacíos está en función del volumen de vacíos y el volumen de sólidos no cambiará porque ese espacio no puede desaparecer o variar, ya que siempre será el mismo.

2. Para tomar en cuenta el comportamiento elástico y plástico del material parcialmente saturado, se tendrán en cuenta los factores κ y λ , los cuales serán tomados de la curva de compresibilidad del material saturado en su tramo virgen de carga y de descarga respectivamente.

Para el cálculo del coeficiente κ y λ correspondiente a su comportamiento elástico y plástico se utiliza la curva saturada (figura 4), empleándose las siguientes ecuaciones:

$$\kappa = \frac{\Delta e}{\log\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_2}\right)} \quad (\text{elástico}) \quad (8)$$

$$\lambda = \frac{\Delta e}{\log\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_3}\right)} \quad (\text{plástico}) \quad (9)$$

Siendo:

κ : Coeficiente de la etapa elástica.

λ : Coeficiente de la etapa plástica.

Δe : Variación de la relación de vacíos del intervalo analizado.

σ_1 y σ_3 : Esfuerzos normales del intervalo analizado.

3. Cuando la muestra es compactada se tomará un esfuerzo de prefabricación σ_{fab} el cual se añadirá para calcular los esfuerzos efectivos. Este esfuerzo de prefabricación se obtiene de la curva de compresibilidad

saturada trazando dos líneas rectas en los cambios de pendiente en la zona virgen como se puede apreciar en la figura 4. El esfuerzo de fabricación sería el esfuerzo de preconsolidación para el caso de muestras inalteradas, cuando las muestras son remoldeadas o compactadas no se considera el esfuerzo de preconsolidación pero hay que considerar el esfuerzo que se le introduce a las muestras en el proceso de remoldeo de las misma, ambos esfuerzos se obtiene de la misma forma pero uno de la curva de compresibilidad de la muestra remoldeada y el otro en la curva de compresibilidad para las muestras inalteradas.

El esfuerzo de prefabricación según lo planteado por

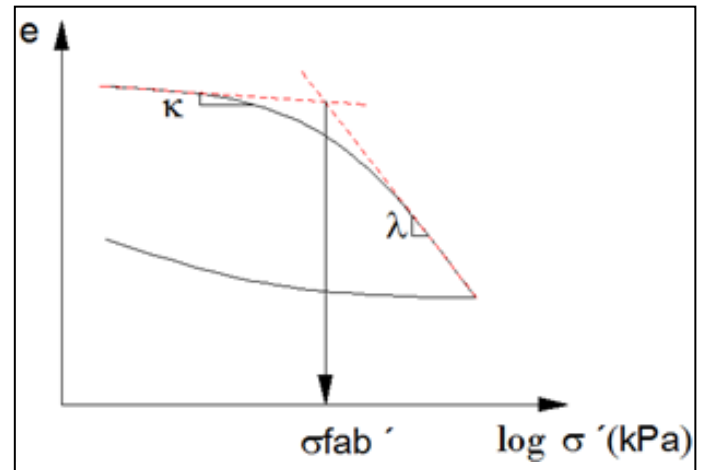


Fig. 4. Curva de compresibilidad del suelo saturado, donde se obtienen los coeficientes κ , λ , σ_{fab} [9]

Rojas y Alanís es aquel esfuerzo que se genera a la hora de remoldear o prefabricar una muestra tratando de simular sus propiedades naturales por medio de compresión o de aplicación de energías dinámica o estática, donde en el momento de comprimir el suelo su parte sólida sufre un reacomodo y llega un instante en que puede ser que sus partículas sólidas se empujen unas con otras si son semiblandas o que puedan romper su estructura superficialmente ocasionando un esfuerzo adicional entre ellas, así que se debe tomar en cuenta este nuevo fenómeno a la hora de remoldear o reconstruir cualquier tipo de muestra [9].

En la figura 5 se observan las partículas antes de aplicar un esfuerzo para remoldear la muestra y después de someterlo a una compresión axial, en este se puede ver cómo las partículas se establecen entre ellas generando un pequeño esfuerzo llamado de prefabricación.

Las ecuaciones 10 y 11 propuestas por Rojas y Alanís para determinar la relación de vacíos son las siguientes [9] y [10]:

Comportamiento elástico

$$e = e_0 \left(\frac{\sigma'}{\sigma_0'} \right)^{-\kappa} \quad (10)$$

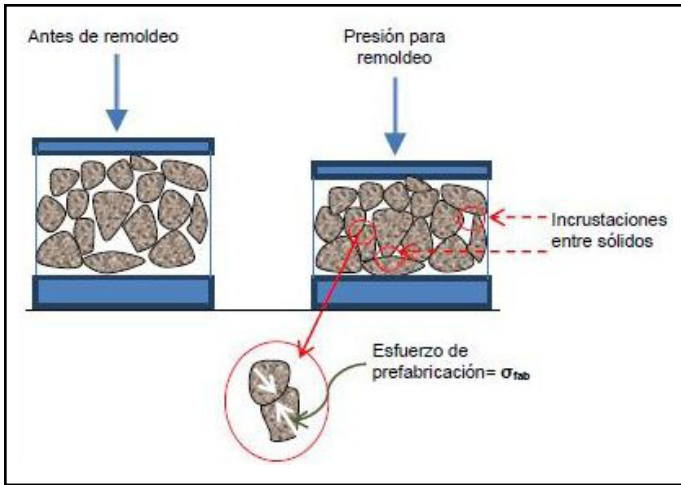


Fig. 5. Esfuerzo de prefabricación σ_{fab} [9]

Comportamiento elastoplástico

$$e = e_0 \left(\frac{\sigma'}{\sigma'_0} \right)^{-\lambda} \quad (11)$$

La formulación considera que:

$$\sigma' = \sigma - \chi(u_a - u_w) \quad (\text{kPa}) \quad (12)$$

Siendo:

σ' : Tensiones efectivas.

σ : Tensiones normales totales, hay que considerar el esfuerzo de fabricación antes mencionado en el valor final.

u_w : Presión del agua.

u_a : Presión de aire.

$(u_a - u_w)$: Succión matricial del suelo.

χ : Coeficiente de Bishop, el parámetro χ se considera que va a tener el mismo valor que el grado de saturación presente en las muestras.

El principal inconveniente que presenta la obtención del parámetro χ es que este no es constante, sino que depende del grado de saturación, tipo de suelo, y la histéresis según las trayectorias que haya seguido el suelo. Finalmente, Aitchison referenciado por Alanís y Rojas [9] y [10] propone que, dada la dificultad de determinar el valor de χ es más adecuado tratar de forma independiente el término (σ) y $(u_a - u_w)$, y determinar las trayectorias de esfuerzos por separado.

De igual forma, Beneyto planteó que el coeficiente no es el mismo que el usado para resolver problemas que envuelven esfuerzos de corte y consolidación. Para un grado de saturación dado, el coeficiente debe ser determinado experimentalmente para ambos tipos de problemas [11].

El coeficiente χ relaciona el área de contacto entre sólido y fluidos, donde el grado de saturación depende del volumen ocupado.

Una propuesta teórica planteada por Bishop y Donald se comparó con los resultados obtenidos en ensayos de cinco suelos distintos realizados por Jennings y Burland. Finalmente se comprobó que durante los procesos de colapso el valor resultante de χ es positivo mientras que durante procesos de expansión el valor resultante para χ es negativo, es decir, para un mismo suelo el valor de χ no solo varía sino que puede tomar valores positivos o negativos [11].

Morland demostró la suposición básica de la Ley de Delesse, citado por Beneyto [11]. Esta suposición considera el área y la fracción de volumen, entonces existen pequeñas diferencias entre la definición del coeficiente de Bishop, χ y el grado de saturación, S_r . Por lo que la suposición de que el grado de saturación es igual al parámetro χ (ecuación 13) es aceptable [12].

$$\chi = S_r \quad (13)$$

Sin embargo, hay otras expresiones como la usada por Khalili y Khabbaz [12] y [13] para arcilla, pudiéndose emplear la ecuación 14.

$$\chi = \begin{cases} \left(\frac{S}{S_r} \right)^{-0.55} & \text{si } S \geq S_r \\ 1 & \text{si } S < S_r \end{cases} \quad (14)$$

Siendo:

χ : Coeficiente de Bishop.

S_r : Grado de saturación.

S : Succión matricial.

Otra aproximación para la obtención del parámetro χ es el planteado por Manzanal [14] para arenas, donde es válido aplicar el criterio de Vanapalli tratado en 1996:

$$\chi = (S_r - (S_r)_r) / (1 - (S_r)_r) \quad (15)$$

Siendo:

$(S_r)_r$: Grado de saturación residual, que se puede obtener en la curva de retención del suelo.

S_r : Grado de saturación para el instante que se está analizando la muestra.

Para la investigación en curso se utiliza el criterio de que el parámetro χ es igual al S_r para la obtención de la deformación de los suelos parcialmente saturados, siendo válido esta suposición como se explicó anteriormente.

Asimismo, Vanapalli y Taek [15] plantean una formulación del comportamiento volumétrico de los suelos parcialmente saturados, donde se obtiene el módulo de deformación del suelo bajo condiciones de saturación parcial. El módulo de Young para el suelo parcialmente saturado se obtiene a partir de la ecuación (16), donde esta

formulación está en función del módulo de deformación en condiciones saturadas, propone valores de parámetro de ajuste $\beta = 1$ para suelos granulares y $\beta = 2$ para suelos finos; y para el caso del parámetro de α , se proponen una formulación que está en función del índice de plasticidad del suelo (ecuación 17 y 18).

$$E_{no-sat} = E_{sat} \left[1 + \alpha \frac{(u_a - u_w)}{(P_a / 101,3)} (S_r)^\beta \right] \quad (16)$$

$$(1/\alpha) = 0,5 + 0,312(IP) + 0,109(IP)^2 \text{ para } (0 \leq IP(\%) \leq 12) \quad (17)$$

$$(1/\alpha) = 0,5 + 0,063(IP) + 0,036(IP)^2 \text{ para } (0 \leq IP(\%) \leq 16) \quad (18)$$

Siendo:

E_{no-sat} : Módulo de deformación parcialmente saturado.

E_{sat} : Módulo de deformación saturado.

IP : Índice de plasticidad del suelo.

P_a : Presión atmosférica.

α y β : Parámetros de ajuste.

S_r : Grado de saturación.

$(u_a - u_w)$: Succión matricial del suelo.

Para la obtención de estas formulaciones se parte del estudio de valores de suelos reportados por varios autores. La formulación planteada por Vanapalli y Taek [15] para la obtención del módulo de elasticidad es válida solamente para suelos donde la variación del índice de plasticidad se encuentre entre 0 y 16 %, porque el valor de ajuste α , de la ecuación se obtuvo para suelos donde IP estaba en ese intervalo. Para poder emplear la formulación de Vanapalli y Taek [15] cuando el IP está fuera del intervalo antes mencionado es necesario obtener la relación de $(1/\alpha)$ de forma experimental.

Para suelos granulares sin plasticidad no se evidencia influencia de la succión en el valor de $(1/\alpha)$, siendo el valor igual a 0,5 para todos los suelos con esta característica estudiados por Vanapalli y Taek [15].

RESULTADOS

El suelo de la formación Capdevila que se analiza en esta investigación abunda en la zona occidental del país, específicamente en la zona de la provincia de La Habana. El mismo presenta una composición mayoritariamente arcillosa, con un color amarillo y muestra altos niveles de humedad.

Para la realización de los ensayos, en el suelo objeto de estudio y su clasificación, se siguieron las orientaciones a las normas NC y ASTM actualmente vigentes de: determinación de la granulometría [16], peso específico [17], límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad [18], Proctor Estándar [19] y la succión [20] en los suelos. Los resultados de los ensayos físicos realizados a las muestras de suelos estudiadas se muestran a continuación.

Granulometría, límite de consistencia y peso específico

Los resultados de la granulometría, de los límites de consistencia y del peso específico relativo de las partículas sólidas de las muestras de suelo objeto de estudio se muestran en la figura 6 y en la tabla 1.

En función de los resultados obtenidos en la granulometría y límites de consistencia del suelo estudiado se clasifican, como CH (arcilla de alta compresibilidad).

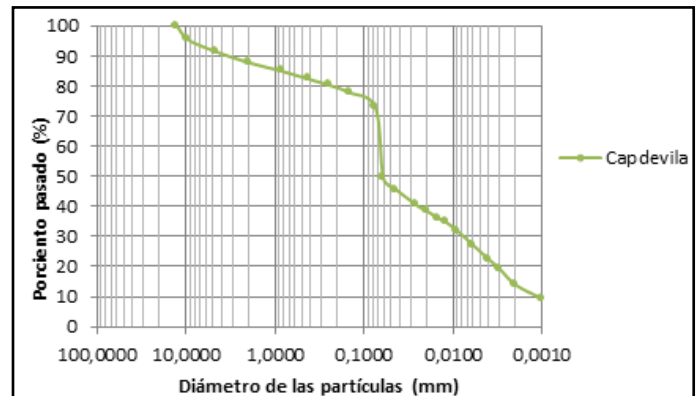


Fig. 6. Curvas granulométricas promedio de las muestras de suelo Capdevila

Tabla 1

Límites de consistencia y peso específico relativo de las partículas sólidas de las muestras de suelo estudiadas

Parámetros	Capdevila
Límite líquido (LL)	52
Límite plástico (LP)	21
Índice de plasticidad (IP)	31
Peso específico relativo de las partículas sólidas (Gs)	2,72

Ensayo de Proctor Estándar

Se realizó el ensayo de Proctor Estándar a las muestras de suelos Capdevila para obtener los valores de peso específico seco máximo y la humedad óptima para tener un parámetro de referencia a la hora de remoldear las muestras ya que no se pudo obtener muestras inalteradas. El remoldeo de las muestras empleadas en la investigación se hizo siguiendo el criterio de emplear el 90 % del peso específico seco máximo como parámetro fijo, trabajando siempre en la rama seca de la curva Proctor Estándar. Este ensayo se realiza teniendo en cuenta la norma vigente y los valores obtenidos se muestran en la figura 7.

Obtención de la curva de retención del suelo estudiado

Para determinar la succión, se tomó como base la norma ASTM de obtención de la succión en el laboratorio [20], los resultados experimentales de las succiones de las muestras de suelo empleado en la investigación se presentan en la figura 8. El ensayo de succión se realizó empleando papel de filtro Whatman 42.

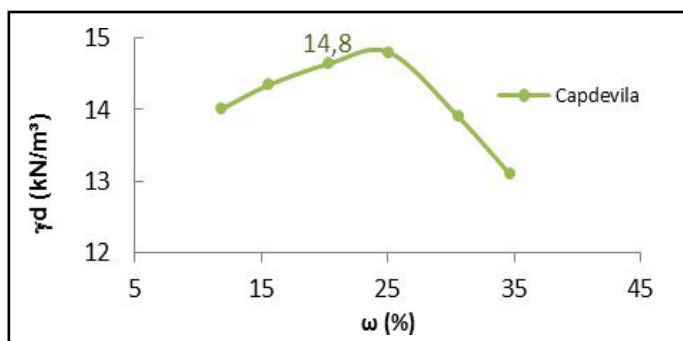


Fig. 7. Curvas de (γ_d vs ω) promedio, para la energía Proctor Estándar de las muestras del suelo estudiado

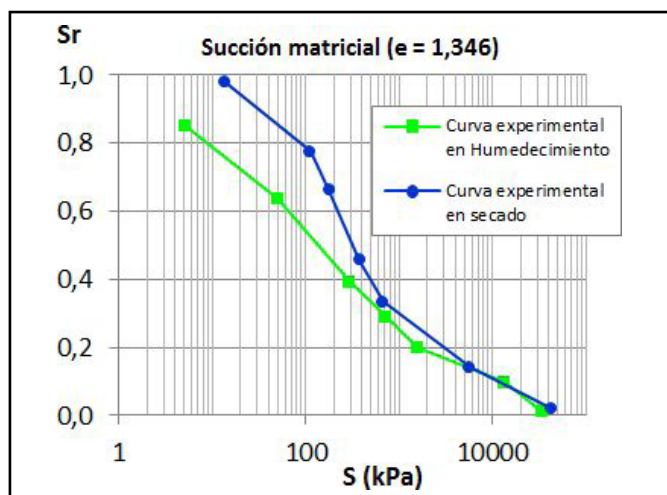


Fig. 8. Curvas características experimentales del suelo de la formación Capdevila con ($e = 1,346$)

Obtención de la curva compresibilidad (e vs σ) del suelo saturado

Para determinar la curva compresibilidad (e vs σ) del suelo saturado, se tomó como base la norma. A continuación se muestran las curvas de compresibilidad de los suelos estudiados para 100 % de grados de saturación (figura 9 y tabla 2).

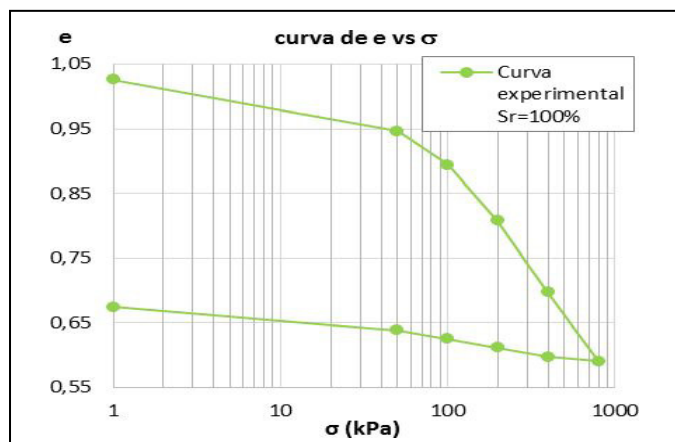


Fig. 9. Curva de e vs σ para 100 % de grado de saturación para el suelo de la formación Capdevila

De la curva de compresibilidad del suelo en condiciones saturadas se obtienen los valores de k y λ con los que se trabaja en el modelo de Rojas y Alanís, que se emplea en la simulación de la curva de compresibilidad para distintos grados de saturación.

Tabla 2

Datos iniciales de la muestra del suelo empleado en el ensayo de consolidación

Datos iniciales del ensayo de consolidación	U. Medidas	Capdevila
Índice de poros inicial o relación de vacío	cm	1,030
Grado de saturación inicial	%	45,97
Peso específico seco inicial	kN/m³	13,143

Obtención de la curva de compresibilidad (e vs σ) en condiciones de saturación parcial

Este ensayo se realiza para poder predecir la deformación que puede experimentar el suelo bajo una variación de esfuerzo normal dado, con el objetivo de pronosticar el asentamiento que pueden presentar los suelos.

Para la realización del ensayo, se escoge la succión matricial empleada en el ensayo donde se tuvo en cuenta la curva de retención de agua del suelo en humedecimiento, para que la muestra mantuviera la humedad inicial y esta no se saturara durante el proceso de carga del ensayo.

Durante el desarrollo del ensayo de consolidación con succión controlada en la investigación se obtiene la curva de carga-deformación de los suelos objetos de estudio. Con ello se pretende evaluar la tendencia al colapso del material artificialmente preparado. El ensayo de consolidación con succión controlada se realizó de forma tal que el suelo experimentara colapso, saturándolo en el escalón de carga ($\sigma = 200$ kPa) igualando la presión de aire (u_a) a la presión de agua (u_w) para posteriormente simular en comportamiento volumétrico del suelo por medio de la ecuación propuesta por Rojas y Alanís en el 2012.

A continuación se muestran las curvas de compresibilidad bajo succión controlada de los suelos estudiados (figura 10 y tabla 3).

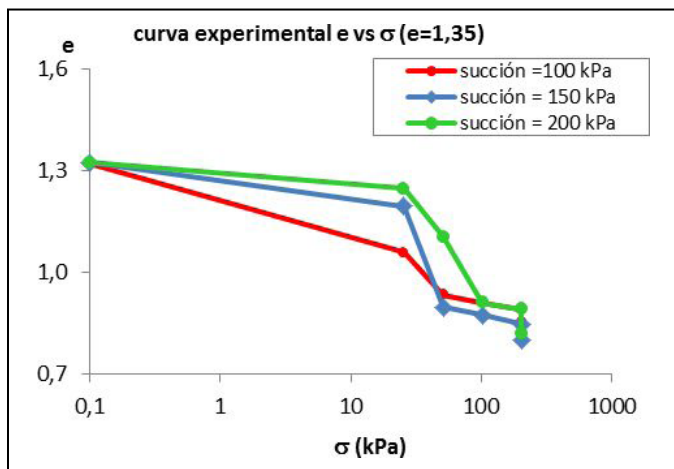


Fig. 10. Curva de compresibilidad del suelo Capdevila, $e = 1,35$

Tabla 3
Datos iniciales de las muestras de suelos
empleadas en el ensayo de consolidación

Datos iniciales del ensayo de consolidación	U. Medidas	Capdevila	
Índice de poros inicial o relación de vacío	cm	0,85	1,35
Grado de saturación inicial	%	21,33	23,10
Peso específico seco inicial	kN/m ³	11,31	14,39

En el suelo de la formación Capdevila a medida que disminuye la relación de vacíos, este experimenta un aumento, tanto del valor en el colapso, como de la succión en el suelo, lo que produce un aumento en el valor de la relación de vacío del suelo ensayado.

Simulación de la curva de compresibilidad (e vs σ) parcialmente saturada

Para la obtención del ajuste de las muestras de suelos estudiadas se emplea el modelo de Rojas y Alanís (2012), para ello se determinan los valores de λ y k del gráfico de e vs σ , para un 100 % del grado de saturación de las muestras según plantea el modelo estudiando y los datos con que trabaja el mismo, los cuales se muestran en la tabla 4, para los distintos casos analizados.

Para realizar el ajuste de los modelos con los valores experimentales se supone que el valor experimental obtenido es igual al valor estimado por el modelo analizado, los pares $(Y_i; \hat{Y}_i)$ deben pertenecer a la recta $y = x$. Ajustando estos pares al modelo de regresión lineal simple $y = a + bx$, donde se espera que $a = 0$ y $b = 1$.

Tabla 4
Muestras ensayadas con el odómetro de succión controlada en el suelo Capdevila

Parámetros del suelo parcialmente saturado para las simulación Capdevila						
	Succión (S = 100 kPa)		Succión (S = 150 kPa)		Succión (S = 200 kPa)	
Zona elástica	κ	- 0,04	κ	- 0,04	K	- 0,04
Zona plástica	λ_1	- 0,60	λ_1	- 0,60	λ_1	- 0,60
	λ_2	- 0,19	λ_2	- 0,19	λ_2	- 0,19
Aprox Sr	χ	0,78	χ	0,71	χ	- 0,65
Relación de vacío inicial	e_o	1,35	e_o	1,35	e_o	1,35
σ adicional de fabricación	σ_{fab}	55 kPa	σ_{fab}	55 kPa	σ_{fab}	55 kPa

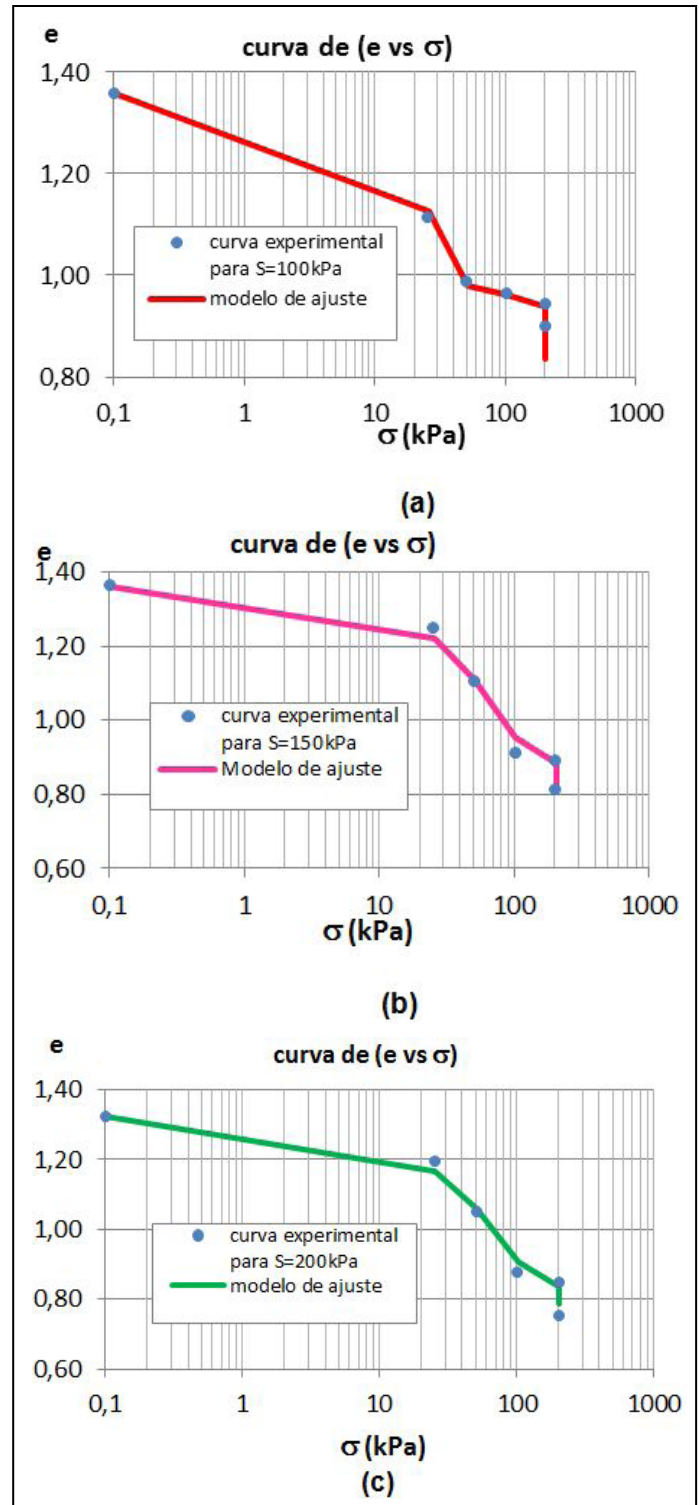


Fig. 11. Simulación de la curva de compresibilidad de Capdevila con $e = 1,35$: (a) $S = 100$ kPa; (b) $S = 150$ kPa y (c) $S = 200$ kPa

Una vez calculados los coeficientes del modelo de regresión se comparan con los valores reales del modelo. Además, la calidad del ajuste se valora mediante el modelo ANOVA correspondiente, se obtiene el coeficiente de correlación, coeficiente de determinación R^2 , R^2 ajustado para los grados de libertad, el error estándar de

la estimación (Error Est.) y el error absoluto medio. En la tabla 5 aparecen los parámetros del modelo ANOVA de calidad del ajuste para el modelo de Rojas y Alanís del suelo de la formación Capdevila.

Con los parámetros $|\hat{a}|$ y $|1-\hat{b}|$ de la tabla 5 se valora el error absoluto en la estimación de los coeficientes del modelo de regresión. Esta información se toma en cuenta junto al coeficiente de determinación ajustado para decidir si el modelo de ajuste de la curva de compresibilidad utilizado se puede emplear, de acuerdo con los datos experimentales obtenidos.

En la tabla 5 se observa que para todos los casos de succión, tomando en consideración el coeficiente de determinación ajustado en la estimación de los coeficientes del modelo de regresión del problema, se puede asegurar que el modelo analizado para estimar la curva de compresibilidad de los suelo en condiciones de saturación parcial es válido.

A continuación se hace una valoración de las curvas de residuos cuando el suelo es sometido a un valor de succión de 100 kPa, del suelo objeto de estudio.

En la figura 12 se muestra que en la simulación de la curva de compresibilidad del suelo para una succión del 100 kPa, se obtiene un punto de residuo atípico (*studentizado*). Dichos residuos *studentizados* miden cuántas desviaciones estándar tiene cada valor observado e_0 del e_{Calc} en el modelo ajustado, utilizando todos los datos excepto esa observación. En este caso, hay un residual *studentizado* mayor que 3, por lo que hay que analizar detenidamente las observaciones con residuos mayores a 3 para determinar si son valores que debieran ser eliminados del modelo.

El valor-P obtenido en el análisis fue de 0,000 1 como es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre e_{Calc} y e_0 con un nivel de confianza del 95,0 %.

CONCLUSIONES

Para el suelo de la formación Capdevila estudiado es válida la simulación de la curva de compresibilidad empleando modelo de Rojas y Alanis, ya que el valor del coeficiente de determinación (R^2) alcanza valores del 98 y 99% para el intervalo de succiones analizadas y el error de estimación es de 0,02.

El modelo de Rojas y Alanís simula la curva de compresibilidad del suelo y el colapso de las muestras de suelo de la formación Capdevila de manera aceptada, aunque para la muestra ensayada con una succión de 100 kPa el modelo simuló un mayor colapso que el que experimentó la muestra durante el ensayo de laboratorio, lo cual debe principalmente al realizar la suposición de que el parámetro χ se hace igual al grado de saturación (S_r) y se introduce un error, porque el parámetro χ no es constante, sino que depende del grado de saturación, tipo de suelo, y la histéresis según las trayectorias que haya seguido el suelo, variando el comportamiento obtenido durante la simulación de la curva de compresibilidad.

Tabla 5
Parámetros del Modelo ANOVA para el suelo Capdevila

Parámetros	Modelo de Rojas y Alanís (2012)		
	Succión = 100 kPa	Succión = 150 kPa	Succión = 200 kPa
Coef. de correlación	0,99	0,99	0,99
R^2 (%)	98,38	99,13	99,08
R^2 (ajustado para gl) (%)	97,98	98,91	98,85
Error Est.	0,026	0,022	0,022
Error abs. Medio	0,018	0,015	0,016
$ a - \hat{a} = \hat{a} $	0,10	0,06	0,07
$ b - \hat{b} = 1 - \hat{b} $	1,08	0,95	0,93

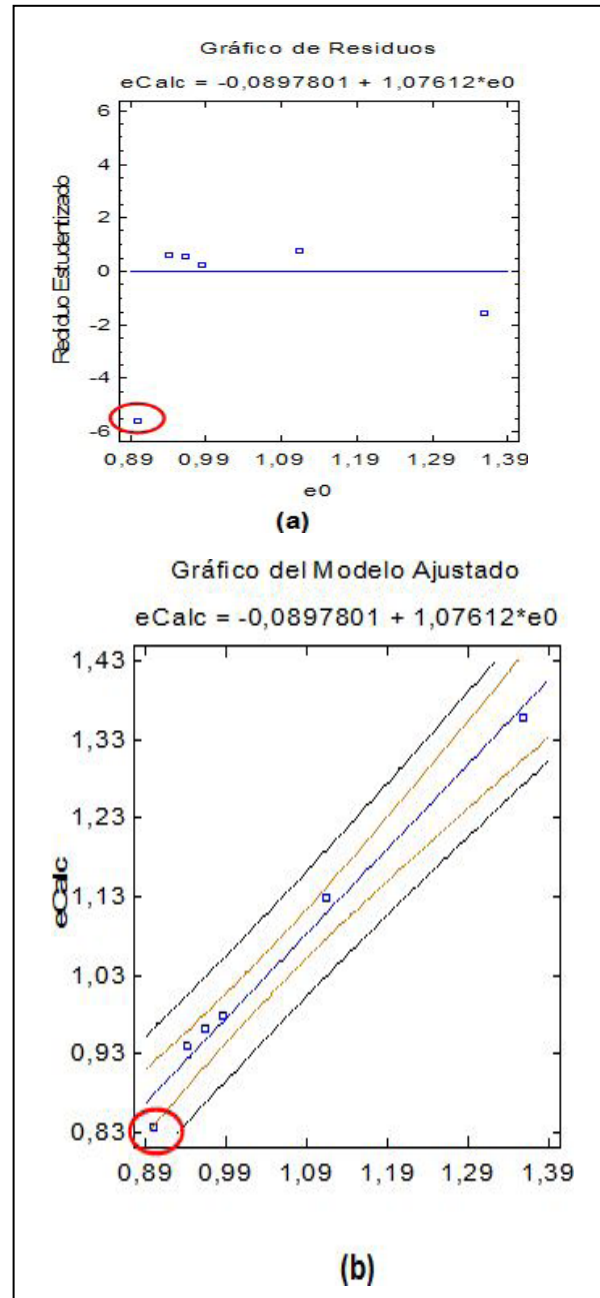


Fig. 12. (a) Gráfico de valores de residuos; (b) Gráfico de los valores del modelo ajustado, succión = 100kPa

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo de la Universidad Autónoma de Querétaro y en especial a los profesores doctor Eduardo Rojas González, doctora María de la Luz Pérez Rea y al personal que labora en los laboratorios de Mecánica de Suelos de dicha Institución.

REFERENCIAS

1. **ALFARO SOTO, M. A.** "Geotecnia en suelos no saturados," *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias*, vol. 32, no. 125, pp. 471–481, 2008. ISSN: 0370-3908. Disponible en Web: http://www.accefyn.org.co/revista/Vol_32/125/471-482.pdf [consultado mayo 2014].
2. **VICTORIA OCHOA, M.** "Suelos parcialmente saturados, de la investigación a la cátedra universitaria," *Boletín de Ciencias de la Tierra*, vol. 31, pp. 23–38, 2012. ISSN: 0120-3630. Disponible en Web: <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/rbct/article/view/31251> [consultado mayo 2014].
3. **GLEN, J. B.; SHENG, D.; AIREY, D.** "Experimental study on volumetric behaviour of Maryland clay and the role of degree of saturation". *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 51, no. 12, pp. 1449–1455, 2014. DOI: 10.1139/cgj-2013-0332. ISSN 1208-6010. Disponible en Web: <http://www.nrcresearchpress.com/doi/abs/10.1139/cgj-2013-0332> [consultado Abril 2014]
4. **ALFARO SOTO, M. A.** "Deformaciones volumétricas con y sin colapso de algunos suelos no saturados," *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias*, vol. 31, no. 120, pp. 355–362, 2007. ISSN: 0370-3908. Disponible en Web: http://www.accefyn.org.co/revista/Vol_31/120/355-362.pdf [consultado junio 2014]
5. **SHENG, D.; FREDLUND, D. G.; GENS, A.** "A new modelling approach for unsaturated soils using independent stress variables," *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 45, pp. 511–534, 2008. DOI: 10.1139/T07-112. ISSN 1208-6010. Disponible en Web: <http://www.nrcresearchpress.com/doi/abs/10.1139/T07-112> [consultado Abril 2014]
6. **CORTEZ, J. J.** "Ensayos en suelos no saturados con edómetro de succión controlada," Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad autónoma de Querétaro, México, 2011.
7. **ALONSO, E.; LLORET, A.** "Comportamiento de suelos parcialmente saturados," *Revista de Obras Públicas*, pp. 435–461, 1985. ISSN: 0034-8619. Disponible en Web: http://ropdigital.ciccp.es/pdf/publico/1985/1985_mayo-junio_3236_10.pdf [consultado Marzo 2014]
8. **FREDLUND DELWYN, G.** "Relevance of Unsaturated Soil Mechanics in Geotechnical Engineering", *National Conference on Soil Mechanics*. 18 pp., La Habana, 2002. Disponible en: <http://www.soilvision.com/subdomains/unsaturatedsoil.com/Docs/Research%20Papers/2002/Conference%20Papers/Relevance%20of%20unsaturated%20soil%20mechanics%20in%20geotechnical%20engineering.PDF> [consultado enero 2013].
9. **ALANIS, A. O. A.** "Deformación volumétrica en suelos no saturados," Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, 2012. Disponible en Web: <http://ri.uaq.mx/browse?type=dateissued> [consultado Enero 2013]
10. **ROJAS GONZÁLEZ, E.** "La última pieza del rompecabezas: el comportamiento volumétrico de los suelos no saturados," *Ciencia@UAQ*, vol. 2, pp. 1–16, 2013. ISSN: 2007-4697 Disponible en Web: http://www.uaq.mx/investigacion/revista_ciencia@uaq/ArchivosPDF/v6-n1/art8.pdf [consultado Mayo 2014]
11. **BENEYTO, P. A.** "Análisis de consolidación en suelos regionales en estado de saturación parcial mediante simulación numérica utilizando el método de los elementos finitos", Tesis de Maestría, Departamento de Mecánica Aplicada, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Nordeste, 2003. Disponible en Web: <http://ing.unne.edu.ar/mecap/Investigacion/Tesis/MgBeneyto-Res.pdf> [consultado Mayo 2014]
12. **SHENG, D.; ZHOU, A.** "Shear Strength Criteria for Unsaturated Soils", *Geotechnical and Geological Engineering*, 2009. DOI: 10.1007/s 10706-009-9276-x. ISSN 0960-3182. Disponible en Web: <http://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s10706-009-9276-x.pdf> [consultado Abril 2014]
13. **JAHANANDISH, M.; HABIBAGAH, G.; VEISKARAMI, M.** "Bearing capacity factor, N_c , for unsaturated soils by ZEL method," *Acta Geotechnica*, vol. 5, pp. 177–188, 2010. DOI: 10.1007/s 11440-010-0122-3. ISSN 1861-1133. Disponible en Web: <http://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s11440-010-0122-3.pdf> [consultado Mayo 2014]
14. **MANZANAL, D. G.** "Modelo constitutivo basado en la teoría de la plasticidad generalizada con la incorporación de parámetros de estado para arenas saturadas y no saturadas," Tesis de Doctorado, Departamento de ingeniería y morfología el terreno, Universidad Politécnica de Madrid, 2008. Disponible en Web: <http://oa.upm.es/1088/> [consultado Mayo 2014]
15. **VANAPALLI, S. K.; TAEK, W.** "A model for predicting the modulus of elasticity of unsaturated soils using the soil-water characteristic curve," *International Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 4, pp. 425–433, 2010. ISSN: 1939-7879. Disponible en Web: <http://connection.ebscohost.com/c/articles/55303886/model-predicting-modulus-elasticity-unsaturated-soils-using-soil-water-characteristic-curve> [consultado Abril 2014]
16. NC-20, "Geotecnia. Determinación de la granulometría de los suelos," Oficina Nacional de Normalización, pp. 783-799, 2009. ICS: 01.120.
17. NC-19, "Geotecnia. Determinación del peso específico de los suelos," Oficina Nacional de Normalización, pp. 805-816, 2009. ICS: 93.020.
18. NC-58, "Geotecnia. Determinación del límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de los suelos," Oficina Nacional de Normalización, pp. 817-829, 2009. ICS: 93.020.

19. NC-54-148, "Geotecnia. Método de ensayo para la determinación de las características de compactación del suelo en el laboratorio (ASTM D 698:1991(1998), D 1557:1991, (1998) MOD)," Oficina Nacional de Normalización, no. 261, pp. 830–835, 2009. ICS: 93.020.
20. ASTM: D 5298 – 10, "Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper," in The Annual Book of ASTM Standards, vol. 11, AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2010, pp. 1-6.

AUTORES

Jenny García Tristá

Ingeniera Civil, Profesora Asistente, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería Civil, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana, Cuba

Willian Daniel Cobelo Cristiá

Ingeniero Civil, Doctor en Ciencias Técnicas, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular, Facultad de Ingeniería Civil, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana, Cuba

Gilberto Julio Quevedo Sotolongo

Ingeniero Civil, Doctor en Ciencias, Profesor Titular, Facultad de Construcciones, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Villa Clara, Cuba

Carlos Alberto García Fernández

Licenciado en Matemáticas, Máster en Matemáticas Avanzadas para Ingeniería, Profesor Auxiliar, Centro de Estudios de Matemáticas Aplicadas para las Ciencias Técnicas (CEMAT), Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana, Cuba

Volume Behavior of a Soil of Capdevila Formation in Partial Saturation Conditions

Abstract

At the actuality has increased the need for deeper understanding of unsaturated soils, this paper presented the obtaining and simulation curve compressibility (e vs σ) of the Capdevila Formation, located in the province of Havana. The characterization of the soil under study is performed by using laboratory tests as specified by the relevant standards. The simulation curve compressibility of soil shall be performed using a model by considering the soil - water retention curve and the curve of compressibility in saturated conditions, obtaining the same suctions and the coefficients κ (elastic behavior) and λ (plastic behavior) studying soil, allowing us to predict the settlement that occurs in partially saturated soils.

Key words: unsaturated soils, compressibility curve, suction