



Metodología para encontrar la deformación volumétrica de un suelo expansivo y parcialmente saturado con la menor cantidad de ensayos posible

Methodology to find the volumetric deformation of an expansive soil with the least amount of tests possible

Méndez-Herrada Iliané

Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Correo: iliane.mendez92@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-0954-092X>

Pérez-Rea María de la Luz

Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Correo: perea@uaq.mx
<https://orcid.org/0000-0003-0225-905>

Resumen

La deformación volumétrica es un parámetro fundamental para el cálculo de los asentamientos de ciertos y determinados tipos de suelos dentro de un estudio geotécnico, particularmente de los suelos arcillosos y con grandes potenciales de expansión. En este trabajo se pretende encontrar una metodología que nos permita llegar a este valor con la menor cantidad de ensayos posibles, pero manteniendo su efectividad y precisión. Para tal propósito se estaría empleando un modelo constitutivo elastoplástico desarrollado por Verdín Montes (Montes & González, 2018). Debido a que este modelo es solo aplicable a suelos arcillosos o con un alto contenido de finos, la metodología también queda condicionada a este tipo de suelos, por lo que previamente se debe contar con la información de su clasificación. La implementación de un modelo para suelos no saturados donde la variable de esfuerzo efectivo permita simplificar las ecuaciones constitutivas, representa la unificación de todas las teorías de mecánicas de suelos en una sola ecuación. Es por ello que este modelo ofrece grandes ventajas ante las deformaciones que presentan los suelos expansivos. Para encontrar la deformación volumétrica se deben realizar ordenadamente las siguientes pruebas: Cálculo de succión, grado de saturación y elaboración de la Curva de Retención Agua-Suelo, cálculo de la relación de vacíos inicial y máxima, determinación de los parámetros generales k y l , cálculo de la relación de vacíos mínima, cálculo de los esfuerzos efectivos mediante la ecuación planteada en este artículo, cálculo de la densidad relativa, cálculo del índice de expansión y el índice de expansión-colapso, y por último la determinación de la deformación volumétrica mediante la ecuación descrita.

Descriptores: Deformación volumétrica, suelo, arcillas, modelo elastoplástico, asentamientos, esfuerzos efectivos.

Abstract

The volumetric deformation is a fundamental parameter for the calculation of the settlements of certain types of soils within a geotechnical study, particularly of clay soils with great potential for expansion. The aim of this work is to find a methodology that allows us to reach this value with the fewest possible tests, while maintaining its effectiveness and precision. For this purpose, an elastoplastic constitutive model developed by Verdín Montes (Montes & González, 2018). Because this model is only applicable to clayey soils or with a high content of fines, the methodology is also conditioned to this type of soils, so the information on its classification must first be available. The implementation of a model for unsaturated soils in which the effective stress variable allows to simplify the constitutive equations, represents the unification of all the theories of soil mechanics in a single equation. That is why this model offers great advantages in the face of the deformations that expansive soils present. To find the volumetric deformation, the following tests must be carried out in an orderly manner: Calculation of suction, degree of saturation and elaboration of the Water-Soil Retention Curve, calculation of the initial and maximum void ratio, determination of the general parameters k and l , calculation of the minimum void ratio, calculation of the effective stresses using the equation proposed in this article, calculation of the relative density, calculation of the expansion index and the expansion-collapse index, and finally the determination of the volumetric deformation using the equation described.

Keywords: Volumetric deformation, soil, clays, elastoplastic model, settlements, effective stresses.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de muchas ciudades y asentamientos urbanos ha tenido lugar sobre suelos cohesivos, el estudio y predicción del comportamiento particular de este tipo de suelos es fundamental para la ejecución y estabilidad de las obras civiles, por lo que cada vez son más las investigaciones y procedimientos encaminados a lograr un mejor análisis de los principales elementos de su comportamiento mecánico (Leal *et al.*, 2009). La modelación del comportamiento de los suelos inició con el modelado de suelos saturados, concebido como un medio bifásico (suelo y agua) para lo cual se adoptó la ecuación de esfuerzos efectivos y la noción de estado crítico. No obstante, la mayoría de los suelos en el cual se desplantan las obras civiles se encuentra en un estado no saturado. Dentro de ellos se encuentran los suelos expansivos que son arcillas del tipo montmorillonita (Montes & González, 2018).

Los procesos que dan lugar al cambio volumétrico en suelos no saturados son numerosos, siendo los más comunes los de compresión en contenido de agua constante y los de hidratación o secado bajo carga constante, el primero hace referencia a la construcción rápida de una edificación, y el segundo se origina después de finalizar la construcción por medio de la evaporación generando el secado (generando colapso) o las lluvias, o algún otro elemento que genere hidratación en el suelo (generando expansión) (Garrido, 2004).

El modelado del comportamiento expansivo propone desafíos propios vinculados a sus fases que la conforman, su estructura y la influencia de fenómenos como la histéresis de las curvas retención suelo-agua, el endurecimiento por succión y el acoplamiento hidromecánico. Por esta razón es ineludible el uso del concepto de esfuerzo efectivo como variable constitutiva para poder estudiar de manera más completa y sencilla el comportamiento de estos materiales además de unificar la teoría de los suelos saturados con los suelos no saturados (Montes & González, 2018).

Actualmente existe consenso entre los investigadores de que los modelos basados en el principio de esfuerzos efectivos ofrecen mayores ventajas. Entre las más importantes están la introducción tanto del grado de saturación como la histéresis de las curvas de retención suelo-agua en la formulación del modelo. Aún con estas ventajas, los modelos desarrollados hasta ahora adolecen de cuatro deficiencias importantes (Rojas, 2018):

1. No incluyen el endurecimiento anisotrópico de la superficie de fluencia en los ejes de esfuerzo medio contra desviador provocado por el fenómeno de en-

durecimiento por succión. Esto se debe a la complejidad que involucra el tener una superficie de fluencia que cambie de forma.

2. Actualmente no existe un solo modelo que incluya simultáneamente los fenómenos de colapso y expansión en términos de esfuerzos efectivos.
3. Estos modelos requieren un gran número de parámetros, algunos de los cuales necesitan calibrarse previamente para cada suelo en particular.
4. Las matrices de rigidez que resultan de estos modelos no son simétricas, por lo que se dificulta su tratamiento en los programas de método numéricos como el método del elemento finito.

El modelo elastoplástico que se pretende implementar es el planteado por Verdín Montes (Montes & González, 2018), el cual adopta el planteamiento realizado por (Alonso, 1999) a partir de la distinción de dos niveles estructurales responsables del comportamiento de suelos expansivos como la base para desarrollar un modelo de esfuerzos efectivos para suelos expansivos en el plano p' (esfuerzo medio efectivo) – s (Succión).

El modelo utiliza la ecuación de esfuerzos efectivos de (Bishop, 1959) para determinar el comportamiento volumétrico de los suelos expansivos y considera que existe una relación entre las deformaciones de la microestructura y macroestructura, generado por las relaciones de vacíos mínima y máxima que puede alcanzar el material (Montes & González, 2018).

El objetivo de este trabajo es desarrollar una metodología que nos permita obtener como resultado la ecuación para hallar la deformación volumétrica en término de succión de un suelo, posteriormente con este valor será posible encontrar los asentamientos de un determinado estrato, y de esta manera llegar a un diseño de cimentaciones teniendo en cuenta la estructura que se desea construir y los demás parámetros que intervienen en su diseño.

METODOLOGÍA/MATERIALES Y MÉTODOS

Para poder alcanzar el resultado final al cual se deseaba llegar en este trabajo, primeramente, se realizó un análisis de los modelos constitutivos existentes actualmente. Teniendo en cuenta las ventajas que cada uno de ellos podía ofrecer, también se analizó como parte importante, el aporte novedoso que proponían los mismos. Con toda la información con la que se contaba en este aspecto, finalmente se decidió utilizar el modelo elastoplástico propuesto por Verdín Montes (Montes & González, 2018).

Una vez elegido el modelo a implementar, se analizaron cada uno de los parámetros necesarios para su

desarrollo y los ensayos de laboratorio que se debían llevar a cabo para obtener dichos parámetros. Para tal propósito se estudió la bibliografía más reciente referente a estos temas, además de las normas vigentes para las pruebas de laboratorio. Más adelante, teniendo como base esta revisión previa, se definen la menor cantidad de ensayos necesarios para el desarrollo del modelo, alcanzando el mismo resultado deseado sin perder su precisión, un paso que aportaría sencillez a la metodología propuesta.

RESULTADOS

Pasos para encontrar la deformación volumétrica de un suelo con la menor cantidad de ensayos posibles:

a) Cálculo de succión (S), grado de saturación (S_w) y elaboración de la Curva de Retención Agua-Suelo (CRAS)

La succión de un suelo es la medida de la energía libre del agua en los poros del suelo, y es relacionada con el contenido de humedad a través de la CRAS. Por lo tanto, se recomienda que para su obtención se realice el procedimiento con base en la norma ASTM D-5298 (D5298, 2016), con la finalidad de obtener datos de succión a diferentes grados de saturación y distintos caminos, es decir, del estado seco al saturado y viceversa.

Entre los métodos de medición de succión, la técnica de papel filtro es el único donde la succión total y mátrica puede inferirse. El contacto directo entre el papel y el suelo permite que el agua y materiales disueltos se intercambien libremente. La absorción del agua por parte del papel filtro por capilaridad, permite obtener la succión mátrica a través de la humedad del papel. La medición de la succión total se realiza mediante la obtención de la humedad del papel que no está en contacto directo con el suelo, ocasionado por el flujo que ocurre en la transferencia de vapor incorporando las fuerzas osmóticas y capilares que retiene a la molécula de agua (Bulut & Leong, 2008).

Es muy importante el correcto entendimiento de las curvas de retención de un suelo para tener una mejor comprensión del comportamiento de un suelo no saturado. Estas curvas se definen como la relación entre el grado de saturación del suelo y la succión mátrica. El primero de estos términos es igual al volumen de líquido que contiene el suelo entre el volumen de sus vacíos y el segundo está dado por la diferencia entre la presión del aire y la presión del agua dentro de los poros (Nuth & Laloui, 2008).

b) Cálculo de la relación de vacíos inicial (e_0) y máxima (e_{max})

Estos valores se obtienen mediante la curva de compresibilidad en el ensayo de consolidación isotrópica.

El procedimiento a seguir se basa en las estipulaciones de la norma ASTM D-4546 (ASTM, 2014). Se elaboran dos muestras con un contenido de humedad igual al que presenta el suelo natural que se desee analizar, las cuales serían suficientes para obtener los parámetros deseados. La prueba se lleva a cabo hidratando el espécimen hasta saturar y posteriormente se realizan tres incrementos de carga predeterminados y al final del ensayo se retira la carga en tres decrementos.

De los resultados de consolidación isotrópica es posible obtener la relación de vacíos máxima (e_{max}) generado por expansión libre, además de la presión de preconsolidación (P_o), que indica la máxima presión que ha soportado el suelo en su historia geológica, y delimita la zona elástica.

c) Determinación de los parámetros generales k y l

De los resultados de consolidación isotrópica y curva de compresibilidad, es posible traducir los resultados a esfuerzos efectivos para obtener las pendientes de carga-descarga, delimitando de esta forma la zona elástica (definida por el parámetro k) y elastoplástica (definida por el parámetro l) del modelo, donde:

- k = Pendiente del estado preconsolidado del suelo (descarga)
- l = Pendiente del estado normalmente consolidado (carga)

d) Cálculo de la relación de vacíos mínima (e_{min})

Este parámetro se obtiene a partir de la prueba de límite de contracción volumétrica mediante un monitoreo de secado. Se preparan 4 o 5 especímenes basándonos en la norma ASTM D-427, y se comienza el monitoreo de secado al aire en un período de 24 h hasta que por último las muestras se secan al horno por un período de 24 h más. El número de muestras se define de esta forma, ya que esta prueba cuenta con altas probabilidades de agrietamiento durante el proceso de secado, por lo cual se deben manejar con mucho cuidado para evitar estos contratiempos.

Previo a este ensayo se debe obtener primero mediante pruebas de consolidación, la gráfica de compresión del suelo en ejes de relación de vacíos contra esfuerzo, hasta valores bajos de la relación de vacíos. Posteriormente con las mediciones del monitoreo de se-

cado se generan gráficas de la evolución de la relación de vacíos contra el esfuerzo de succión, iniciando con una muestra saturada hasta el secado al horno, y gráficas de relación de vacíos contra grado de saturación (G_w). De esta última es posible extraer el valor de la relación de vacíos mínima (e_{min}) y el diferencial de relación de vacíos de la zona elastoplástica (Δe).

Luego la variación de la relación de vacíos obtenida de la zona elastoplástica se lleva a la gráfica de compresibilidad del suelo para obtener los esfuerzos equivalentes del esfuerzo de succión (χs), encontrando además el endurecimiento por succión ($\chi_0 s_0$) que representa el límite de la Superficie de Fluencia Bajo Carga inicial (SFFC0), zona que nos delimitará en el modelo la parte elástica y la elastoplástica

e) Cálculo de los esfuerzos efectivos mediante la ecuación

Se obtendrá un esfuerzo efectivo medio que es expresado en términos del esfuerzo medio neto (s_{net}) más la succión (s) multiplicada por el “parámetro de Bishop” (χ), donde la relación “Succión-Grado de saturación” es la unión inmediata para conseguir el acoplamiento hidro-mecánico (Ecuación 1).

$$\sigma' = \sigma_{net} + \chi s \tag{1}$$

El modelo de análisis plantea la Ecuación (1) como el hecho de que el factor $\chi \approx G_w$ (Obergh & Sallfors, 1995), donde G_w representa el grado de saturación que posee la muestra en la trayectoria de humedecimiento o secado según sea el caso. Según (Rojas, 2006) se ha podido demostrar que el valor de χ depende de la forma en la que el agua se distribuye al interior del suelo y esa distribución se puede obtener a partir del modelado de los poros del suelo. Luego se reescribe la Ecuación (1) como:

$$P' = G_w * S_o + P_c \tag{2}$$

Donde:

G_w = Grado de saturación

S_o = Succión

P_c = Carga de sitio y/o carga de fabricación de la muestra

f) Cálculo de la densidad relativa (D_r)

Una muestra de suelo expansivo se hincha por humedecimiento, una porción del aumento de volumen se produce en la macroestructura, por lo que la densidad

del material juega un papel muy importante. Esto se puede tomar en cuenta con el parámetro de Densidad Relativa (D_r). Se considera una relación de vacíos mínima “ e_{min} ” y una relación de vacíos máxima “ e_{max} ”, la cual implica comparar la densidad del suelo respecto de sus estados más denso y más suelto posibles, estableciendo que la deformación volumétrica plástica transmitida por la microestructura a la macroestructura es función de la densidad relativa Ecuación (3), mientras que las deformaciones elásticas no se ven afectadas por este parámetro (Montes & González, 2018).

$$D_r = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \tag{3}$$

g) Cálculo del índice de expansión (λ_{ex}) y el índice de expansión-colapso (λ_{cex})

$$\lambda_{ex} = (\lambda - \kappa) (D_r) + \kappa \tag{4}$$

$$\lambda_{cex} = (\lambda - \kappa) (1 - D_r) - \kappa \tag{5}$$

h) Determinación de la deformación volumétrica mediante la siguiente ecuación

$$\varepsilon_v = e_0 * (p'_t / p'_o)^\lambda - e_0 / 1 + e_0$$

- Donde λ será sustituido por el índice λ_{ex} o λ_{cex} , o por la pendiente κ si es que la muestra no ha sobrepasado la zona elástica.

CONCLUSIONES

- El modelo elastoplástico utiliza la ecuación de esfuerzos efectivos de (Bishop, 1959) haciendo el parámetro χ igual al grado de saturación. De tal manera que se involucra la curva característica y la trayectoria de secado-humedecimiento.
- Es posible obtener valores próximos al comportamiento real del material que se pretenda estudiar simulando expansión y colapso dependiendo de las cargas aplicadas.
- Es posible obtener los parámetros del modelo mediante una serie de ensayos convencionales, dentro de los cuales las curvas de retención son las que requieren mayor cuidado y experiencia.
- Se puede modelar el comportamiento de los suelos expansivos mediante las diferencias de succión y la carga aplicada.

- La metodología propone el menor número de ensayos necesarios para encontrar la deformación volumétrica de un determinado estrato de suelo, alcanzando el mismo resultado deseado sin perder su precisión.
- El número de ensayos o pruebas de laboratorio imprescindibles para encontrar la deformación volumétrica son: succión, consolidación y límite de contracción volumétrico. De cada una de ellas es posible obtener varios resultados, además de las propiedades y características necesarias del suelo.
- La cantidad de especímenes a ensayar en cada una de las pruebas quedan resumidas como: 20 muestras para pruebas de succión (10 muestras para el proceso de secado y 10 para el proceso de humedecimiento), 2 muestras para la prueba de consolidación isotrópica para obtener las curvas de compresibilidad y los parámetros que se derivan de ellas, además de 4 o 5 muestras para la prueba del límite de contracción volumétrica.
- Para encontrar la deformación volumétrica se deben realizar ordenadamente los siguientes pasos: Cálculo de succión, grado de saturación y elaboración de la Curva de Retención agua-suelo, cálculo de la relación de vacíos inicial y máxima, determinación de los parámetros generales k y l , cálculo de la relación de vacíos mínima, cálculo de los esfuerzos efectivos mediante la ecuación planteada en este artículo, cálculo de la densidad relativa, cálculo del índice de expansión y el índice de expansión-colapso, y por último la determinación de la deformación volumétrica mediante la ecuación descrita.
- Finalmente, y como propósito principal de encontrar la deformación volumétrica, se pueden conocer los asentamientos que ocurren bajo una determinada cimentación en este tipo de suelos. Para el cálculo de los asentamientos es recomendable la obtención de una muestra de cada estrato presente en el suelo de estudio que sea determinante para la cimentación a proyectar en el lugar. Para cada una de las muestras se realiza una serie de ensayos con el objetivo de conocer sus propiedades índice y poder llegar al valor de deformación volumétrica que presenta cada capa. Luego conociendo el espesor de cada estrato y su deformación volumétrica, se llega a un valor de asentamiento parcial con la multiplicación de estos dos parámetros. Posteriormente para obtener los asentamientos totales se realiza una sumatoria de todos los asentamientos parciales encontrados.

REFERENCIAS

- Alonso, E. E. (1999). Modelling the mechanical behaviour of expansive clays. *Engineering Geology*, 54, 173-183.
- ASTM, D.-4. (2014). Standard test methods for one-dimensional swell or collapse of soils. ASTM.
- Bishop, A. (1959). The effective stress principle.
- Bulut, R., & Leong, E. (2008). Indirect measurement of suction. *Geotechnical and Geological Engineering*, 26 (6).
- D5298, A. (2016). "Standard Test Method for Measurement of Soil Potencial (Suction) Using Filter Paper". ASTM International.
- Garrido, J. A. (2004). *Mecánica de suelos no saturados*. México: Universidad Autónoma de Querétaro.
- Leal, A. N., Tauta, J. F., & Blanco, E. F. (2009). Determinación de los parámetros para los modelos elastoplásticos Mohr-Coulomb y hardening soil en suelos arcillosos. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 8(15), 75-91.
- Montes, C. I., & González, E. R. (2018). *Modelación de suelos expansivos mediante esfuerzos efectivos*. Querétaro: Universidad Autónoma de Querétaro.
- Nuth, M., & Laloui, L. (2008). Advances in modelling hysteretic water retention curve in deformable soils. *Computers and Geotechnics*, 35, 835-844.
- Oberg, A.L., & Sallfors, G. (1995). A rational approach to the determination of the shear strength parameters of unsaturated soils. 1st Int. Conf. on Unsaturated Soils. Paris. Recuperado de <http://worldcat.org/isbn/9054105836>
- Rojas, E. (2006). Equivalent stress for unsaturated soils. 3rd Int. Conference on Unsaturated Soils. Arizona.
- Rojas, E. (2018). Un modelo general para suelos no saturados totalmente acoplado. *Digital Ciencia@UAQRO*, (2), 11-23.

Cómo citar:

Méndez-Herrada I., & Pérez-Rea M. L. (2022). Metodología para encontrar la deformación volumétrica de un suelo expansivo y parcialmente saturado con la menor cantidad de ensayos posible. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 23 (02), 1-5. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2022.23.2.015>