

Presión de expansión y su interpretación utilizando esfuerzos efectivos

Cesar Isaac VERDÍN MONTES^{a,1} y Eduardo ROJAS^a

^a Facultad de ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, México

Resumen. El diseño tradicional de cimentaciones no contempla algunos aspectos relevantes del comportamiento de los suelos expansivos. La expansión puede ocurrir por humedecimiento del suelo y provoca una presión vertical que puede dañar la estructura si supera el esfuerzo aplicado por la cimentación. En este trabajo se presenta la determinación de la presión de expansión mediante una serie de ensayos realizados en prensa triaxial y odómetro. Además, se hace una interpretación de los valores obtenidos con base en el concepto de esfuerzos efectivos.

Palabras Clave. Suelos expansivos, presión de expansión, esfuerzos efectivos.

1. Introducción

Inicialmente la investigación del comportamiento de los suelos dentro de la práctica ingenieril, se hizo con los suelos saturados. Esto a pesar de que la mayoría de los suelos se encuentran en un estado no saturado. Un caso especial de los suelos no saturados lo constituyen los suelos expansivos [1]. Estos materiales deben su origen a la erosión y las reacciones químicas en rocas máficas y esquistos metamórficos [2].

Los suelos expansivos incrementan y reducen significativamente su volumen en función de algunas variables como son su densidad, mineralogía, estado de esfuerzos y contenido de agua. Dos parámetros importantes que caracterizan el comportamiento de estos suelos son la presión de expansión y su deformación volumétrica.

Las dificultades asociadas a los suelos expansivos se originan por los cambios de humedad. Éstos pueden causar asentamientos que derivan de la desecación del suelo al incrementarse la succión. La expansión ocurre por aumento de humedad, generando movimientos en la cimentación que se reflejan en la superestructura.

Los movimientos estructurales causados por los suelos expansivos pueden resultar en diversos daños sobre edificaciones, presas y carreteras. En las estructuras causan agrietamientos y levantamientos de losas y muros cuando no se toma en cuenta el valor de la presión de expansión. Un diseño inadecuado puede resultar en grandes pérdidas económicas [4]. La interpretación y modelado del comportamiento de estos suelos es todavía un desafío a la ingeniería [5].

Los cambios de volumen de un suelo expansivo determinados dependen de la trayectoria de humedecimiento y de los esfuerzos aplicados. Una de las trayectorias más comunes es la hidratación bajo carga constante [6]. En este caso, el suelo puede expandir,

¹ Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Cerro de las Campanas S/N, Centro Universitario, 76010 Santiago de Querétaro, Qro.

colapsar o mostrar una combinación de ambos comportamientos dependiendo de la carga aplicada y el valor de succión inicial [7-8].

Distintos trabajos han analizado los suelos expansivos mediante el cambio de volumen unidimensional y triaxial [9]. Esto se ha hecho utilizando las variables independientes de esfuerzo, tales como el esfuerzo neto y la succión. Sin embargo, diversos investigadores [7, 10-13] consideran más adecuado utilizar el principio de esfuerzos efectivos. Estos esfuerzos se definen como aquellos que controla la resistencia al cortante y los cambios de volumen de los suelos. Es posible usar el principio de esfuerzos efectivos del Dr. K. V. Terzaghi [14] y trasladarla al caso de los suelos no saturados mediante la ecuación de Bishop [15]. De esta forma, se logra estudiar de manera más sencilla el comportamiento de estos materiales.

Este trabajo postula la hipótesis de que es posible modelar el comportamiento de los suelos expansivos utilizando la ecuación de esfuerzo efectivos de Bishop y realizando un acoplamiento hidro-mecánico. De esa manera, no se requiere de una superficie de fluencia adicional [16] a la superficie de colapso bajo carga como propone el modelo Expansivo de Barcelona.

2. Modelo elastoplástico

El modelo utiliza los ejes de esfuerzo medio efectivo (p') y succión (s), donde el esfuerzo efectivo está definido por la ecuación de Bishop (1959).

$$\sigma' = \sigma_{net} + \chi \quad (1)$$

siendo σ_{net} el esfuerzo medio neto, s es la succión mátrica del suelo y χ el parámetro de Bishop. Este parámetro se relaciona con el grado de saturación (G_w) del suelo. Por lo tanto, al involucrar el grado de saturación con la resistencia, se genera la condición para establecer un acoplamiento hidro-mecánico.

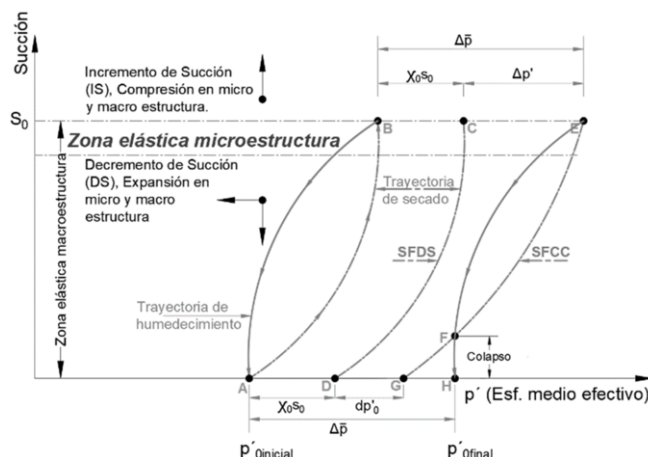


Figura 1. Modelo de comportamiento volumétrico utilizando esfuerzos efectivos.

Para explicar el comportamiento de los suelos expansivos, es necesario considerar el planteamiento de Alonso [16] quien postula que el suelo presenta una microestructura

y una macroestructura. La microestructura es responsable de la expansión-contracción del suelo mientras que la macroestructura es responsable del colapso. De esta manera, el comportamiento volumétrico de los suelos expansivos en el plano de esfuerzo efectivo contra succión, está delimitado por la superficie de fluencia después del secado (SFDS) y la superficie de incremento por succión (IS). Esta área representa la zona elástica de la macroestructura. Afuera de esta zona, ocurre el comportamiento elastoplástico de la macroestructura. Si se aplica un incremento de esfuerzo neto suficientemente grande, la SFDS se desplaza y genera una superficie de colapso bajo carga (SFCC) (Figura 1). Si una trayectoria de humedecimiento atraviesa esta superficie, se genera el colapso de la macroestructura del suelo. Por otro lado, el comportamiento de expansión-contracción de la microestructura ocurre dentro de todo este plano excepto por una franja elástica delimitada por las superficies de incremento de succión y decremento de succión (DS) como indica la Figura 1. La expansión de la microestructura se puede producir por humedecimiento o por descarga.

La deformación volumétrica plástica generada al aplicar un incremento del esfuerzo medio neto $\Delta\bar{p}$, está dada por la (Ec. (2)) [17]. Para determinar el endurecimiento en condición saturada que produce esta deformación (Figura 1), se utiliza la Ec. (3).

$$\Delta\varepsilon_v^p = \frac{\Delta e^p}{1 + e_a} \quad (2)$$

$$dp'_0 = \frac{e_E * (p_0 + \chi_0 s_0)}{e_G * (p_0 + 2\chi_0 s_0)} * (\Delta p - \chi_0 s_0) \quad (3)$$

En la Figura 1 se considera que el suelo está inicialmente saturado a un esfuerzo medio inicial p_0 y sigue una trayectoria de secado A-B hasta el valor de succión s_0 . En tal caso, la superficie de fluencia SFDS se localiza en la posición indicada en la Figura 1. Esta superficie muestra un endurecimiento por succión $\chi_0 s_0$. Posteriormente, al aplicar un incremento de carga ($\Delta\bar{p}$) lo suficientemente grande como para rebasar la carga de preconsolidación aparente del suelo (punto C), se genera una deformación volumétrica plástica $d\varepsilon_v^p$. Entonces la posición de la superficie de fluencia SFCC estará dada por la ecuación:

$$dp'_s = \frac{e_E * (\Delta\bar{p} - \chi_0 s_0)}{e_s (p_0 + 2\chi_0 s_0)} * (p_0 + \chi s + \chi_0 s_0) \quad (4)$$

El comportamiento volumétrico elastoplástico del suelo se establece mediante la Ec. (5) [17-18] la cual está escrita en función de esfuerzos efectivos. Así la deformación volumétrica está dada por la Ec. (6).

$$\frac{de}{e} = \lambda \frac{dp'}{p'} \quad (5)$$

$$\varepsilon_v = \frac{e_0 * \frac{p_f'^{\lambda}}{p_0'} - e_0}{1 + e_0} \quad (6)$$

donde p'_0 y p'_f representan el esfuerzo efectivo inicial y final de la muestra después de un incremento de humedad. El parámetro λ puede representar al índice de expansión (λ_{ex}) o de expansión–colapso (λ_{cex}). Estos índices estarán en función de la compacidad relativa del suelo. La compacidad relativa depende de las relaciones de vacíos mínima (e_{min}) y máxima (e_{max}) del material [19]. Por otro lado, si la muestra no sobrepasa la zona elástica, el índice λ se sustituye por el índice de descarga-recarga κ .

3. Metodología

Para esta investigación se dispuso de muestras inalteradas que se obtuvieron en la ciudad de Querétaro, Querétaro, México. El sitio es un predio desocupado y ubicado en el fraccionamiento Colonos de Jurica, con las coordenadas geográficas latitud 20°38'49.4'' N y longitud 100°26'09.1'' O a una profundidad de 1.80 metros. Se realizaron pruebas de laboratorio para obtener las propiedades índice en base a la normatividad y teoría relevante.

La determinación de las curvas de retención agua-suelo (CRAS) se realizó con base a la norma ASTM D-5298. Para generar la curva de humedecimiento, primeramente, se secó lentamente un grupo de muestras para finalmente secarlas al horno durante 24 horas.

Se realizaron ensayos de humedecimiento a carga constante utilizando muestras inalteradas, labradas en anillos de consolidación [8] y con base a la normatividad ASTM D 5298. Los ensayos se realizaron mediante la normatividad ASTM D-2435, a incrementos de carga de 50, 200, 300 y 500 kPa y con 5 incrementos de humedad desde el estado seco hasta la saturación.

El método C para presión de expansión se realizó bajo la norma ASTM D 5298. Se colocó el anillo y la muestra sobre la prensa triaxial, realizando 5 incrementos de humedad hasta la saturación, registrando el esfuerzo ejercido por el suelo expansivo a volumen constante.

4. Resultados y discusiones

4.1. Curvas de retención y presión de expansión.

Las curvas de secado y humedecimiento se presentan en la Figura 2 en los ejes grado de saturación (G_w) contra succión (s). Se realizaron ensayos de expansión en muestras inalteradas labradas en anillos de consolidación y secadas al horno, obteniendo un contenido de humedad promedio inicial de $w = 7.85\%$ y un grado de saturación promedio inicial de $G_w = 22.48\%$. Este contenido de humedad lo adquirieron las muestras durante el labrado. Los resultados en los ensayos se presentan en la Figura 3 en el plano relación de vacíos – esfuerzo. La presión de expansión obtenidas por el método A fue de 250 kPa, mientras que el triple odómetro arrojó un valor de 425 kPa. Esta diferencia se debe a las diversas trayectorias de esfuerzo que sigue cada ensaye.

Los índices de compresión ($\lambda=0.91$) y descarga ($\kappa=0.09$) se obtuvieron por medio de un ensaye odométrico saturado. Para determinar la densidad relativa del suelo, se utilizaron los valores de $e_{max} = 1.50$ y $e_{min} = 0.38$. Estos valores se obtuvieron mediante una expansión libre en odómetro y un ensaye de contracción en una muestra que se secó al horno durante 24 horas, respectivamente.

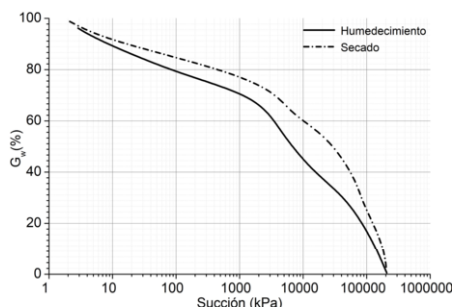


Figura 2. Curvas de retención agua-suelo del material estudiado.

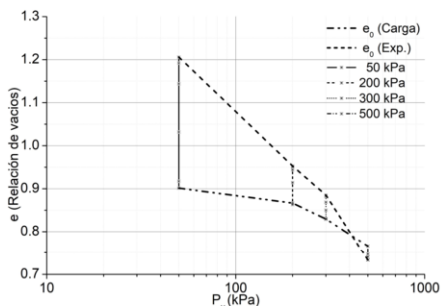


Figura 3. Ensayes de expansión a diversas cargas.

4.2. Ensaye en prensa triaxial.

Por medio de un ensaye realizado en la prensa triaxial se obtuvo una presión de expansión de 163 kPa (Fig 4). Todos estos resultados se utilizan para obtener los valores de endurecimiento por succión $\chi_{0S_0} = 0.47$ MPa, considerando una succión inicial promedio de las muestras de $S_0 \text{ prom} = 2.1$ MPa de acuerdo con la CRAS. Así es posible obtener la trayectoria de secado (TS) y las superficies de fluencia para diferentes cargas (Figura 5). La presión de expansión obtenida con prensa triaxial (Figura 4), representan aproximadamente un tercio de la presión de expansión obtenida con el ensaye del triple odómetro.

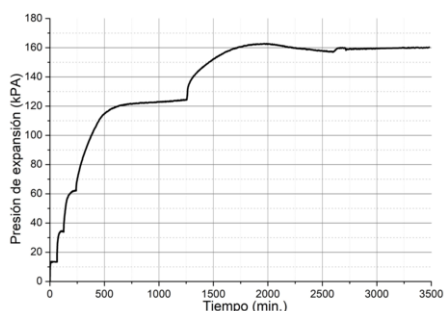


Figura 4. Presión de expansión en prensa triaxial.

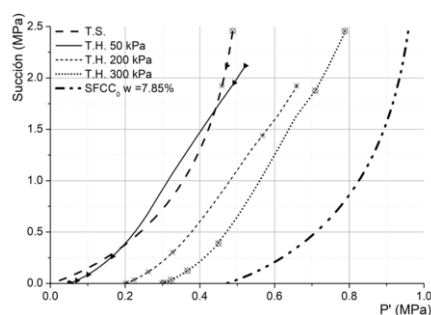


Figura 5. Humedecimiento a distintas carga y superficie de fluencia después del secado.

4.3. Interpretación dentro del modelo de esfuerzos efectivos.

Las deformaciones volumétricas por humedecimiento y bajo diversas cargas se obtienen por medio de la Ec. (6). También se requieren las curvas de retención del suelo para obtener el valor del parámetro de Bishop para diversas succiones. Los resultados se grafican en el plano deformación volumétrica (ϵ_v) contra succión, como muestran las Figuras 6 y 7. La respuesta del suelo puede ser de expansión pura para cargas bajas (Figura 6) o bien de expansión y colapso (Figura 7) para cargas por encima del esfuerzo aparente de preconsolidación.

Los resultados mostrados en las Figuras 6 y 7 muestran que, para los incrementos de esfuerzo netos de 50 a 300 kPa, el suelo sufre expansión pura, dado que su trayectoria siempre se encuentra a la izquierda de la superficie de colapso por carga (SFCC). Para la muestra con un incremento de esfuerzo neto de 500 kPa, la trayectoria de humedecimiento llega a cruzar la SFCC a cierto valor de la succión, ocasionando una expansión inicial de la microestructura seguida del colapso de la macroestructura.

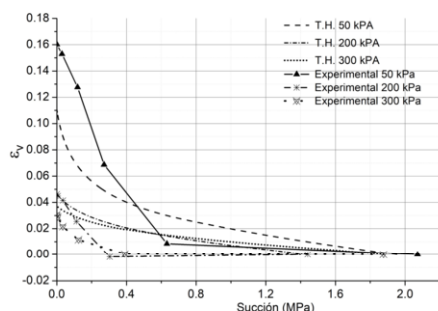


Figura 6. Simulación de la expansión a diferentes cargas.

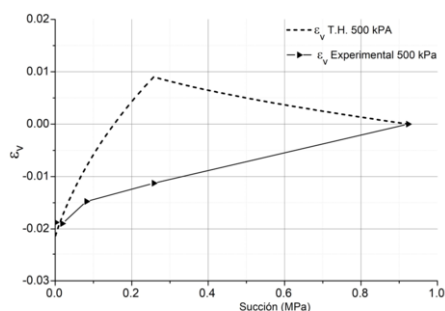


Figura 7. Simulación de la expansión y colapso de la muestra cargada a 500 kPa.

5. Conclusiones

Se obtuvieron las presiones de expansión de un suelo siguiendo diversas trayectorias de carga. Se observa que el comportamiento volumétrico del suelo depende de la trayectoria de secado-humedecimiento y las cargas aplicadas. También se presenta un modelo elastoplástico capaz de simular el comportamiento volumétrico de un suelo expansivo. Este modelo se basa en el concepto de esfuerzos efectivos y utiliza la ecuación de Bishop. El parámetro de Bishop se considera igual al grado de saturación. De esta forma es posible incluir el acoplamiento hidro-mecánico de los suelos no saturados.

El modelo permite simular el comportamiento volumétrico del suelo expansivo a diversas cargas e incluso modelar el comportamiento de expansión y colapso que se observa cuando la carga neta aplicada supera al esfuerzo de preconsolidación aparente del suelo.

Referencias

- [1] Vanapalli, S., & Lu, L. (2012). "A state-of-the art review of 1-D heave prediction methods for expansive soils", *International Journal of Geotechnical Engineering*, 6(1), 15-41.
- [2] Thomas, P. J., Baker, J. C., & Zelazny, L. W. (2000). "An expansive soil index for predicting shrink-swell potential", *Soil Science Society of America Journal*, 64(1), 268-274.
- [3] Gromko, G. J. (1974). "Review of expansive soils", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*.
- [4] Krohn, J.P. & Slosson, J.E. (1980). "Assessment of expansive soils in the United States", Fourth
- [5] International Conference on Expansive Soils, 596-608.
- [6] Jones, L. D., & Jefferson, I. (2012), "Chapter C5 - Expansive Soils" *Inst. Civ. Eng. Manuals Ser.*, 1-46.
- [7] Zepeda Garrido, J. G. (2004), "Capítulo 5 - Mecánica de suelos no saturados", 127 - 134.
- [8] Galaviz-González, R. (2013), "Predicción de asentamientos de cimentaciones superficiales mediante análisis de interacción suelo expansivo-estructura de cimentación", Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Querétaro. México.

- [9] Hoffmann, C., Alonso, E. E., & Romero, E. (2007). "Hydro-mechanical behaviour of bentonite pellet mixtures", Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 32(8-14), 832-849.
- [10] Al-Shamrani, M. A., & Al-Mhaidib, A. I. (1999). *Prediction of potential vertical swell of expansive soils using a triaxial stress path cell*", Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 32(1), 45-54.
- [11] Alanís, A. (2012). "Deformación volumétrica en suelos no saturados", Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Querétaro. México.
- [12] Zazueta Rodríguez, R. (2016), "Modelo Constitutivo para suelos expansivos a partir de la ecuación de esfuerzos efectivos de Bishop", Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Querétaro. México.
- [13] Wheeler, S. J., Sharma, R. S., & Buisson, M. S. R. (2003). "Coupling of hydraulic hysteresis and stress-strain behaviour in unsaturated soils", Géotechnique, 53(1), 41-54.
- [14] Arroyo Chávez, H. (2015). "Modelo constitutivo para suelos no saturados basado en el principio de esfuerzos efectivos" Tesis Doctoral, Universidad Autónoma de Querétaro. México.
- [15] Terzaghi, K. & Fröhlich, O. (1936) "Theorie der Setzung von Tonschichten: eine Einführung in die analytische Tonmechanik".
- [16] Bishop, A.W. (1959) "The principle of effective stress", Teknisk Ukeblad, 39, 859-863.
- [17] Alonso, E. E., Vaunat, J., & Gens, A. (1999). "Modelling the mechanical behaviour of expansive clays", Engineering geology, 54(1-2), 173-183.
- [18] Alanís, A. (2012), "Deformación Volumétrica en suelos no saturados", Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, 194-217.
- [19] Rojas, E., & Chávez, O. (2013). "Volumetric behavior of unsaturated soils", Canadian Geotechnical Journal, 50(2), 209-222.
- [20] Rojas, E., (2016) "Unrevealing the enigma of expansive-collapsing soils".
- [21] ASTM D 5298 (2003). "Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper".
- [22] ASTM D 2435 (1990). "Standard test method for one-dimensional consolidation properties of soils".
- [23] ASTM D 4546 (2014). "Standard test methods for one-dimensional swell or collapse of soils".