

Influencia de la consolidación secundaria en la rigidez dinámica de un suelo compresible (arcillas)

Influence of secondary consolidation on the dynamic stiffness of a compressible soil (clays)

Jordi Iván García-Quirós¹ Alexandra Ossa-López², Mario Flores-Guzmán³,
Ivannia Solano-Aguilar⁴

García-Quirós, J; Ossa-López, A; Flores-Guzmán, M; Solano-Aguilar, I. Influencia de la consolidación secundaria en la rigidez dinámica de un suelo compresible (arcillas). *Tecnología en Marcha*. Vol. 33, especial Movilidad estudiantil. Pág 227-242.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v33i7.5501>



- 1 Estudiante de Ingeniería en Construcción en el Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: jordy0896@gmail.com.
- 2 Instituto de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. México. Correo electrónico: aossal@iingen.unam.mx.
- 3 Instituto de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. México. Correo electrónico: mfloresg@iingen.unam.mx.
- 4 Maestría en Ingeniería Geotécnica. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: solaivi@gmail.com

Palabras clave

Esfuerzo desviador; consolidación secundaria; rigidez dinámica; módulo dinámico equivalente de Young; módulo resiliente; pruebas triaxiales dinámicas.

Resumen

Con el objetivo de evaluar la influencia de la consolidación secundaria en la rigidez dinámica de un suelo compresible, se llevaron a cabo pruebas triaxiales dinámicas consolidadas no drenadas (CU), en probetas de suelo recuperadas en el antiguo lago de Texcoco, México, las cuales corresponden a un suelo arcilloso.

Las pruebas consistieron en dos etapas. Primero, las probetas se sometieron a un esfuerzo efectivo (σ') definido; una vez concluida la consolidación primaria, etapa en la cual se disipa la presión de poro, se realizaron mediciones del módulo dinámico equivalente de Young (E_{eq}) y módulo resiliente (M_r) a distintos niveles de esfuerzo desviador, aplicando un pulso periódico senoidal y haversiano, respectivamente. Una vez determinados dichos módulos, se continuó consolidando el material con el mismo nivel de σ' , para así establecer la influencia del tiempo de consolidación en las magnitudes de estos. Por tanto, se realizaron dos mediciones adicionales a cada 24 horas, con lo cual se obtiene la variación de los módulos a lo largo del proceso de consolidación secundaria.

El procedimiento anterior se realizó a distintos niveles de esfuerzo efectivo o de consolidación, incluyendo etapas de carga y descarga de la curva de compresibilidad.

Keywords

Stress deviator; secondary consolidation; dynamic stiffness; Young dynamic equivalent module; resilient module; dynamic triaxial tests.

Abstract

In order to evaluate the influence of secondary consolidation on the dynamic stiffness of a compressible soil, consolidated undrained (CU) triaxial dynamic tests were carried out on soil specimens recovered from the old lake of Texcoco, which correspond to a clay soil.

The tests consisted of two stages. First, the specimens were subjected to a defined effective stress (σ'); once the primary consolidation, a stage in which pore pressure is dissipated, measurements were made of the equivalent dynamic module of Young (E_{eq}) and resilient module (M_r) at different levels of deviating stress, applying a periodic sinusoidal and haversian pulse, respectively. Once these modules were determined, the material continued to be consolidated with the same level as σ' , in order to establish the influence of the consolidation time on the magnitudes of these. Therefore, two additional measurements were made every 24 hours, thus allowing the variation of the modules throughout the secondary consolidation process to be obtained.

The previous procedure was carried out at different levels of effective effort or consolidation, including loading and unloading stages of the compressibility curve.

Introducción

Esta investigación se desarrolló en el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), específicamente en el Laboratorio de Vías Terrestres, donde se realizan pruebas que permiten estudiar la calidad de los materiales para carreteras, como los suelos, asfaltos, mezclas asfálticas, entre otros. En este sentido, el desarrollo de esta investigación, tuvo la finalidad de estudiar las propiedades dinámicas y resilientes del suelo bajo la influencia de la consolidación secundaria del suelo.

En las últimas décadas, las arcillas del antiguo lago de Texcoco han sido objeto de una amplia investigación. Para lo cual se han aplicado pruebas tanto de laboratorio como de campo, con el objetivo de conocer cuál es el comportamiento (relación esfuerzo-deformación-tiempo) ante la presencia de diferentes cargas tanto estáticas como dinámicas [1].

El módulo E_{eq} y el módulo M_r son parte de los parámetros dinámicos más representativos que se pueden obtener para ser utilizadas en la predicción del comportamiento de una masa de suelo en el caso del módulo E_{eq} , o para su utilización como parte del diseño de los espesores de las capas de pavimento en el caso de M_r .

Módulo dinámico equivalente de Young (E_{eq})

El valor del módulo dinámico equivalente de Young, E_{eq} , permite obtener la relación entre la deformación unitaria axial (ε) y el esfuerzo desviador (σ_d) necesario para ocasionar ese nivel de deformación [2].

El módulo dinámico equivalente de Young (E_{eq}) es uno de los parámetros más importantes para calcular y analizar la dinámica del suelo. También es esencial para realizar análisis de respuesta sísmica y diseño de cimentaciones [3].

Si durante la realización de las pruebas dinámicas se obtiene el valor de E_{eq} para diferentes esfuerzos desviadores, se podrá observar el efecto causado sobre una muestra de suelo por parte de las cargas cíclicas, puesto que, como se observa en la figura 1, al aumentar el valor del esfuerzo, se generan mayores deformaciones al suelo y esto conlleva una degradación en el valor de E_{eq} .

La carga cíclica que se aplica para la medición de E_{eq} durante las pruebas triaxiales dinámicas es una onda periódica senoidal, la cual simula la forma de los esfuerzos inducidos por un sismo [4].

Según la norma ASTM D 3999 [5], el módulo dinámico equivalente de Young (E_{eq}) se puede obtener de la siguiente manera:

$$E_{eq} = \frac{\sigma_d}{\varepsilon}$$

Donde

E_{eq} : módulo dinámico equivalente de Young (MPa)

ε = deformación unitaria axial recuperable (mm/mm)

σ_d = esfuerzo desviador, (kg/ cm²)

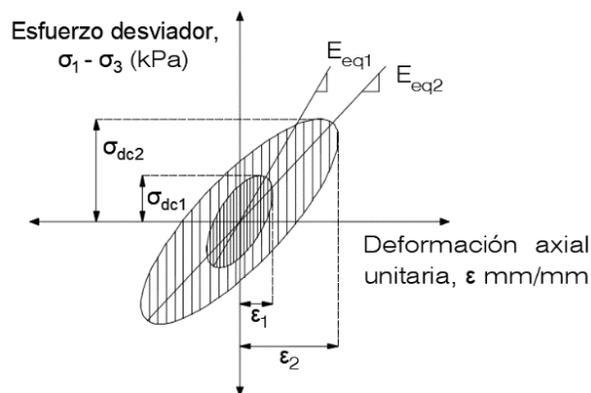


Figura 1. Efecto de la aplicación de diferentes esfuerzos desviadores en la deformación axial. Tomado de [6].

Módulo resiliente (M_r)

Como se muestra en la figura 2 bajo el efecto de cargas dinámicas cíclicas, las deformaciones plásticas tienden a acumularse y disminuir ante las aplicaciones de cada uno de los ciclos de carga, de modo que el suelo llega a un estado en el que deja de deformarse permanentemente y las siguientes deformaciones obtenidas son elásticas o recuperables. Esto le proporciona al suelo características resilientes. La obtención del módulo resiliente (M_r) es de gran importancia, dado que permite predecir los esfuerzos recuperables (resilientes), las deformaciones y las deflexiones en un pavimento. Asimismo, se utiliza en el diseño de los espesores de las estructuras de pavimentos.

El módulo resiliente se define como la magnitud del esfuerzo desviador repetido aplicado en compresión axial dividido entre el valor de la deformación axial recuperable. Por lo tanto, se tiene lo siguiente:

$$M_r = \frac{\sigma_d}{\epsilon_{\text{axial recuperable}}}$$

Donde:

- σ_3 = Esfuerzo principal menor
- σ_1 = Esfuerzo principal mayor
- σ_d = Esfuerzo desviador = $\sigma_1 - \sigma_3$
- ϵ = Deformación axial recuperable

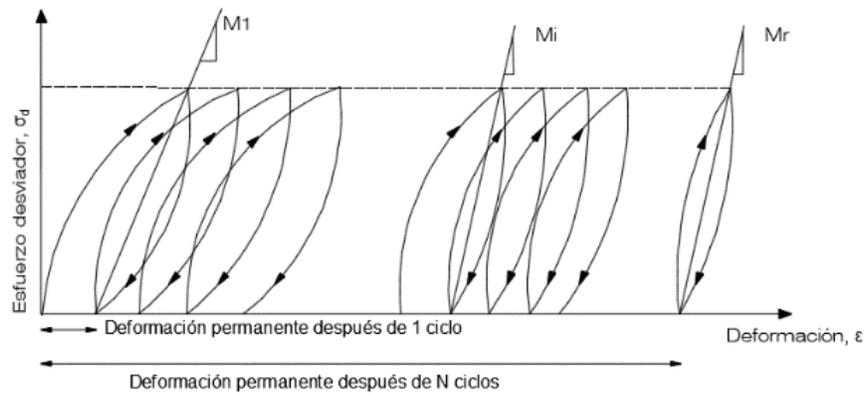


Figura 2. Efecto de un esfuerzo desviador respecto a la deformación permanente del suelo. Tomado de [8].

Este parámetro se evalúa mediante la norma AASTHO T 307 [7], el tipo de onda de carga que se induce al suelo durante la prueba de módulo resiliente es de tipo cíclica haversiano, la cual consta de un periodo de aplicación de 0,1 s y de 0,9 s de reposo. Este tipo de onda permite simular el efecto causado por el tránsito vehicular.

Metodología

El procedimiento para llevar a cabo la medición en laboratorio de los módulos E_{eq} y M_r se realizó según lo indicado en las normas ASTM D 3999 [5] y AASTHO T 307 [7], respectivamente.

Materiales y equipos empleados

Para esta investigación se trabajó con muestras inalteradas recuperadas en el antiguo lago de Texcoco; se utilizaron un total de cuatro muestras, las cuales fueron obtenidas mediante un tubo Shelby con la intención de conservar las propiedades del estado natural del suelo para provocar el mínimo cambio de sus condiciones en campo. Las profundidades de donde las muestras fueron recuperadas varían entre los 8,00 m y 10,00 m de profundidad.

En los cuadros 1 y 2, se presentan las características más relevantes de las cuatro probetas de suelo ensayadas en esta investigación, provenientes del antiguo lago de Texcoco. Para cada una de las muestras ensayadas se obtuvieron las propiedades índices, relaciones gravimétricas y volumétricas, utilizando las normas ASTM correspondientes.

Cuadro 1. Límites de consistencia y clasificación SUCS.

| Sondeo | Profundidad | Contenido de agua | Límite líquido | Límite plástico | Índice de plasticidad | Clasificación SUCS |
|-------------|---------------|-------------------|----------------|-----------------|-----------------------|--------------------|
| | | ω | L_w | L_p | I_p | |
| | (m) | (%) | (%) | (%) | (%) | |
| SS-22 M 2-1 | 10.00 - 10.20 | 228.65 | 261.64 | 118.05 | 143.58 | MH |
| SS-19 M 2-1 | 8.00 - 8.20 | 241.77 | 271.88 | 90.27 | 187.28 | CH |
| SS-16 M 3-1 | 7.90 - 8.10 | 247.70 | 274.34 | 87.07 | 181.61 | CH |
| SS-18 M3-1 | 8.20 - 8.37 | 94.28 | 112.10 | 50.92 | 82.86 | MH |

Cuadro 2. Relaciones volumétricas.

| Sondeo | Peso volumétrico | Densidad de sólidos | Relación de vacíos inicial | Grado de saturación |
|--------------|----------------------------|---------------------|----------------------------|---------------------|
| | γ_m (g/cm^3) | G_s | e_0 | S_r (%) |
| SS -22 M 2-1 | 1.26 | 3.42 | 7.94 | 98.46 |
| SS-19 M 2-1 | 1.19 | 3.53 | 9.11 | 93.61 |
| SS-16 M 3-1 | 1.22 | 3.19 | 8.10 | 97.70 |
| SS-18 M 3-1 | 1.40 | 2.92 | 3.05 | 90.32 |

En la figura 3 se presenta la carta de plasticidad definida por el sistema de clasificación de suelos SUCS. Las muestras SS-22 M 2-1 y SS-18 M 3-1 se clasifican como limos de alta plasticidad (MH), puesto que se encuentran a la derecha de la línea frontera y por debajo de la línea A. Por otra parte, las muestras SS-19M 2-1 y SS-16 M 3-1 se encuentran por arriba y sobre la línea A, respectivamente. Por lo tanto, se clasifican como arcillas de alta plasticidad (CH).

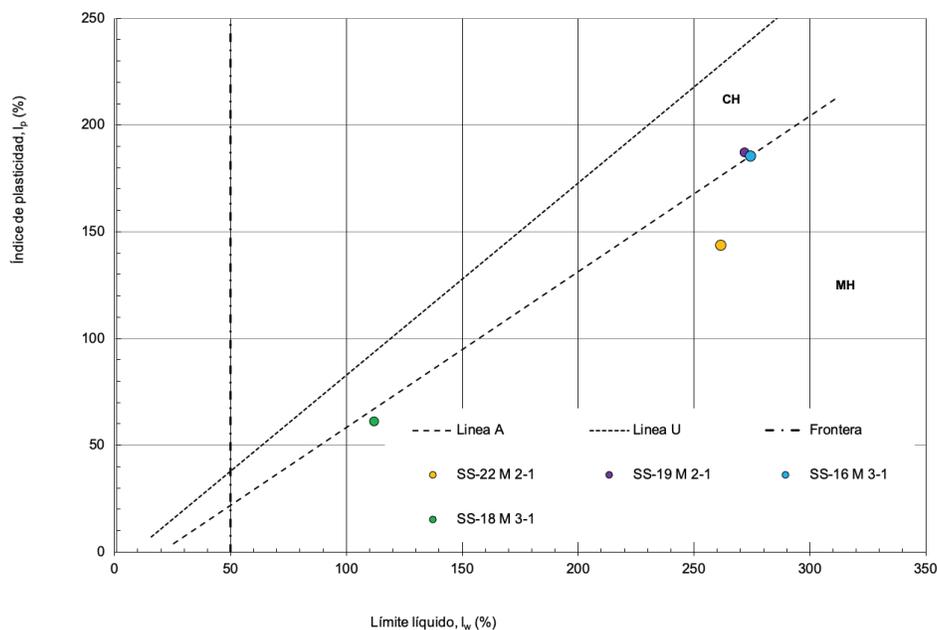


Figura 3. Clasificación de las muestras ensayadas de acuerdo con el sistema SUCS.

Las dimensiones finales de las probetas de suelo se seleccionaron de acuerdo con lo que se indica en las normas respectivas para la determinación del módulo dinámico equivalente de Young (E_{eq}) norma ASTM D 3999 [5] y el módulo resiliente (M_r) norma AASTHO T 307 [7], por lo tanto, las medidas con las que se trabajaron las probetas de suelo fueron de 7 cm de diámetro y 14 cm de altura, manteniendo una relación de diámetro altura de 2:1.

Para llevar a cabo los ensayos de laboratorio, se hizo uso de una cámara triaxial y un marco de carga MTS (Material Testing System), los cuales se encuentran conectados a un sistema de aplicación de carga (hidráulico), un panel de control, un sistema de aplicación de presión (confinante y contrapresión) y un sistema automatizado del equipo, que permite la captura y el procesamiento de los datos que durante la prueba se fueron obteniendo.

En el equipo triaxial cíclico MTS, se pueden realizar pruebas triaxiales de carácter estático, así como pruebas triaxiales cíclicas, las cuales en ambos casos pueden ser a carga o desplazamiento controlado. En la figura 4 se muestra un esquema del equipo triaxial utilizado para la aplicación de las pruebas.

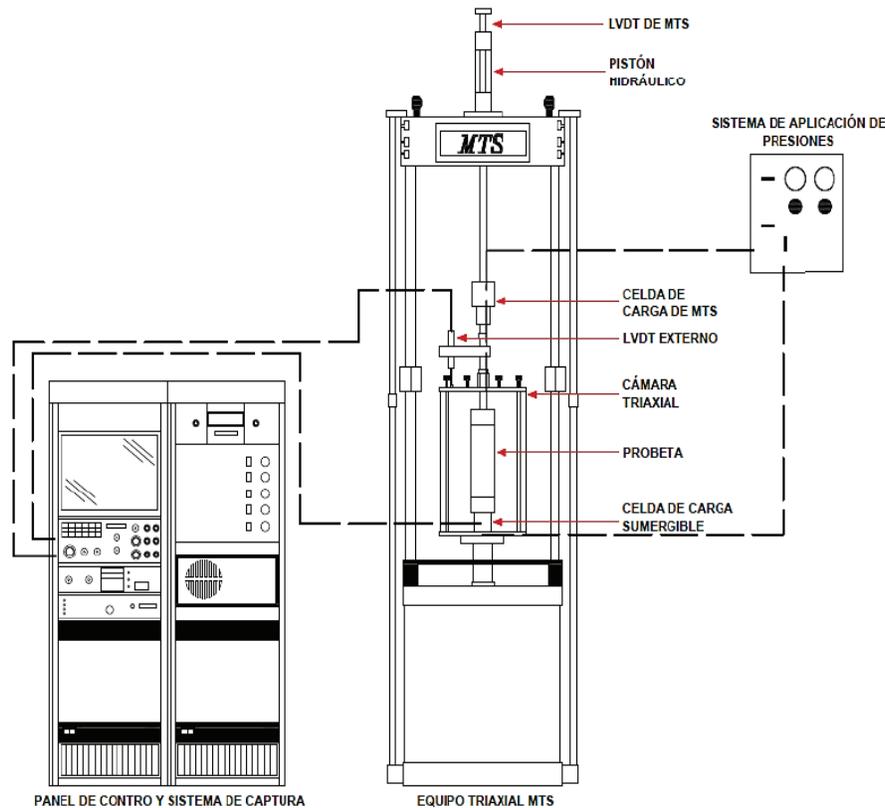


Figura 4. Esquema del equipo triaxial. Tomado de [9].

Procedimiento de ensaye para la medición de los módulos E_{eq} y M_r

Se realizaron pruebas triaxiales cíclicas a carga controlada, bajo condiciones consolidadas no drenadas (CU), aplicando ondas de tipo senoidal y haversiana para la determinación del módulo dinámico equivalente de Young (E_{eq}) y el módulo resiliente (M_r), respectivamente.

La diferencia para obtener el módulo dinámico equivalente de Young y el módulo resiliente es únicamente la onda de la carga inducida, puesto que, para la determinación de E_{eq} , se aplicó una onda de tipo senoidal y, para la determinación de M_r , se aplicó una onda de tipo haversiano. Una comparación entre las ondas se puede apreciar en la figura 5.

Ya que la intención era determinar cuál es la influencia de la consolidación secundaria en la rigidez dinámica de un suelo compresible en cada uno de los incrementos de esfuerzos efectivos aplicados, se midieron los módulos (E_{eq} y M_r). La primera medición se realizó al término de la etapa de la consolidación primaria (etapa 1). Posteriormente, se continuó con el proceso de consolidación secundaria, manteniendo el mismo valor del esfuerzo efectivo aplicado. La consolidación secundaria se dividió en dos etapas: 24 horas (etapa 2) y 48 horas (etapa 3) posterior al término de la consolidación primaria. Al finalizar cada una de dichas etapas, se realizó la medición de los módulos.

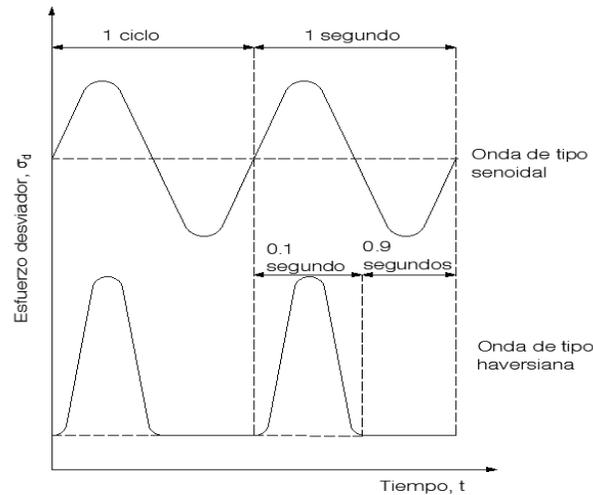


Figura 5. Comparación entre una onda de tipo senoidal y de tipo haversiano.

Las probetas de suelo ensayadas fueron sometidas, cada una, a un total de ocho o nueve incrementos de esfuerzo efectivo. Para cada incremento, se aplicaron diferentes magnitudes de carga cíclica axial en orden ascendente, en este caso fueron cargas desde 1 kg hasta 5 kg, con las cuales se garantizó la condición no destructiva de la prueba, puesto que bajo este nivel de cargas las probetas se encuentran lejos de la condición de falla.

Lo anterior se llevó a cabo con el objetivo de evaluar la diferencia que existe entre los valores de los módulos (E_{eq} y M_r) durante la consolidación primaria y secundaria.

En la figura 6, se muestra un diagrama que ejemplifica la forma en que se desarrolló la etapa de ensayos y medición de los módulos, además de las etapas en las que se realizó la consolidación primaria y secundaria. Lo mostrado en dicho diagrama representa el procedimiento seguido para cada uno de los esfuerzos efectivos aplicados.



Figura 6. Descripción del proceso de consolidación y medición de los módulos para cada uno de los esfuerzos efectivos aplicados.

Resultados experimentales y análisis

A continuación, se mostrarán los resultados de los ensayos triaxiales dinámicos obtenidos en esta investigación y su respectivo análisis. Los cuales permitirán demostrar cual es la influencia de la consolidación secundaria en la rigidez dinámica de las arcillas del antiguo Lago de Texcoco, para esto se harán relaciones entre los módulos y diferentes parámetros obtenidos durante la aplicación de los ensayos triaxiales tales como el efecto del esfuerzo desviador (σ_d), la deformación unitaria (ϵ), esfuerzo efectivo de consolidación (σ_v), esfuerzo de fluencia (σ'_p), relación de vacíos (e) e índice de plasticidad (I_p). Debido a la gran cantidad de datos obtenidos, de las 4 probetas ensayadas en total, únicamente se mostrarán resultados de la probeta SS-16 M 3-1, puesto que, el comportamiento de los módulos E_{eq} y M_r , respecto a la consolidación secundaria para todas las probetas ensayadas es similar. Los resultados de las demás pruebas son presentados a detalle en [10].

Curvas de compresibilidad

Para cada una de las probetas de suelo ensayadas, se trazó la curva de compresibilidad en cámara triaxial obtenidas durante las etapas de la consolidación, en términos de la relación de vacíos (e) y los esfuerzos efectivos (σ') aplicados. También se calculó el esfuerzo de fluencia (σ'_p) según el método de Casagrande (1936). En la figura 7, se aprecia la curva de compresibilidad para la muestra SS-16 M 3-1 con su respectivo valor del esfuerzo de fluencia.

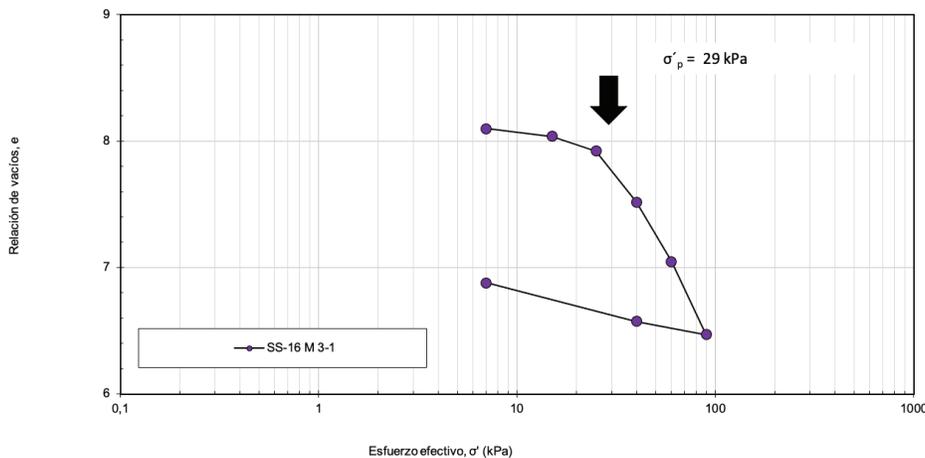


Figura 7. Curva de compresibilidad, muestra SS-16 M 3-1.

Influencia del esfuerzo desviador cíclico

En las figuras 8 y 9, se muestra el comportamiento de los módulos vs el esfuerzo desviador cíclico inducido. Para cada uno de los esfuerzos efectivos aplicados y en sus respectivas etapas de consolidación, de forma general se puede apreciar que, a medida que se aumenta el valor del esfuerzo desviador aplicado, se genera una degradación de los valores de los módulos.

Este comportamiento es independiente del módulo, es decir, la degradación del módulo al aumentar el esfuerzo desviador ocurre tanto para el módulo dinámico equivalente de Young como para el módulo de resiliencia, y ocurre tanto para el tramo de carga como para el tramo de descarga en cada una de las probetas ensayadas.

Para los diferentes esfuerzos efectivos aplicados, al comparar los módulos obtenidos en la consolidación secundaria (etapa 2 y 3) con los módulos obtenidos en la consolidación primaria (etapa 1), se puede observar una mejora. No obstante, esta diferencia es mayor conforme aumenta el nivel de esfuerzo efectivo y se hace aún más evidente para aquellos esfuerzos que se encuentran por encima del esfuerzo de fluencia.

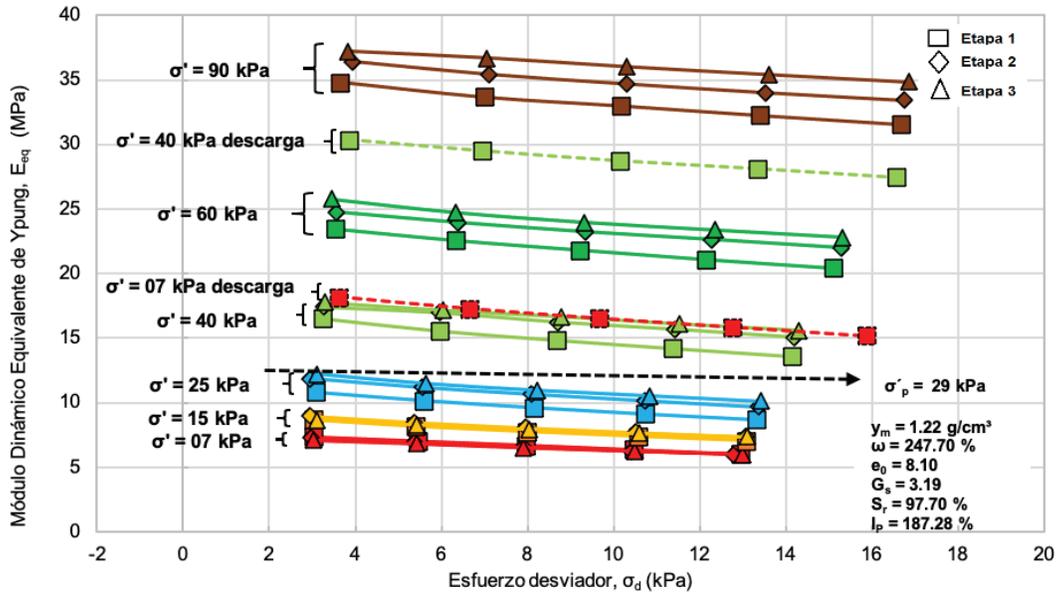


Figura 8. Curva σ_d vs. E_{eq} correspondiente a la muestra SS-16 M 3-1.

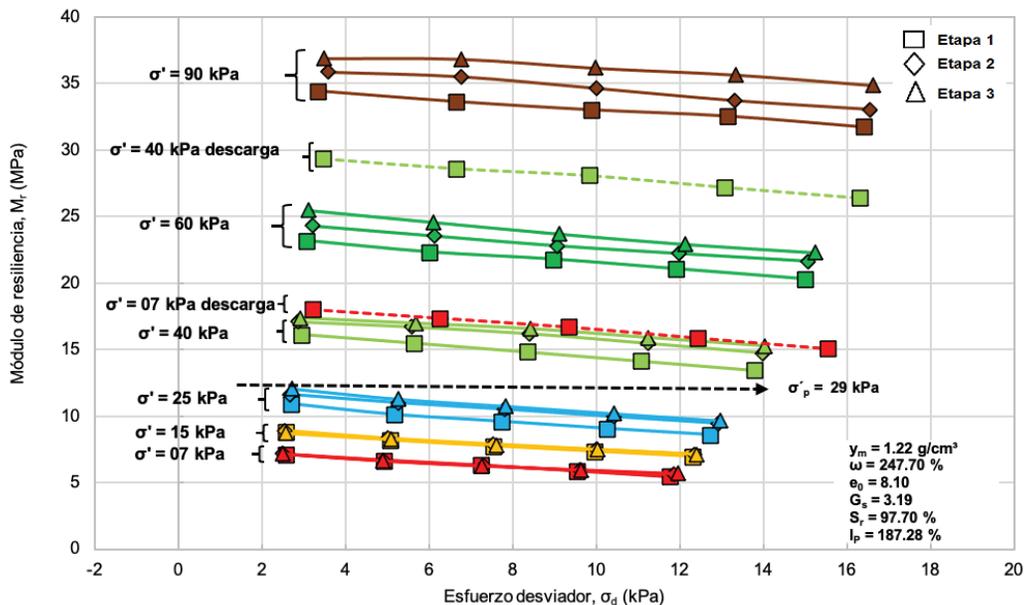


Figura 9. Curva σ_d vs. M_r correspondiente a la muestra SS-16 M 3-1.

Influencia de la deformación unitaria axial

En las figuras 10 y 11 se puede apreciar el módulo dinámico equivalente de Young y el módulo de resiliencia vs la deformación unitaria.

Para cada uno de los esfuerzos efectivos aplicados y en sus respectivas etapas de consolidación, se observa que, de forma general, conforme se aumentó el esfuerzo efectivo de consolidación, los rangos de deformación de las probetas de suelo disminuyeron considerablemente para el tramo de carga, mientras que para el tramo de descarga, las deformaciones incrementaron tomando como referencia los valores obtenidos para el último esfuerzo efectivo aplicado en la etapa de carga en cada una de las probetas ensayadas. El comportamiento se muestra en las deformaciones correspondientes tanto al módulo E_{eq} como a M_r .

Dicho comportamiento está directamente relacionado con el proceso de consolidación y al cambio volumétrico que esto conlleva, puesto que, al haber una expulsión de agua en la probeta de suelo, la relación de vacíos disminuye y se vuelve más rígida la probeta, disminuyendo los niveles de deformaciones experimentados para el tramo de carga. Por otro lado, para el tramo de descarga ocurre una recuperación de volumen en la probeta, lo cual causa que haya deformaciones mayores.

Debido a que la deformación unitaria axial depende de manera directa de la magnitud del esfuerzo desviador aplicado, se puede decir que, independientemente del nivel de esfuerzo efectivo aplicado y sus respectivas etapas de consolidación, a mayor esfuerzo desviador, mayor es el valor de la deformación unitaria axial. También se evidencia que, entre menores sean los rangos de deformación de la muestra, mayores son los módulos obtenidos.

En lo que concierne al esfuerzo de fluencia, se puede observar que, después de la aplicación de un esfuerzo efectivo mayor al esfuerzo de fluencia, los módulos presentan la disminución más importante respecto a sus rangos de deformación.

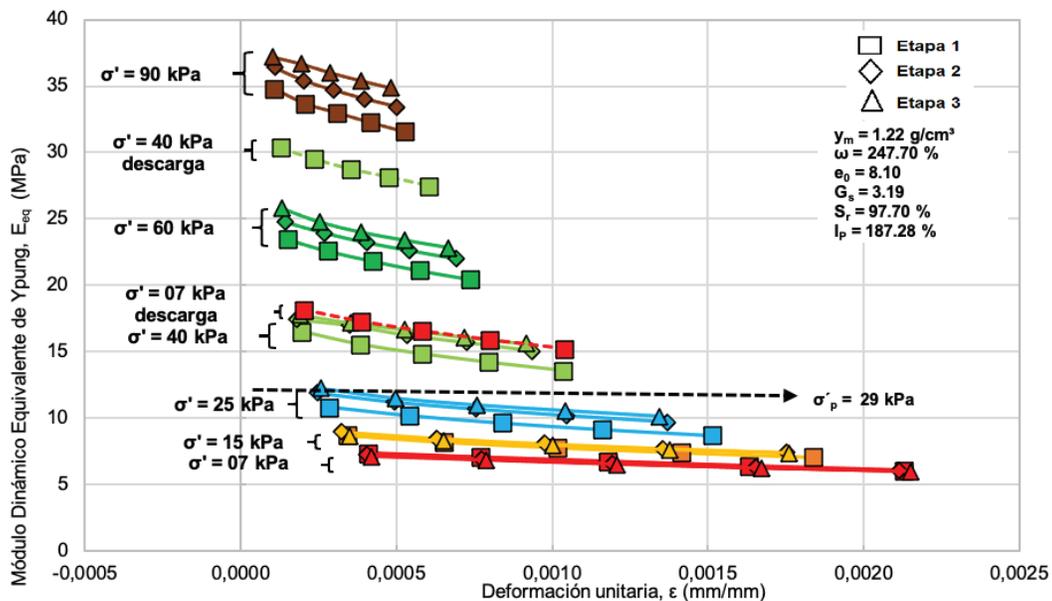


Figura 10. Curva ε vs. E_{eq} correspondiente a la muestra SS-16 M 3-1.

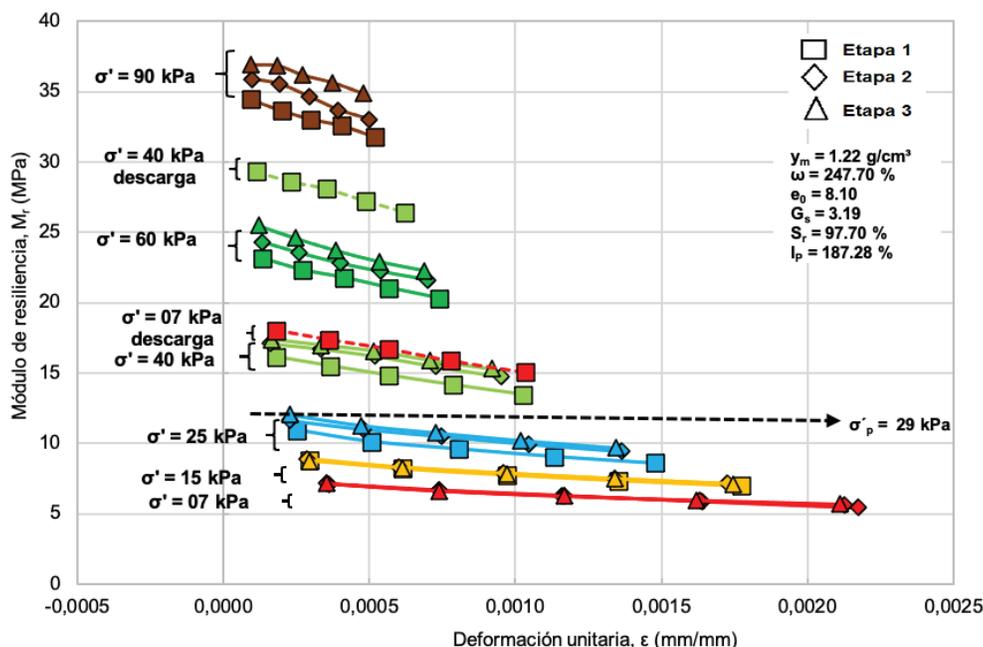


Figura 11. Curva ϵ vs. M_r correspondiente a la muestra SS-16 M 3-1.

Influencia causada por la consolidación

En cuanto a los valores de los módulos que se observan de las figuras 8 a la figura 11, se puede señalar que la influencia causada por la consolidación secundaria en la rigidez dinámica de las arcillas del antiguo lago de Texcoco se manifiesta como un aumento en los valores tanto del módulo E_{eq} como del M_r . Es decir, al comparar los valores obtenidos para cada uno de los esfuerzos efectivos en las etapas de la consolidación secundaria (etapas 2 y 3) con los valores de los módulos obtenidos en la etapa de la consolidación primaria (etapa 1), se puede apreciar que existe un incremento considerable para los módulos de las etapas 2 y 3, en especial para los σ' mayores a σ'_p .

Esto se debe a que los σ' aplicados por encima del σ'_p rebasan la sobrecarga efectiva que el suelo ha experimentado en su historial de cargas (rama virgen) y por lo tanto experimentan cambios volumétricos (ΔV) significativamente mayores a los que ocurren cuando el nivel de esfuerzo efectivo de la probeta es menor a σ'_p (rama de recompresión). Estos cambios significativos en el volumen de la probeta inducen disminución una importante de la relación de vacíos, lo cual causa que la probeta se vuelva más rígida.-

De los valores obtenidos para las cuatro muestras ensayadas, se registran incrementos de hasta 18 % y 19 % para E_{eq} y M_r en la consolidación secundaria respecto a la consolidación primaria. Por lo tanto, como se ha evidenciado, la influencia de la consolidación secundaria en la magnitud de los módulos es significativa y además favorable, representada en un incremento de estos.

Influencia de la relación de vacíos

En las figuras 12 y 13, se muestran las curvas de relación de vacíos (e) vs. tiempo (t). Se puede apreciar que, para el tramo de carga, la disminución de la relación de vacíos es mayor para los

esfuerzos efectivos aplicados por encima del esfuerzo de fluencia que para aquellos esfuerzos efectivos menores al σ'_p . Este hecho guarda relación con la diferencia del cambio volumétrico que tiene la probeta de suelo antes y después de dicho esfuerzo de σ'_p .

Para el tramo de descarga, debido a la recuperación de volumen que experimentan las probetas de suelo, no ocurre una expulsión de agua, sino más bien una absorción, ya que se pasa directamente de la aplicación de un esfuerzo mayor a uno más pequeño y, por ende, ocurre un aumento en la relación de vacíos, tomando como referencia el valor de relación de vacíos del último esfuerzo efectivo aplicado en el tramo de carga de las curvas de compresibilidad (figura 7).

Por otra parte, respecto a los módulos E_{eq} y M_r , se puede apreciar que, al haber una expulsión de agua y su consecuente disminución en la relación de vacíos, los valores de los módulos incrementaron; es decir, a medida que disminuyó la relación de vacíos por el proceso de consolidación, se generó un incremento en la rigidez de las probetas, dando como resultados la obtención de módulos mayores.

Tomando en cuenta lo anterior, y según lo indicado en las figuras 8 a la figura 11, este reacomodo de partículas propio de la consolidación secundaria es el que causa que, a la hora de realizar las mediciones de los módulos E_{eq} y M_r en cada uno de los esfuerzos efectivos aplicados, se obtengan módulos más altos para la consolidación secundaria respecto a los obtenidos para la consolidación primaria.

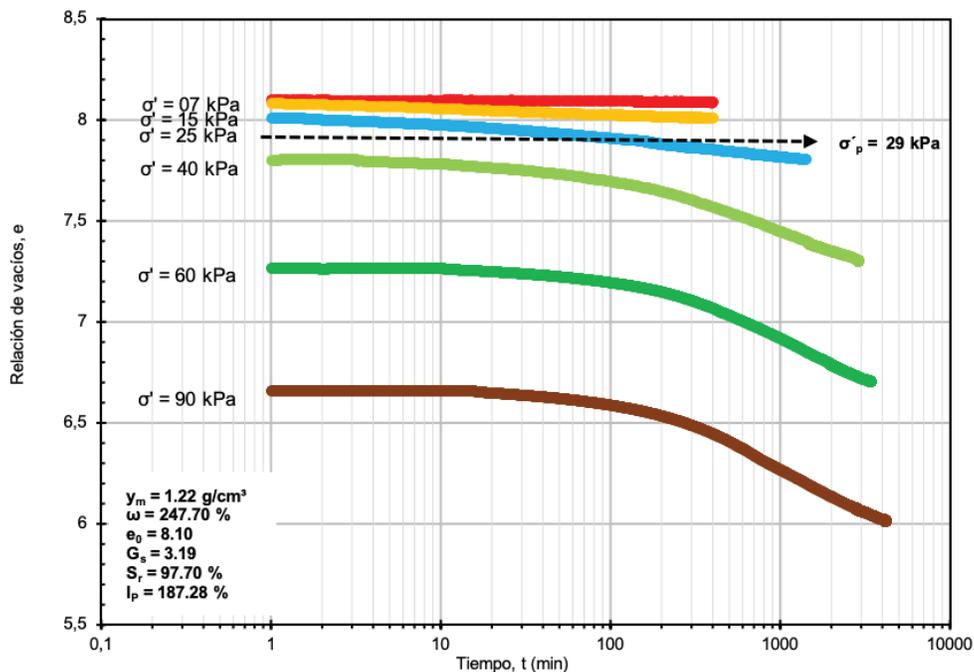


Figura 12. Curva t vs. e correspondiente a la muestra SS-16 M 3-1 para el tramo de carga.

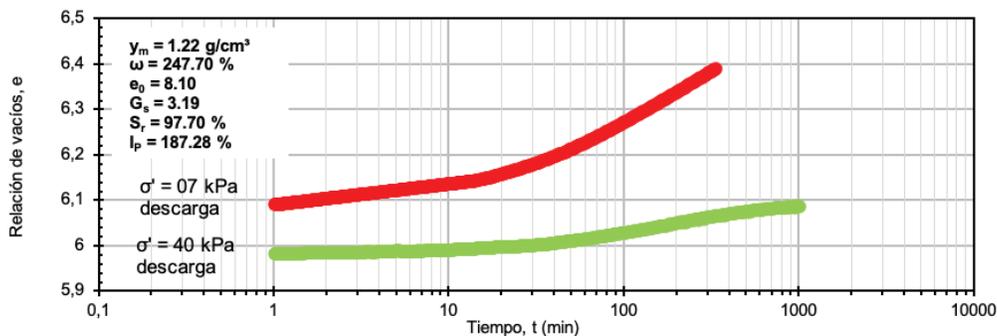


Figura 13. Curva t vs. e correspondiente a la muestra SS-16 M 3-1 para el tramo de descarga.

Influencia de las características de las muestras

En el cuadro 1 y el cuadro 2, se aprecian los límites de consistencia y relaciones volumétricas de las probetas de suelo utilizadas en este proyecto.

En exploraciones y estudios anteriores se ha encontrado la presencia de sal en la zona del antiguo lago de Texcoco, obteniendo que la concentración salina del agua intersticial del subsuelo se encuentra en el rango de 2 % hasta un 8 %. Como resultado de esta presencia de sal en el subsuelo, se han encontrado valores altos para la densidad de sólidos (G_s) que van desde 2,5 hasta más de 3. En este caso, las probetas ensayadas presentan valores de G_s entre 2,92 y 3,53, [10].

La presencia de sal en el agua intersticial afecta las propiedades índices del subsuelo, tales como el contenido de agua (ω), el límite líquido (L_W), el límite plástico (L_P) y el índice de plasticidad (I_p), puesto que, al comparar las propiedades entre muestras obtenidas de zonas con alto contenido de sal y zonas con contenidos de sal más bajos, se halló que estas propiedades resultan menores en muestras que presentan contenidos de sal más altos, [11].

Respecto a los valores de los límites de consistencia obtenidos para las muestras, para establecer una relación entre estos y los módulos (E_{eq} y M_r), en las figuras 14 y 15, se muestran las curvas de I_p vs. E_{eq} , así como I_p vs M_r , correspondientes a los valores promedio de los esfuerzos desviadores aplicados para el esfuerzo efectivo de 90 kPa de las 4 probetas ensayadas. La tendencia de los resultados mostrados, tanto para E_{eq} como para M_r , indican que conforme aumenta el índice de plasticidad de las probetas ensayadas, los valores de E_{eq} y M_r disminuyen; es decir, la probeta con el índice de plasticidad más alto (SS-18 M 3-1) presentó los valores de E_{eq} y M_r más bajos, lo cual es consistente con lo reportado previamente e la literatura.

Como se expuso anteriormente, la salinidad característica de la zona tiene efectos en el L_W , L_P y, por lo tanto, en el I_p , de manera que es válido mencionar que la presencia de sal podría afectar el valor de los módulos.

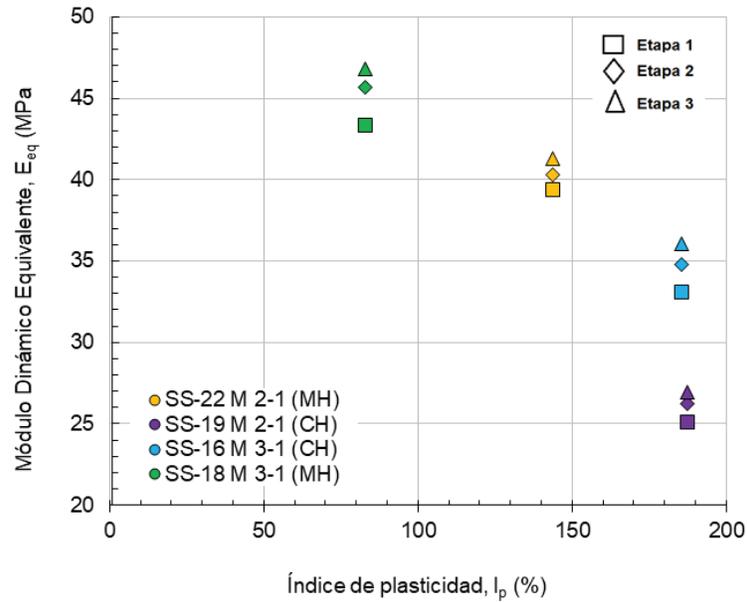


Figura 14. Curva I_p vs. E_{eq} correspondientes al esfuerzo efectivo de 90 kPa.

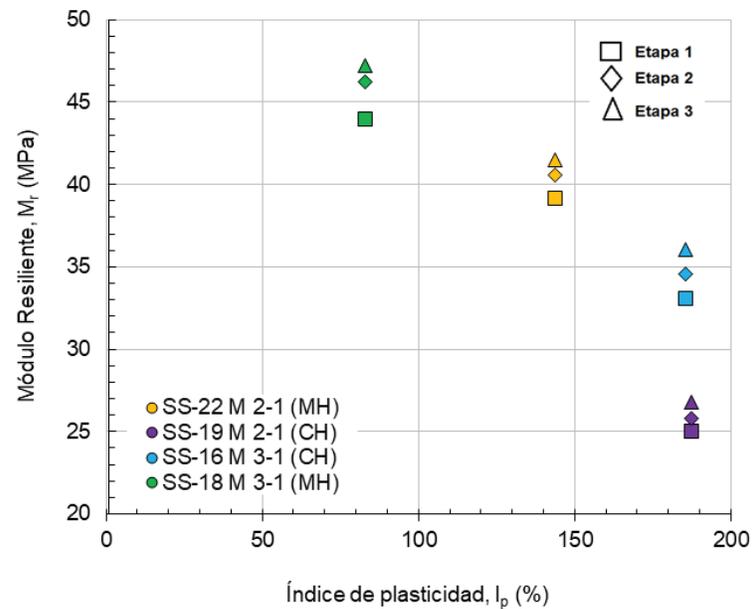


Figura 15. Curva I_p vs. M_r correspondientes al esfuerzo efectivo de 90 kPa.

Conclusiones

Las principales conclusiones que permitió reunir esta investigación se presentan a continuación:

Entre las cuatro muestras ensayadas, se obtuvieron magnitudes de módulos que oscilaron entre los 5 MPa y los 70 MPa. El amplio rango de valores se debe a variables como el esfuerzo de fluencia (σ'_p), los esfuerzos efectivos aplicados (σ'), el esfuerzo desviador utilizado (σ'_d), la deformación unitaria (ϵ), el índice de plasticidad (I_p) y la relación de vacíos (e).

El efecto de la consolidación secundaria en la rigidez dinámica de las arcillas del antiguo lago de Texcoco es tal que tanto el módulo dinámico equivalente de Young (E_{eq}) como el módulo de resiliencia (M_r) experimentan un incremento al comparar los valores obtenidos al término de la consolidación primaria con los obtenidos durante la consolidación secundaria.

Los valores de los módulos obtenidos durante la consolidación secundaria exceden hasta en un 18 % en el caso del módulo dinámico equivalente de Young (E_{eq}), y hasta en un 19 % a los valores obtenidos durante la consolidación primaria.

La disminución de la relación de vacíos ligada al cambio volumétrico ocurrido en cada proceso de consolidación para cada uno de los esfuerzos efectivos aplicados favorece la rigidez dinámica de las arcillas del antiguo lago de Texcoco. Esto genera la obtención de módulos mayores para la consolidación secundaria en comparación con los módulos obtenidos para la consolidación primaria.

Los valores de I_p de las muestras utilizadas se encuentran en un rango entre 82 % y 187 %. Las muestras de suelo con los índices de plasticidad más bajos fueron las que presentaron los módulos (E_{eq} y M_r) más altos.

Referencias

- [1] L. Solís. (2017). Propiedades y modelos dinámicos para las arcillas del ex lago Texcoco. Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, UNAM. Ciudad de México.
- [2] Instituto Mexicano del Transporte . (2014). Comportamiento dinámico de suelos no saturados y su aplicación a las vías terrestres. Sanfandila, Querétaro. Publicación Técnica No. 420.
- [3] Liu, J.-s., & Zhang, X.-d. Experimental Study on the Dynamic Characteristic of Soft Soil under Cyclic Loads, Journal of Highway and Transportation Research and Development, vol 8, No. 4. 2014.
- [4] H. Seed, & C. Chan. Clay Strength under earthquake loading conditions. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Divisions, American Society of Civil Engineers., Vol 92, pp. 53-78. 1966.
- [5] ASTM D 3999. (1991). Standard Test Methods for the Determination of the Modulus and Damping Properties of Soils Using the Cyclic Triaxial Apparatus, American Society of Testing Materials, ASTM.
- [6] Instituto Mexicano del Transporte . (2001). Módulos de resiliencia en suelos finos y materiales granulares. Sanfandila, Querétaro: Instituto Mexicano del Transporte (ITM). Publicación Técnica No. 142. Retrieved mayo 20, 2019
- [7] AASTHO T 307. (2002). Standard Method of Test for Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials. American Association of State Highway and Transportation Officials, AASTHO.
- [8] P. Gárnica, N. Pérez, & D. Lavariega. (2002). Mecánica de materiales para pavimentos. Sanfandila, Querétaro: Instituto Mexicano del Transporte (IMT). Publicación Técnica No. 197.
- [9] T. Romero. (2018). Evaluación comparativa del módulo dinámico y resiliente en las arcillas del exlago de Texcoco. Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, UNAM. Ciudad de México.
- [10] J. García. (2019). Influencia de la consolidación secundaria en la rigidez dinámica de un suelo compresible (arcillas). Tesis de Licenciatura. Ciudad de México, México.
- [11] L. Vega. (2003). Análisis y modelación de algunas propiedades dinámicas de las arcillas del ex lago de Texcoco. Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, UNAM. Ciudad de México.