

Modificación de la curva de compresibilidad de un suelo arcilloso blando por medio de nano-sílice

Ramírez Calderón Omar Gabriel, Almanza Hernández Fernando, Jiménez Argüelles Víctor

Universidad Autónoma Metropolitana, Departamento de Materiales. Av. San Pablo No. 180, Azcapotzalco, Ciudad de México. C.P. 02200. México.

* Autor para correspondencia: ogrc@uam.azc.mx

Recibido:

03/agosto/2019

Aceptado:

04/noviembre/2019

Palabras clave:

Consolidación, arcilla,
nano-sílice

Keywords:

Consolidation, clay,
nano-silica

RESUMEN

En este trabajo se muestra la modificación de una curva de compresibilidad, la cual es de suma importancia para el cálculo de asentamientos de estructuras desplantadas en suelos blandos, realizada en un suelo arcilloso del Valle de México, mediante la adición de nano-sílice en diferentes porcentajes. El método llevado a cabo fue mediante el ensayo de consolidación unidimensional en una muestra natural y en otras dos mejoradas con nanosustancia, así como el empleo del microscopio electrónico de barrido (MEB) con el objeto de poder observar el reacondicionamiento interno de las partículas de arcilla y el efecto que provoca la nanosustancia en los espacios vacíos del suelo, lo cual mostró un suelo menos permeable y por lo tanto menos compresible.

ABSTRACT

This work shows the modification of a compressibility curve, which is of utmost importance for the calculation of settlements of displaced structures in soft soils, carried out in a clay soil of the Valley of Mexico, by adding nano-silica in different percentages. The method carried out was through the one-dimensional consolidation test in a natural sample and in two others improved with nanosustance, as well as the use of scanning electron microscope (SEM) in order to observe the internal rearrangement of clay particles and the effect caused by nanosustance in the empty spaces of the soil, which showed a less permeable and therefore less compressible soil.

Introducción

El suelo experimenta una deformación bajo la acción de un esfuerzo. Cuando un estrato de suelo saturado y compresible se somete a un cambio en el estado de esfuerzos, la presión de poro aumenta en forma instantánea. En suelos permeables, la disipación de la presión de poro puede ser inmediata; en cambio, en suelos poco permeables la disipación puede tomar un tiempo considerable (figura 1).



Figura 1. Antigua Basílica de Guadalupe sujeta al fenómeno de deformación en suelos blandos.

La consolidación es un proceso de cambio de esfuerzos efectivos producido por la disipación de la presión de poro, lo que induce una reducción de su volumen, en función del tiempo, debido a la expulsión de agua de los poros del suelo. La consolidación la ocasiona un aumento de esfuerzos en la masa de suelo. La velocidad de deformación la controla la permeabilidad (figura 2).



Figura 2. Proceso de consolidación en el Palacio de Bellas Artes. (GOB.MX).

La compresibilidad es la propiedad de un suelo de reducir su volumen cuando se le somete a un incremento

de esfuerzos. Se expresa como la relación entre el cambio de volumen o el cambio en la relación de vacíos y la magnitud del incremento de esfuerzo aplicado (Díaz, 2014).

Este tipo de relación entre el cambio de volumen, que comúnmente se expresa como la relación de vacíos (e) y el incremento del esfuerzo aplicado, da origen a las curvas de compresibilidad (figura 3).

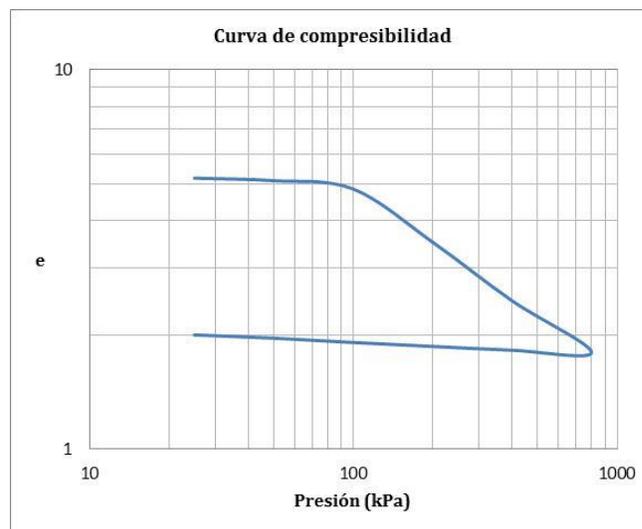


Figura 3. Curva de compresibilidad de un suelo típico de la Ciudad de México.

El objetivo de este trabajo es estudiar la modificación que puede generarse en una curva de compresibilidad, en un suelo arcilloso saturado compresible de baja permeabilidad, como resultado de hacer una serie de mezclas con nano-sílice en diferentes porcentajes con respecto al peso seco del suelo, con la finalidad de mejorar sus propiedades mecánicas e hidráulicas y obtener un mejor comportamiento ante la sollicitación de cargas.

Debido a que el suelo de la Ciudad de México (CDMX) está compuesto principalmente por arcilla del tipo de montmorillonita, la cual se forma de la intemperización de las cenizas volcánicas (figura 4), es de suma importancia el estudio de éste mineral presente en éste tipo de arcillas, con la ayuda del microscopio electrónico de barrido (MEB) se tomaron las imágenes respectivas de la muestra en estado natural, así como de las muestra con porcentajes de nano-sílice para poder observar el cambio en su estructura de éste mineral a nivel microscópico.

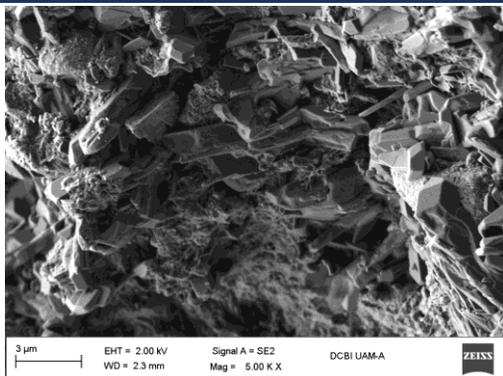


Figura 4. Minerales presentes en un suelo arcilloso de la CDMX. (Almanza, 2018).

Anterior a este trabajo, se han realizado varios estudios sobre el mejoramiento de suelos arcillosos blandos utilizando diferentes materiales, tales como materiales reciclados, fibras naturales, y materiales químicos. Pham y Nguyen (2013) llevaron a cabo una serie de pruebas en suelos arcillosos mediante la adición de nano-sílice, y se encontró que la adición de esta sustancia conduce a una reducción en el índice de expansión de la arcilla. En un estudio realizado por Mohammadi y Niazian (2014), la adición de nano-arcilla aumenta los límites líquido y plástico del suelo y también aumenta los parámetros de resistencia cortante de los especímenes tratados.

Comprender el comportamiento de los suelos arcillosos de alta compresibilidad de la CDMX mediante las curvas de compresibilidad respectivas, es posible mediante un programa experimental, el cual permita estimar un predecible reacomodo de las partículas de ese suelo mediante el empleo de nano-sílice como agente de mejora en las propiedades ingenieriles del mismo (Ramírez, 2017).

Metodología

Obtención de la muestra

El suelo blando compresible utilizado, se extrajo de un tubo Shelby (figura 5)



Figura 5. Tubo Shelby de donde se extrajo la muestra a ensayar.

El cual provenía del Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (NAICM) en la zona de Texcoco, y se tomó a una profundidad de 10m aproximadamente.

El nivel de aguas freáticas (NAF) de esta muestra de suelo se localizaba a 1.5 m de profundidad.

Preparación de la muestra

Una vez que se extrae la muestra del tubo Shelby con el extractor respectivo (figura 6A), se procede a remoldear el material para confinarlo dentro de un anillo metálico (figura 6B) para ensayarlo en el aparato de consolidación.

Este primer ensayo se lleva a cabo en la muestra natural con 0% de sustancia, esto con el fin de que nos sirva como testigo con respecto a las otras dos muestras preparadas con 5% y 9% de nano-sílice con respecto al peso seco de la muestra de suelo.



Figura 6. A. Extracción de la muestra del tubo Shelby, B. Labrado de la muestra dentro del anillo para el ensayo de consolidación unidimensional.

Para preparar las dos siguientes muestras con nano-sílice, una con 5% y la otra con 9 %, se procedió a remoldearlas en un recipiente de plástico liso y una batidora con extensión tipo globo, por alrededor de 10 min; esto con el fin de lograr una mezcla adecuada entre la sustancia y la muestra de suelo, además se le iba añadiendo pequeñas porciones de agua conforme la mezcla lo iba pidiendo, teniendo cuidado que su consistencia no llegara a ser muy acuosa.

Las mezclas se llevaron a trabajar en el laboratorio de geotecnia, adscrito al departamento de materiales, de UAM Azcapotzalco, utilizando el equipo de seguridad adecuado, el el cual consistió en guantes de nitrilo, gafas de protección, cubrebocas y overol con resorte en pies y manos (figura 7).



Figura 7. Equipo de seguridad utilizado para elaborar las mezclas con nano-silíce.

Ensayo de consolidación

Una vez que se tiene la muestra de suelo confinada en el anillo de labrado, tanto la natural como las dos probetas con nano sustancia, se colocan en una cápsula de lutita junto con sus dos juegos de piedras porosas, esto con el fin de permitir el drenaje del agua contenido en la muestra de suelo, por ambas caras de la probeta (figura 8), y posteriormente llevarla al marco de carga (figura 9) para realizar el ensayo respectivo de consolidación unidimensional bajo la norma ASTM D 2435-96.

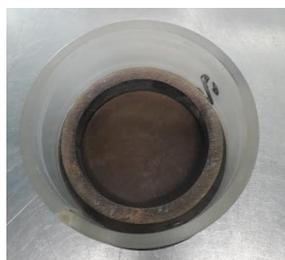


Figura 8. Cápsula de lutita, anillo de confinamiento y piedras porosas para alojar la muestra de suelo.



Figura 9. Marco de carga para el ensayo de consolidación unidimensional.

La prueba de consolidación consiste en aplicarle a la muestra de suelo incrementos de carga durante 24 hrs, (figura 10), la cual se encuentra confinada dentro de un anillo de bronce, esto con el fin de medir única y exclusivamente la deformación sólo en el sentido vertical ya que la horizontal está restringida debido al anillo donde se aloja la muestra de suelo (Budhu, 2015).



Figura 10. Portapesas donde se colocan los incrementos de carga aplicados a la muestra a ensayar.

Para concluir con el ensayo, se descarga la muestra de suelo de las cargas aplicadas de manera gradual, para posteriormente obtener el peso seco del mismo y así poder obtener tanto las curvas de consolidación (deformación vs tiempo) una por cada incremento de carga, así como la curva de compresibilidad (relación de vacíos vs presión) objeto de éste estudio.

En la siguiente figura se observa la muestra de suelo al final del ensayo de consolidación (figura 11).



Figura 11. Muestra secada en horno al final de la prueba.

Microscopio electrónico de barrido (MEB)

Después de que se obtiene el peso seco de la muestra al final del ensayo, se aparta una pequeña porción de suelo para prepararla y poder realizar el análisis de microscopía electrónica de barrido por medio del dispositivo en cuestión (figura 12), perteneciente al Departamento de Materiales de la UAM-Azcapotzalco.



Figura 12. Microscopio electrónico de Barrido (MEB). UAM-Azcapotzalco.

Resultados y discusión

Clasificación del suelo

De acuerdo al sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS), la muestra de suelo ensayada se clasifica como una arcilla de alta plasticidad CH (figura 13), con las siguientes propiedades índice: límite líquido (Ll) = 230 %, límite plástico (Lp) = 73 %, índice de plasticidad = 157 %, contenido de agua natural $w = 210 %$, y peso específico de la muestra $\gamma_m = 13.24 \text{ kN/m}^3$.

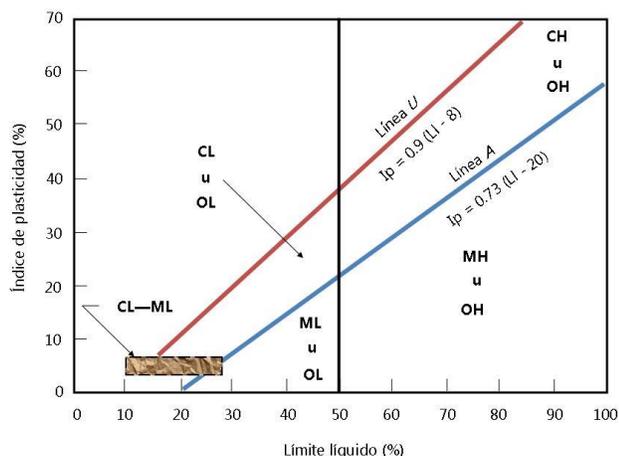


Figura 13. Carta de plasticidad. (Bowles, 1996)

Tabla 1. Propiedades índice del suelo en estudio.

Suelo	Ll (%)	Lp (%)	Ip (%)	w (%)	$\gamma_m \text{ (kN/m}^3\text{)}$
I	230	73	157	210	13.24

Curvas de compresibilidad

De los resultados del ensayo de consolidación se obtuvieron las tres gráficas siguientes de compresibilidad (relación de vacíos vs presión), una para la muestra natural y las otras dos para el 5% y 9% respectivamente de nano-sílice, las siguientes gráficas se muestran en escala natural (figura 14).

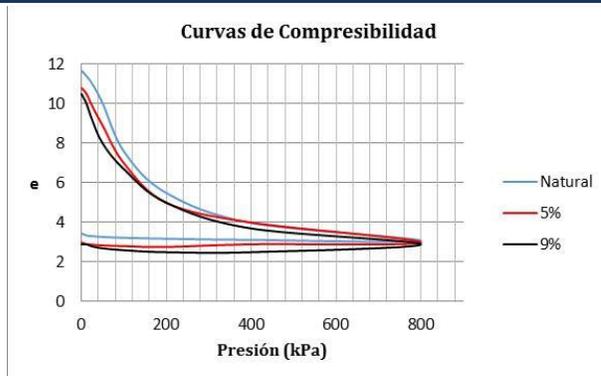


Figura 14. Comparativa de las curvas de compresibilidad en escala natural.

De las gráficas anteriores se puede observar una leve disminución en la relación de vacíos de la muestra con 5% de nano-sílice con respecto a la natural y al añadirle el 9% de sustancia no hay una disminución considerable.

Las gráficas en escala semilogarítmica se presentan a continuación (figura 15).

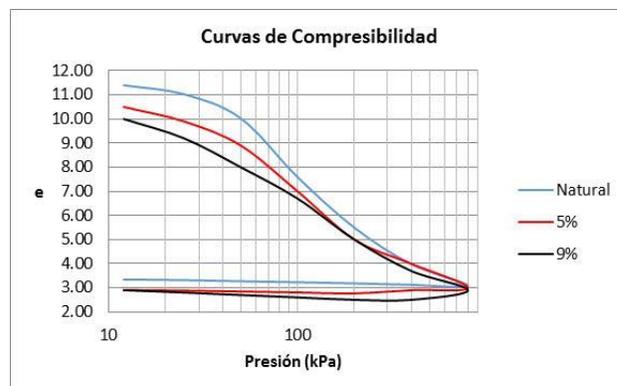


Figura 15. Comparativa de las curvas de compresibilidad en escala semilogarítmica.

El objetivo de presentar las gráficas en escala semilogarítmica es el de poder apreciar el tramo vírgen de las curvas, el cual se presenta cuando se tiene un comportamiento aproximadamente lineal, así como de poder determinar la carga de preconsolidación y en el caso de las curvas presentadas se muestra como disminuye conforme se añade el nano-sílice.

Fotografías con el MEB

En las siguientes fotografías tomadas con el MEB (figuras 16, 17 y 18), se presenta la estructura interna del suelo arcilloso de alta compresibilidad, donde se aprecia la presencia de diatomeas, las cuales son restos de algas fosilizadas presentes en la zona del Lago de Texcoco, las cuales influyen de manera directa en el comportamiento mecánico e hidráulico de este tipo de suelos.

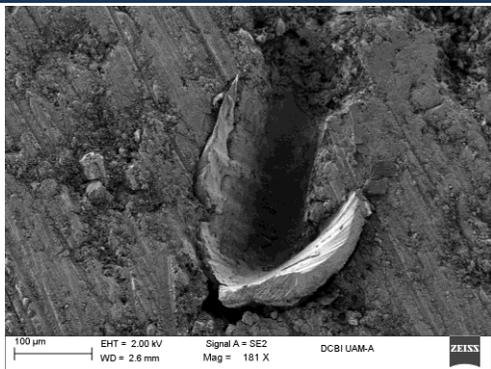


Figura 16. Arcilla natural sin nano-silíce.

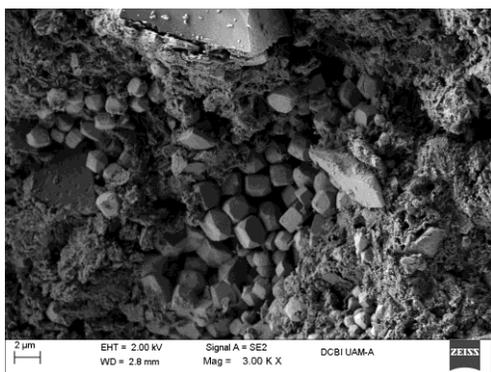


Figura 17. Arcilla con 5 % de nano-silíce.

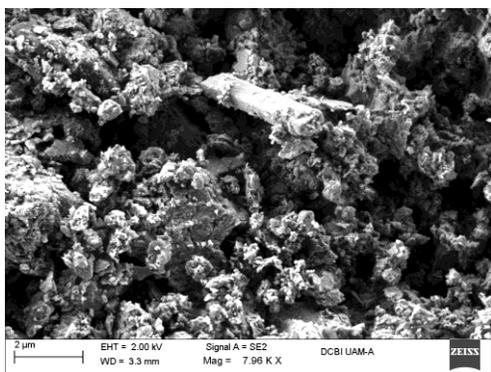


Figura 18. Arcilla con 9 % de nano-silíce.

Conclusiones

Se obtuvieron un conjunto de curvas de compresibilidad mediante ensayos de consolidación unidimensional, las cuales se realizaron en la muestra natural como testigo y en dos más, una con 5% de nano-silíce y otra con 9%, de donde se pueden resaltar los siguientes puntos:

-De las curvas en escala natural se puede obtener un parámetro llamado coeficiente de compresibilidad, el cual es la pendiente de la curva entre un par de presiones determinadas, en las curvas se puede apreciar que a medida que se aumenta la cantidad de nanosustancia, este parámetro disminuye de manera gradual.

-De las curvas en escala semi-logarítmica se determina tanto el índice de compresibilidad como la carga de preconsolidación, estos parámetros empiezan a disminuir con el 5% pero con el 9% no hay un cambio significativo.

-En las fotografías tomadas con el MEB se aprecia la formación de un gel viscoso o empaquetamiento de ciertas estructuras de la arcilla, las cuales podrían ser la causa de la pequeña disminución en la relación de vacíos y por lo tanto una disminución en cuanto a su permeabilidad.

Sería recomendable seguir con este tipo de trabajos para entender más el comportamiento ingenieril de las arcillas del Valle de México y probar con otras nanosustancias, por ejemplo, nano-alúmina, y ensayar otro tipo de suelos con diferentes contenidos de humedad y propiedades índices, además de ampliar en la medida de lo posible los porcentajes de la nanosustancia.

Agradecimientos

Este estudio se llevó a cabo en el Laboratorio de Geotecnia perteneciente al Departamento de Materiales adscrito a la División de Ciencias Básicas e Ingeniería de la UAM Azcapotzalco. Un agradecimiento especial al Ingeniero Fernando Almanza Hernández por la obtención de las fotografías en el MEB, también agradecer a la empresa BASF de México por habernos proporcionado la nano-sustancia.

Referencias

- Almanza F. (2018). Caracterización física, química y microscópica de un suelo conformado por diatomeas fósiles en la Ciudad de México. *Revista Tendencias en Docencia e Investigación en Química* 2018, 4:27-35.
- ASTM D-2435 (1996). Test Method for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils.
- Bowles J.E. (1996). *Foundation Analysis and Design*. 5th Ed. McGraw Hill, p.33
- Budhu M. (2015). *Soil Mechanics Fundamentals*. 1st. Ed. Wiley Blackwell, p.200-205.
- Díaz R.A. (2014). *Mecánica de Suelos. Naturaleza y propiedades*. 1ª Ed. Trillas, p.167-170.
- Mohammadi M., Niazian M. (2014). Investigation of nano-clay effect on geotechnical properties of Rasht clay. *Journal of Advanced Science and Technology*, 37-46.
- Pham H., Nguyen Q. (2013). Effect of silica nanoparticles on clay swelling and aqueous stability of nanoparticle dispersions. *Journal of Nanoparticle Research*, 16(1):2137.
- Ramírez O. (2017). *Modificación de la resistencia de una arcilla plástica con nano-silíce*. Tesis de Maestría, UNAM, México.