

Estabilización físico-química de suelos arcillosos con aditivos elaborados con precursores nano-métricos (Parte I: Evaluación mecánica)

Carlos Chávez Negrete, José Carlos Rubio Avalos, Jorge Alarcón Ibarra y Eleazar Arreygue Rocha
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México.

Erick O. Cervantes Gutiérrez

Alumno de la Maestría en Infraestructura del Transporte en la Rama de Las Vías Terrestres



ABSTRACT

Index and mechanical tests were made in order to characterize high plasticity clay from veterinary faculty into UMSNH. This clay is known by its high expansive potential and has caused problems to the buildings. Four stabilization additives were made with nano-metric precursors and its effectiveness was probed with the clay before mentioned. These additives generate a cation interchange forming nano-metric gels using the clay composition. A campaign of index and mechanical test were carried out in order to verify how the additives work in compacted clay compacted to its maximum dry specific weigh, obtained in a Proctor standard Test. The mechanical tests carried out were: unconfined compression, triaxial compression, consolidation and expansion pressure tests. The parameters discussed were: consistency limits, maximum dry specific weighs, the shear resistance, expansion pressure and the permeability of the modified soils. The results show that a little gain in resistance, although the clay presented a more frictional behavior. The pressure of expansion was eliminated by most of the additives. The compressibility was increased, but the pre-consolidation pressure was increased. In all cases were presented an increase in the permeability due to the low compaction of the clay. The best additive was the number one.

RESUMEN

Se realizaron pruebas índice y mecánicas para caracterizar una arcilla de alta plasticidad localizada en las instalaciones de la Facultad de Veterinaria de la UMSNH. Esta arcilla es conocida por su potencial expansivo y ha causado muchos problemas en las estructuras de esta facultad. Se elaboraron cuatro estabilizantes de suelos a base de precursores Nano-métricos y se decidió probar su efectividad modificando la arcilla ya mencionada. Estos estabilizantes generan un intercambio iónico entre la arcilla y el aditivo estimulando la formación de geles nanoestructurados usando como materia prima la composición química de la arcilla. Para ello se realizó una campaña de ensayos índice y mecánicos con el fin de verificar como los estabilizantes modificaban las propiedades de la arcilla compactados a un peso específico máximo obtenido con la prueba AASHTO estándar. Dentro de las pruebas mecánicas se realizaron ensayos de compresión simple, triaxiales, de consolidación y de presión de expansión. Los parámetros analizados fueron: límites de consistencia, pesos específicos máximos, la resistencia, la presión de expansión y la permeabilidad. Los resultados muestran que hubo poca ganancia en resistencia, aunque se hizo más friccionante el material. En cuanto a los resultados de presión de expansión se observó que tres de los estabilizantes contrarrestaron la presión de expansión que se presentó, que fue de 25 ton/m². En cuanto al índice de compresibilidad, Cc, no se tuvo ninguna mejoría, por el contrario se aumentaron considerablemente, pero la carga de pre-consolidación se incrementó en algunos casos hasta cinco veces. En todos los casos se presentó un aumento de la permeabilidad, al parecer los estabilizantes dificultan la compactación provocando que los pesos específicos secos máximos disminuyan. El estabilizante que tuvo mejor resultado fue el estabilizante 1, que redujo el índice plástico a cero, a pesar del bajo peso específico del suelo que se generó después de la compactación.

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Estabilidad de suelos

La estabilización de suelos es en la actualidad una de las grandes líneas de la geotecnia, en donde se debe llevar a cabo más investigación. El día de hoy existen muchos productos que se ofrecen en el mercado, cada uno con ventajas y desventajas, sin embargo, se debe tener un programa experimental que sustente la aplicación del estabilizante. Es decir, los productos no son mágicos y te

resuelven los problemas en todos los suelos, por lo que se recomienda ampliamente la implementación de un programa experimental que verifique la modificación de las propiedades mecánicas del suelo en las condiciones de trabajo.

Por otro lado, surgen nuevos productos propuestos como estabilizantes de suelos, en los que se pretende aplicar algún avance tecnológico de otra área a la estabilización de suelos. Es el caso de la aplicación de la nanotecnología y los nano- materiales cuyo objetivo es realizar algo grande para la industria de la construcción

con materiales realmente muy pequeños, Ozin (2009) (del orden de billonésimas partes de metro) lo que permite cambiar las propiedades y el comportamiento de los materiales y su masa material, ingresando a un nuevo nivel de desarrollo, partiendo del nuevo principio de síntesis y análisis de materiales "Bottom-up approach" ó nano-química en lugar del tradicional "Top-down" (análisis externo), utilizando la nano-química, se busca diseñar nano materiales que permitan utilizar a las arcillas naturales presentes en los suelos como parte del sistema estabilizante al incorporar iones metálicos capaces de formar redes tridimensionales de aluminosilicatos insolubles e inertes en presencia de agua y que generen una acción cementante en las masas arcillosas. En todo caso, hay que probar la efectividad de los aditivos desarrollados en esta fase preliminar, para lograr un desarrollo eficiente del producto final en diferentes condiciones y composiciones químicas de suelos.

Dentro de las principales propiedades mecánicas que interesaría cambiar son: estabilidad volumétrica, compresibilidad, resistencia mecánica, permeabilidad y durabilidad (Fernández 1982). Las de mayor utilidad, las tres primeras, y la durabilidad de estas podrían ser las más significativas. Aunque la mayoría de las veces se piensa en estabilizar suelos expansivos.

En este artículo se presentan los resultados experimentales de la estabilización físico-química, de una arcilla de la Posta Veterinaria, en Tarímbaro Mich. Esta arcilla ha generado problemas en la cimentación de los edificios que en esta zona se encuentran. Las pruebas realizadas son el inicio del programa experimental que se está llevando a cabo en la Facultad de Ingeniería Civil de la UMSNH, con el desarrollo de estos nuevos estabilizantes nanométricos.

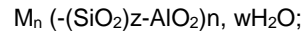
1.2 Nano Tecnología

La nanotecnología es la tecnología de la billonésima parte de metro ó del nanómetro. A estos niveles es posible visualizar la estructura atómica de la materia, sus átomos, redes atómicas, moléculas, etc. El comportamiento de los materiales que actualmente conocemos a estos niveles se modifica y lo conocido al momento, no aplica. En todas las industrias (médica, electrónica, química, física, etc.) se están generando cambios e innovaciones de manera sistemática con el uso y explotación de esta nueva ciencia. Por su elevado costo y la tecnología involucrada en los procesos de síntesis y análisis de materiales la industria de la construcción se ha visto marginada y sobre todo en los países en vías de desarrollo. Sin embargo, si se aplica la nano química correcta (bottom-up approach) es posible generar nuevos desarrollos para la industria de la construcción, utilizando herramientas tecnológicas como HRTEM (Microscopía electrónica de transmisión de alta resolución) SEM (microscopía electrónica de barrido) etc. que permiten correlacionar el comportamiento macro-estructural (físico y mecánico) con su nano y micro estructura y de esta forma obtener resultados más integrales para la Ingeniería civil.

2 DESCRIPCIÓN DE LOS ADITIVOS

2.1 Principio de trabajo de los aditivos

Los aditivos nanométricos que se están desarrollando en esta fase inicial ó fase cero, se elaboran utilizando la nano química y el principio "Bottom-Up approach", el cual busca utilizar a las arcillas de los suelos como materia prima y una solución de partículas nanométricas los cuales bajo un proceso de policondensación forman geles nanométricos insolubles bajo las siguientes reacciones químicas "verdes" y generales:



En donde z es 1, 2, ó 3, y M son cationes tales como Ba^{2+} , NH_4^+ , H_3O^+ , Cs^+ , K^+ , Na^+ , Ca^{2+} y estos deben de estar presentes en las cavidades de la red para balancear las cargas negativas del Al^{3+} en estado de coordinación de cuatro y "n" es el grado de policondensación.

Dichas reacciones químicas pueden contener más de un catión metálico en solución y la presencia de AlO_2 y SiO_4 se suministra a partir de la nanoestructura de las arcillas de los suelos. Como resultado se forma un gel nano cristalino tridimensional, en forma de anillos y/o cadenas que generan un efecto adhesivo ó cementante en la masa del suelo expansivo obteniendo un sistema inerte y ecológico, como se aprecia en la Figura 1. Ésta micro fotografía obtenida por microscopía electrónica de barrido muestra algunos micro cristales ó "clusters de gel" obtenidos por la reacción, adicionalmente se observa el gel formado saliendo desde la arcillas hacia el micro cristal generando un efecto de envolvente o adhesivo en la masa del suelo.

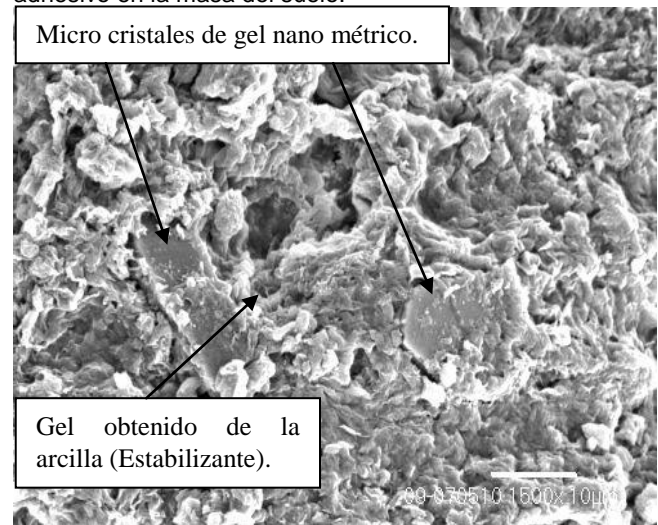


Figura 1. Análisis microestructural por SEM del suelo estabilizado utilizando nano -estabilizantes.

2.2 Dosificación de los aditivos

Una de las principales pruebas que se realizó dentro de esta investigación, es la medición del pH en la mezcla suelo-estabilizante. Para que estos resultados no

presentaran alteraciones debido a que el agua de uso común contiene un pH menor de 7, se decidió emplear agua desionizada (destilada) ya que esta siempre mantiene un pH de 7, el cual es neutro. De esta manera las lecturas del pHmetro utilizado no se vieron alteradas.

Siguiendo el procedimiento de la norma ASTM D6276 se realizaron las pruebas para determinar la proporción del suelo – estabilizante.

Estas pruebas se hicieron con cada uno de los estabilizantes para así determinar la proporción ideal de cada uno, a continuación se presenta la tabla donde se muestran las lecturas de pH de la mezcla estabilizante – suelo – agua para cada uno de los porcentajes mencionados en la norma y son señaladas las lecturas del pH usadas en las pruebas.

Tabla 1. PH obtenido con distintos porcentajes de estabilizantes para la dosificación de acuerdo a la norma ASTM D6276.

% DE ESTABILIZANTE	2	3	4	5	6
PH con Estabilizante 1	11.4	12	12	12.3	12.4
PH con Estabilizante 2	11.8	12.4	12.6	12.8	12.8
PH con Estabilizante 3	10.9	12.4	12.8	12.9	13.2
PH con Estabilizante 4	9.1	9.9	10.6	11	11.7

De los resultados obtenidos, se determinaron los porcentajes que dieron el pH de 12.4 o el más cercano. De esta manera, de la Tabla 1 se definió la proporción de estabilizante que se tomará para realizar las mezclas.

Con el estabilizante 1 se aplicó un 6% del peso total de la muestra de suelo. Con el estabilizante 2 y 3 se aplicó un 3%.

Para el estabilizante 4 se observó que ninguno de los porcentajes llega al 12.4 de pH, por lo que se tomó el porcentaje de pH más cercano a él, siendo este del 6% con un pH de 11.7. En la Tabla 2 se presentan los resultados finales.

Tabla 2. Porcentaje de estabilizante utilizado para las muestras

	pH	% del estabilizante
Estabilizante 1	12.4	6%
Estabilizante 2	12.4	3%
Estabilizante 3	12.4	3%
Estabilizante 4	11.7	6%

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 Descripción del material utilizado.

El material seleccionado para las pruebas fue extraído de las instalaciones de la Unidad Posta Veterinaria de la

UMSNH, ubicada en el municipio de Tarímbaro Michoacán.

En la Tabla siguiente, se muestra la información de la exploración, además de algunas características del material en estado natural.

Tabla 3. Características del material utilizado.

UBICACIÓN:	Unidad Posta Veterinaria
ESTRATIGRAFÍA:	10 cm. Capa vegetal (despalme) 10 cm - 1.80 m. Estrato de arcilla negra
MINERAL INFERIDO	Montmorillonita
% Contenido de humedad natural	27.55
Límite Líquido (%)	89.2
Límite Plástico (%)	32.9
CLASIFICACIÓN	CH (Arcilla de alta plasticidad)

3.2 Pruebas índice

Se le adicionó el porcentaje de estabilizante mencionado al suelo y se procedió a realizar las pruebas de límite líquido, límite plástico (norma SCT M.MMP-1-07/07) y la prueba de compactación AASHTO estándar (norma SCT M-MMP-1-09/06). Los resultados de los límites se muestran en la carta de plasticidad de la Figura 2. El material sin estabilizante es el que tiene una plasticidad más alta. En general se observa que todos los estabilizantes bajaron los límites de consistencia, en particular se observa que el estabilizante 3 es el que menos efecto tuvo y con el estabilizante 1 se obtuvo un límite plástico inapreciable, por lo que se colocó con un índice de plasticidad nulo. Con el estabilizante 2 se logró bajar los límites hasta obtener una clasificación de ML y el estabilizante 4 sólo hasta MH. Debido a estos cambios presentados en los límites de consistencia, se infiere que cada estabilizante actuará de manera distinta, sobre las propiedades mecánicas e hidráulicas del suelo.

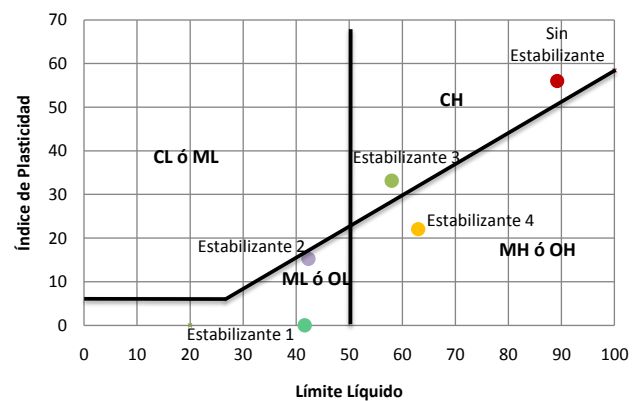


Figura 2. Resultados de la modificación de la clasificación del suelo en base a los límites obtenidos.

Otra prueba básica fue la de compactación AASHTO estándar, se realizó en base a la norma SCT M-MMP-1-09/06. El estabilizante modificó el comportamiento del suelo (ver Fig. 3), en general disminuyó el peso específico seco máximo del material y aumentó el contenido de humedad. Es decir el estabilizante bajó la efectividad de la compactación y no se pudieron alcanzar pesos específicos tan altos como los del material original. Parte del material cementó formando un gel y no permitió que se compactara con efectividad.

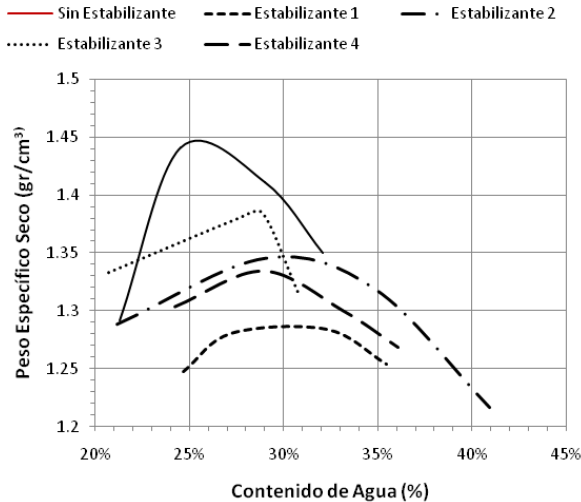


Figura 3. Resultados de pruebas de compactación AASHTO realizadas con distintos estabilizantes.

3.3 Pruebas Mecánicas y su análisis.

Todas las pruebas mecánicas se realizaron en especímenes compactados al 100% de su peso volumétrico seco suelto y con las humedades óptimas obtenidas en la pruebas AASHTO estándar antes mencionadas.

Las pruebas mecánicas básicas que se realizaron fueron: resistencia a la compresión simple, pruebas de compresión triaxial, pruebas de presión de expansión y pruebas de consolidación unidimensional. De las pruebas anteriores se determinó la forma en que se modifican las propiedades de resistencia, expansión, compresibilidad y permeabilidad, para determinar el efecto del estabilizante.

Los primeros resultados fueron los de la compresión simple (ver Fig. 4). La línea continua es la del suelo sin estabilizante. Claramente se observa que existen tres estabilizantes que no tienen mejora en la resistencia a la compresión simple (estabilizante 2, 3 y 4), se puede esperar que si se mejora el grado de compactación podría mejorar la resistencia del suelo. El estabilizante 1 le da más cohesión y rigidez al material aunque tiene falla frágil, a pesar de que se tiene el menor peso específico seco de todas las muestras.

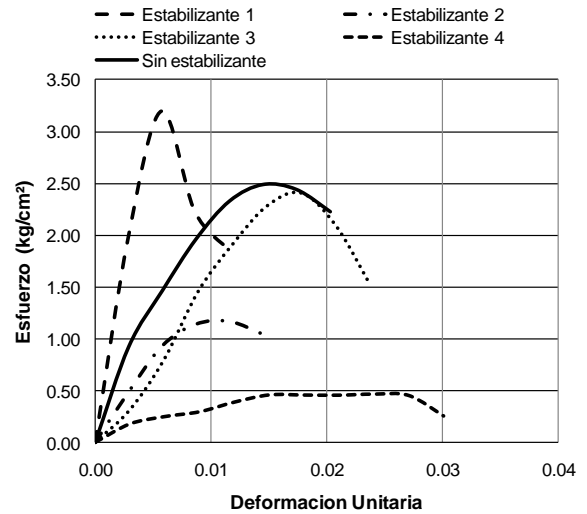


Figura 4. Resultados de Pruebas de compresión simple, en probetas de con aditivo.

Los siguientes resultados corresponden a las pruebas triaxiales no-consolidadas, no-drenadas (ver Figs. 5-7). Prácticamente se sigue manteniendo el mismo patrón de comportamiento, las muestras modificadas con el estabilizante 1, siguen presentando mayor rigidez y mayor resistencia para las distintas pruebas triaxiales.

Por otro lado, en la Tabla 4, se observa una significativa variación en los parámetros de la cohesión y fricción obtenidos de los datos antes mencionados. El estabilizante que tiene mejor efecto es el 3, ya que disminuye la cohesión casi a cero y el ángulo de fricción se incrementa más del doble, es decir, tiene el comportamiento similar a un material granular. Aunque las resistencias no se incrementen mucho, debido a la baja densidad. En general todos los aditivos mejoran los parámetros de resistencia al corte, a excepción del 2.

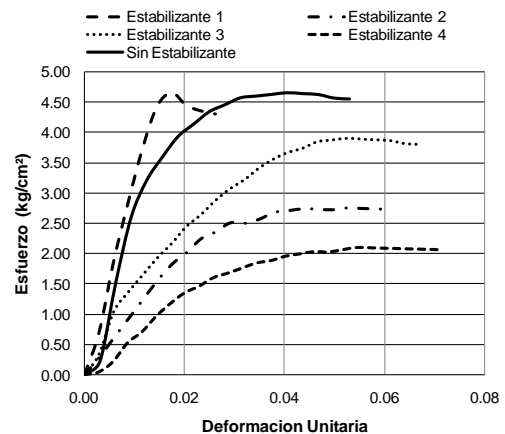


Figura 5. Gráfica Esfuerzo – Deformación. Prueba Triaxial $\sigma_3 = 0.3 \text{ kg/cm}^2$.

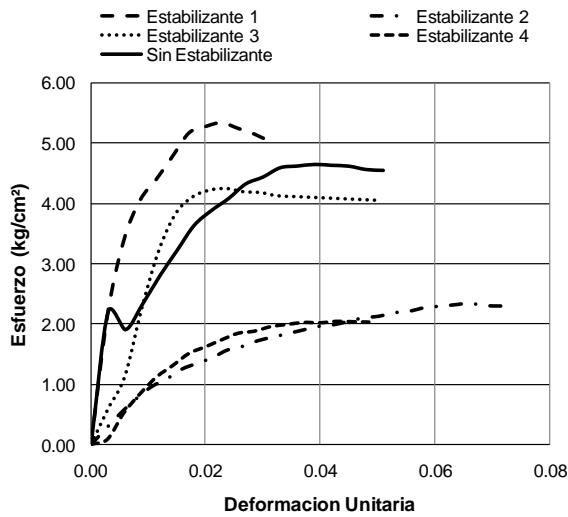


Figura 6. Gráfica Esfuerzo - Deformación. Prueba Triaxial $\sigma_3 = 0.6 \text{ Kg/cm}^2$

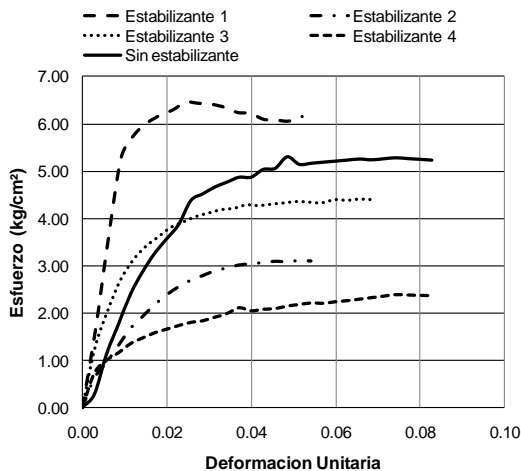


Figura 7. Gráfica Esfuerzo - Deformación. Prueba Triaxial $\sigma_3 = 0.9 \text{ Kg/cm}^2$

Tabla 4. Resultado de pruebas triaxiales

	w(%)	c (kg/cm ²)	ϕ (°)
Sin Estabilizante	23.15	1.39	21.7
Estabilizante 1	31.6	0.84	37.1
Estabilizante 2	28.21	0.70	20.9
Estabilizante 3	29.18	0.02	47.4
Estabilizante 4	32.85	0.02	35.8

Los resultados de las pruebas de presión de expansión fueron los más satisfactorios (ver Fig. 8), a excepción del estabilizante 4, todos los estabilizantes disminuyeron a cero las presión de expansión en la arcilla. La disminución de la presión de expansión del estabilizante 4 fue alrededor de 25%. Parte del efecto de la disminución de la presión de expansión, es debida al bajo peso específico que producen los estabilizantes después de aplicar la energía Proctor estándar. Por otro lado el efecto del estabilizante envolviendo los minerales de arcilla y evitando que el agua fuera absorbida y retenida.

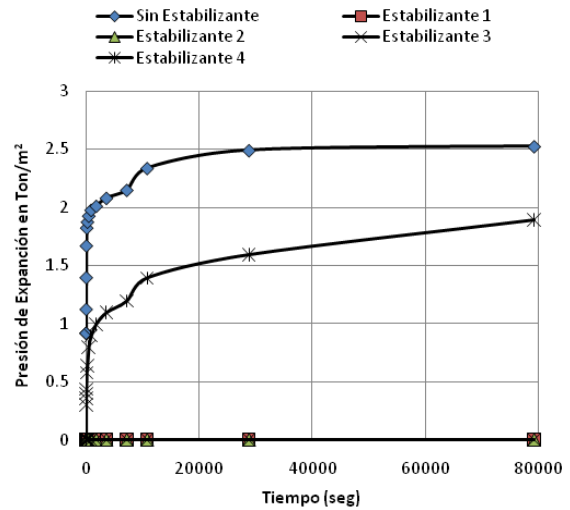
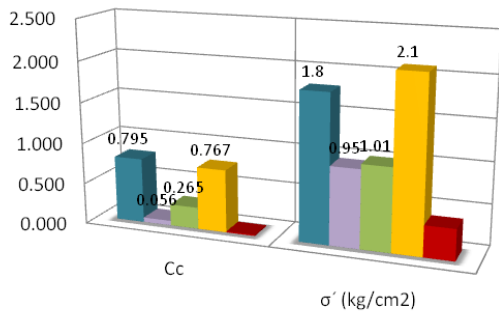


Figura 8. Presión de Expansión.

Los resultados de las pruebas de consolidación arrojaron tres parámetros importantes. Las carga de pre-consolidación, el índice de compresibilidad y la permeabilidad promedio. En la Figura 9, se presentan los dos primeros parámetros. Para la misma energía de compactación se observaron distintas cargas de pre-consolidación, la más baja corresponde al material sin estabilizante. Se incrementa para el estabilizante 2, 3, 1 y 4, de menor a mayor respectivamente. El efecto anterior no corresponde con los distintos pesos volumétricos alcanzados después de la compactación y la diferencia es debida exclusivamente al efecto del estabilizante.

El índice de compresibilidad en todos los casos es mayor que el de la muestra sin estabilizante (de menor a mayor tenemos el estabilizante 2, 3, 4 y 1, corresponde con orden a las cargas de pre-consolidación anteriormente mencionado). Es decir, una vez sobrepasada la carga de pre-consolidación la compresibilidad del suelo modificado aumenta debido a su bajo peso específico.

Las permeabilidades medias obtenidas para el mismo intervalo de carga de la prueba de consolidación de mayor a menor son: la del estabilizante 1, 3, 4, 2 y sin estabilizante. La mayor corresponde a la densidad menor como se esperaba.



	Cc	σ' (kg/cm²)
■ Est. 1	0.795	1.8
■ Est. 2	0.056	0.95
■ Est. 3	0.265	1.01
■ Est. 4	0.767	2.1
■ Sin Est.	0.014	0.38

Figura 9. Índice de Compresibilidad e Esfuerzo de Pre-consolidación

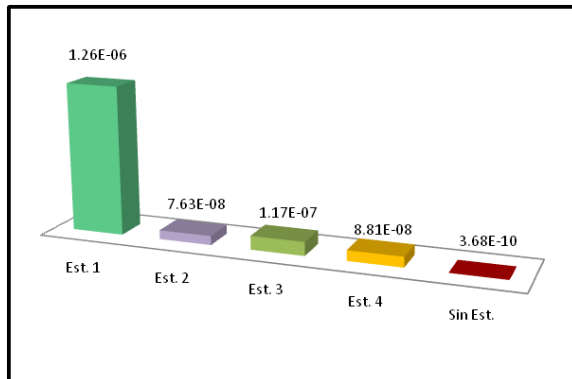


Figura 10. Permeabilidades calculadas a partir de la prueba de consolidación.

4 CONCLUSIONES

Los nano estabilizantes forman un gel nanométrico obtenido a partir de las arcillas y los aditivos. Este gel tiene una función adhesiva (cementante) dentro de la matriz del suelo, la cual es insoluble, inerte y ecológica.

La efectividad de los nano-estabilizantes deberá ser mejorada principalmente por la heterogeneidad química de los suelos, para incrementar su eficiencia y distribución en la masa del suelo. Esto se realizará en las fases 2 y 3 del proyecto de investigación.

Durante todas las pruebas realizadas se observó que la mezcla suelo-estabilizante 1, mejoró la resistencia mecánica, disminuyó la cohesión y aumentó el ángulo de fricción a pesar de que el contenido de agua era mayor. Por otro lado este estabilizante fue el que disminuyó de

manera más notoria los límites de consistencia y la presión de expansión se disminuyó totalmente.

El estabilizante 3 fue otro de los que funcionó bastante bien, aumentando el ángulo de fricción, disminuyendo la cohesión y la presión de expansión a cero.

En lo que respecta a la carga de pre-consolidación en general aumentó, con todos los aditivos y excepcionalmente con el estabilizante 4, que le podemos atribuir que no disminuyó la presión de expansión.

La permeabilidad y la compesibilidad aumentaron debido a los pesos volumétricos tan bajos que se obtuvieron. Es deseable que se pudieran realizar una mejor compactación de estos suelos para poder mejorar estas propiedades.

Finalmente se pone de manifiesto en este estudio que cada aditivo actúa de manera diferente en un mismo suelo. Por tanto, tendremos que realizar siempre pruebas para ver el efecto de cada estabilizante en el suelo de interés, y ver si se mejora la propiedad que estamos buscando mejorar.

Hablando de los demás estabilizantes, se puede llegar a la conclusión de que abren un gran campo de estudio para continuar con esas investigaciones ya que se puede seguir modificando la composición química de estos para tener mejores resultados y seguir perfeccionando los estabilizantes para mejorar su comportamiento.

REFERENCIAS

- ASTM Standard D6276, 1999a, "Standard Test Method for Using pH to Estimate the Soil-Lime Proportion Requirement for Soil Stabilization1, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Fernández, Carlos (1982). *Mejoramiento y Estabilización de suelos*. Ed. Limusa. México D.F.
- Ozin G. A. (2009), *Nanochemistry. A Chemical approach to nanomaterials*. RSC Publishing. The Royal Society of Chemistry. U.K.
- Norma SCT M.MMP-1-04/03, *Contenido de Agua*. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Normativa para la Infraestructura del Transporte. Métodos de Muestreo y Pruebas de Materiales. Suelos materiales y terracerías. México.
- Norma SCT M.MMP-1-07/07, *Límites de Consistencia*. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Normativa para la Infraestructura del Transporte. Métodos de Muestreo y Pruebas de Materiales. Suelos materiales y terracerías. México.
- Norma M.MMP-1-09/06, *Compactación AASHTO*. Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Normativa para la Infraestructura del Transporte, Métodos de Muestreo y Pruebas de Materiales. Suelos materiales y terracerías. México.