

# INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



*This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:*

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

*This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.*

*The paper was published in the proceedings of XVI Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVI PCSMGE) and was edited by Dr. Norma Patricia López Acosta, Eduardo Martínez Hernández and Alejandra L. Espinosa Santiago. The conference was held in Cancun, Mexico, on November 17-20, 2019.*

# Estabilización Química de Suelos del Ex Lago de Texcoco y su Uso como Relleno

Mario E. AMAYA<sup>a,1</sup>, Eduardo BOTERO<sup>a</sup> y Efraín OVANDO<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Instituto de Ingeniería, UNAM, México, CD.MX., México; C.P. 04510

**Abstract.** Improving soil strength by physical and chemical methods is a common practice in geotechnical engineering. This study investigates the chemical stabilization of soil with calcium oxide, CaO, to modify physical and chemical properties of clay materials for its use as a backfill. The analyzed materials correspond to a mixture of volcanic foam with cohesive soils of lacustrine origin with low resistance and high compressibility, coming from the Ex Lake of Texcoco in the Valley of Mexico basin and which require to be treated prior to its use as excavation filling material. To evaluate the feasibility of the treatment, the authors performed physical and chemical tests such as limits of Atterberg, particle-size analysis, compaction, resistance (UCS), expansion and Eades & Grim. The resulting design percentage is 8% CaO, the resistance values measured for different curing periods are greater than 350 kPa and expansions lower than 0.6%.

**Keywords.** Soil Improvement, Chemical Stabilization, Calcium Oxide, Clays.

## 1. Antecedentes

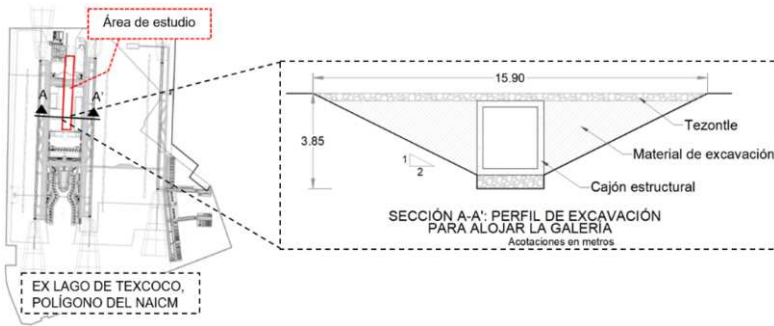
Actualmente en el Ex Lago de Texcoco se está construyendo el Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (NAICM, México), dicho proyecto representa un reto importante para la ingeniería geotécnica mexicana debido a que el subsuelo en donde se pretenden desplantar las diversas estructuras del sistema aeroportuario está conformado por materiales arcillosos de muy baja resistencia y de alta compresibilidad.

Dentro de las diversas estructuras que esto involucra, se plantea la construcción de una Línea de Transmisión eléctrica subterránea (LT) que dará servicio a la Torre de Control. La LT está compuesta por un banco de ductos alojados dentro de un cajón estructural y el cual estará confinado lateralmente por el material producto de la excavación dentro de una trinchera de sección trapezoidal de 3.6 km de longitud, Figura 1. El diseño y procedimiento constructivo de la LT indican el uso del material excavado como material de relleno, sin embargo, debido a las características naturales de los materiales del sitio, éstos deberán ser sometidos a algún proceso de mejoramiento de suelos que permita modificar sus propiedades físicas a corto y largo plazo. Para lograr tal efecto se estudia a continuación la factibilidad técnica de la estabilización química de los materiales del NAICM, mediante el empleo del Óxido de Calcio, CaO, (cal viva).

En general, el perfil estratigráfico del sitio comprende varias formaciones denominadas: Costra superficial (CS) formación arcillosa superior (FAS), capa dura (CD), formación arcillosa inferior (FAI) y depósitos profundos (DP). El espesor total de

---

<sup>1</sup> Mario Edgar Amaya Navarrete, Estudiante de Doctorado en el Instituto de Ingeniería, UNAM, México, CD.MX., México; E-mail: MamayaN@iingen.unam.mx.



**Figura 1.** Localización y Corte Transversal del Proyecto de la LT.

estas formaciones puede alcanzar los 100 m, [1,2]. La formación CS corresponde a suelos arcillosos y limosos, sometidos a procesos estacionales de secado y saturación lo cual contribuyó a su incremento natural en la resistencia y disminución en la deformabilidad. A esta subyace la formación FAS la cual está conformada por materiales compresibles a muy compresibles con espesores importantes superiores a los 10.0 m. En la FAS predominan los suelos arcillosos de alta compresibilidad con variaciones de contenidos de agua del 50% al 400%. De acuerdo a la clasificación SUCS los materiales que predominan en la FAS son de tipo CH, con índice de plasticidad (IP) y límite líquido ( $w_L$ ) muy altos, con mínima resistencia y muy susceptibles a cambios volumétricos. El nivel freático se encuentra muy próximo a la superficie y oscila entre -0.2 y -0.5 m de profundidad.

Las características físicas y químicas de los materiales naturales sumado a los cambios estacionales que ocurren en el sitio trae como consecuencia la abundante presencia de agua superficial que propicia que el área sea inaccesible durante varios meses del año generando importantes dificultades y retrasos en la construcción.

### 1.1. Generalidades de la Estabilización Química con CaO

Técnicamente todo tipo de suelo puede ser adicionado con cal y sus efectos son inmediatos, sin embargo, dependerá entre otros factores, de los resultados que se deseen obtener, tipo de material, porcentaje de finos, temperatura y porcentaje de cal adicionado.

El óxido de calcio o cal viva es un tipo de cal no hidratada desde su origen y permite obtener las siguientes reacciones en contacto con los suelos naturales: La primera, independientemente de la cantidad de arcilla presente, es la disminución de la humedad o secado, producido por la reacción exotérmica durante la hidratación del CaO, por otra parte, en materiales con presencia de finos, durante el proceso de mezclado se genera la segunda reacción o modificación físico-química para valores de  $\text{pH} < 12.45$ , en la cual se presenta un secado adicional y un incremento temporal de la resistencia, dicha reacción conduce a los procesos de floculación y aglomeración de las arcillas creando un nuevo material disgregable de aspecto granular y con características plásticas por algún tiempo lo que facilita su trabajabilidad y su compactación, finalmente la tercera etapa, definida como estabilización química para valores de  $\text{pH} > 12.45$ , a 25 °C [3], condición que permite la ruptura de las partículas, la solubilidad y liberación de la sílice y la alúmina de la arcilla la cual garantiza el efecto permanente de la cementación de los materiales a Largo Plazo contribuyendo al incremento de resistencia y la mitigación de los cambios volumétricos, [4,5,6,7]. Durante el proceso de estabilización se logra la formación de los

silicatos cálcicos hidratados (CSH) y los aluminatos cálcicos hidratados (CAH), similares a los formados durante la hidratación del cemento Portland [5,8,9,10].

Los materiales susceptibles al proceso de estabilización son aquellos suelos que tengan un índice de plasticidad mayor de 10 y más de 25% de material fino que pase el tamiz de 75 micras, [6,11]. Por otra parte, los principales agentes que afectan el proceso de la estabilización de suelos arcillosos es la presencia de materia orgánica y los sulfatos, elementos que en porcentajes mayores al 1 y al 0.3% respectivamente puede requerir de procesos constructivos especiales o de cantidades de cal adicional, [11,12,13].

## 2. Materiales y Condiciones de Análisis

El estudio dio inicio con la exploración y recolección de muestras alteradas obtenidas posterior al momento de la excavación a lo largo del eje de la LT a profundidades de 0 a 3.6 m. Las muestras naturales se caracterizaron en el laboratorio, Tabla 1. Se verificó su factibilidad para ser estabilizadas químicamente. Se definió el porcentaje óptimo de cal mediante la prueba Eades y Grim [14], Figura 2. Se analizaron tres porcentajes de cal que cumplen con el propósito de la estabilización y se evaluaron sus efectos sobre los límites de Atterberg y en la Densidad de Sólidos, Figura 3. Se generaron las curvas de compactación correspondientes, Figura 4. En cada uno de los puntos ( $\gamma_d$ ,  $w$ ) que definen a cada curva de compactación se midió la evolución de la resistencia UCS (prueba de compresión no confinada) para diferentes periodos de fraguado, Figura 5. Previo al ensaye UCS y con la finalidad de medir la expansión de los materiales estabilizados, los especímenes fueron sometidos al efecto de absorción capilar y se midió su variación volumétrica en función de la relación de vacíos ( $e$ ), Tabla 2.

Para realizar este estudio fue necesario considerar y reproducir dentro del laboratorio la secuencia de construcción *in-situ* mediante las siguientes condiciones de análisis. La condición a Corto Plazo (CP) corresponde al tiempo promedio transcurrido (una hora) entre la etapa de mezclado y la etapa de compactación en campo. De acuerdo con la prueba Eades y Grim [14], el tiempo mínimo necesario que permite la hidratación y reacción exotérmica del CaO es de una hora. La condición a Mediano Plazo (MP) corresponde a los diferentes periodos de curado analizados, de 9 y hasta 95 días, medidos a partir del término de la etapa de compactación.

Las muestras corresponden a una mezcla de materiales de, limo y arcillas de origen lacustre de baja resistencia y de alta compresibilidad con índice de plasticidad superior de 100% contaminados por partículas de espuma volcánica (tezontle). Las características de las muestras de suelo analizadas (M-1) y del CaO empleado se presentan en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Características de los Materiales Empleados en la Investigación.

Material	Muestra de suelo (M-1)	Óxido de calcio, (CaO)	
Contenido de agua $w$	137 %		
Granulometría			
Gravas $G$	9.89 %	Óxido de calcio total, mínimo	95 %
Arenas $S$	28.07 %	Carbonato de calcio, máximo	10 %
Finos $F$	62.04 %	Óxido de magnesio, máximo	1 %
Límite Líquido $w_L$	182.3 %	Óxido de hierro o aluminio, máximo	1 %
Límite Plástico $w_p$	76.1 %	Sílice, máximo	2 %
IP	106.1 %	Humedad, máximo	2 %
SUCS	MH	Tamaño, mínimo que pasa la	90 %
Nombre de grupo	Limo elástico arenoso	malla 100	

### 3. Resultados

#### 3.1. Determinación del CaO Óptimo

Distintos autores señalan que con la adición entre 3% y 10% de cal se logra definir el comportamiento asintótico de la curva en la prueba de Eades y Grim, correspondiente a un valor de pH de 12.4 que garantiza la estabilización de los suelos y permite precisar el valor óptimo de cal para diseño, ASTM D-6276, [11,14]. Lo anterior representa que cualquier nuevo incremento de CaO ya no inducirá un aumento significativo del pH en el sistema y no reaccionará en su totalidad químicamente con el suelo.

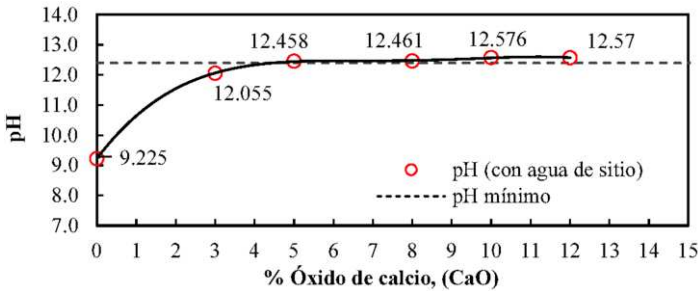


Figura 2. Resultados de prueba Eades y Grim.

La Figura 2 muestra los resultados obtenidos, los cuales fueron corregidos por el efecto de temperatura para condiciones ideales, a 25 °C de acuerdo con la National Lime Association [3]. Adicionalmente para la ejecución de ésta prueba y lograr la mayor representatividad de los resultados, se empleó agua extraída del mismo sitio en donde será aplicada la estabilización *in-situ*. La estabilización química de los materiales analizados se logra para porcentajes de CaO mayores al 5%, sin embargo, el porcentaje recomendado que mejor satisface las condiciones en campo es de 8%.

Para estudiar con mayor amplitud los efectos de la estabilización los autores evalúan las siguientes pruebas de laboratorio considerando los tres porcentajes de CaO que definen el comportamiento asintótico de la curva “% CaO vs pH”, de 5%, 8% y 10%.

#### 3.2. Efectos del CaO en los Límites de Atterberg y en la Densidad de Sólidos

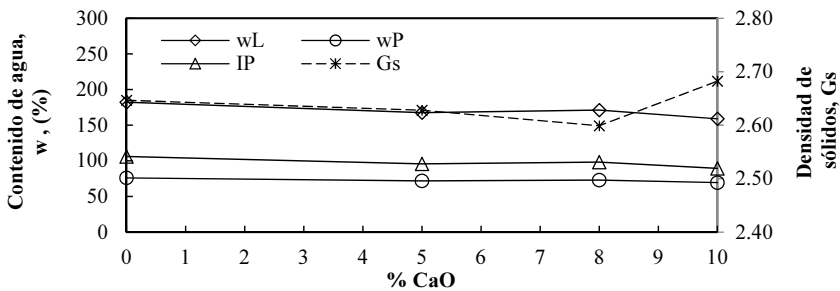


Figura 3. Comportamiento de los Límites de Atterberg y la densidad de sólidos.

La Figura 3 muestra el comportamiento de los parámetros  $w_L$ ,  $w_P$ , IP y la  $G_s$ , determinados a corto plazo para la muestra de suelo analizada en estado natural y para las mezclas estabilizadas con los porcentajes de CaO ya definidos, [14].

Para el caso de la mezcla de suelo estabilizada con 8% de CaO definido como el porcentaje óptimo, en comparación con la muestra de suelo natural, muestra la reducción del  $w_L$  en 6.0%, del  $w_P$  en 4.1% y del IP del 7.4%, por otra parte, también genera la disminución en el valor de la  $G_s$ , en 1.8%. De lo anterior se deduce que, con la adición de CaO se provoca la pérdida de humedad en los suelos favoreciendo su trabajabilidad y, justifica técnicamente los efectos de floculación y aglomeración.

### 3.3. Efectos del CaO en la Compactación de los Suelos Arcillosos.

Para el estudio de los efectos del CaO sobre los parámetros de compactación en laboratorio, peso volumétrico seco ( $\gamma_d$ ) y contenido de agua ( $w$ ), además de considerar las condiciones de análisis mencionadas en el inciso 2 es necesario considerar la humedad natural que predomina *in-situ*, para ello se consideró válida la construcción de las curvas de compactación a partir de la rama húmeda y hacia la rama seca, asumiendo como hipótesis de trabajo que, dado el alto contenido de agua que poseen los materiales no será necesaria la aplicación de agua adicional en campo para lograr la reacción del CaO durante los procesos de mezclado y compactación. Bajo tal hipótesis se realizó la construcción de las curvas de compactación tipo Proctor Estándar, ASTM D-698, en función de dos factores que inducen la disminución de la humedad, la adición de CaO y la exposición de las mezclas a temperatura ambiente, en promedio de 23°C, dentro del laboratorio por diferentes intervalos de tiempo previo a su compactación.

En la Figura 4 se observa la disminución del PVSM y el aumento de la humedad óptima (HO) a medida que se incrementa el porcentaje de CaO, [4, 11]. Geotécnicamente la variación de los parámetros de compactación está asociada a dos alteraciones físicas que sufren los materiales a causa de la adición del CaO, la primera relacionada al incremento de sólidos finos a medida que se adiciona el CaO y la segunda, relacionada con el tamaño de los grumos cementados formados durante la floculación y aglomeración de las arcillas. Ambas modificaciones fueron estudiadas por el Dr. M. Mendoza en otro tipo de suelos no estabilizados, demostrando que la granulometría de los agregados entre otros factores como el tipo de compactación, moldes, pisones, pared, escala y el efecto de secado de las arcillas, son algunas condiciones que influyen en la compactación, [15].

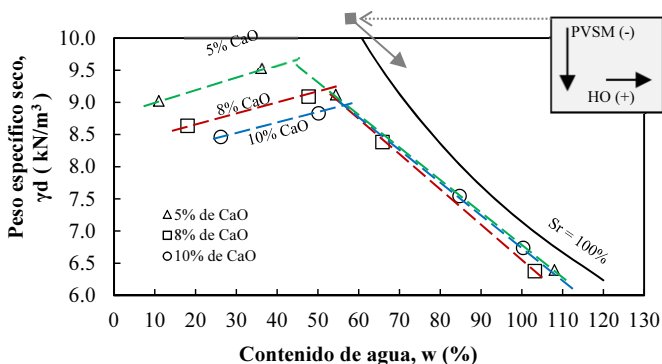


Figura 4. Curvas de compactación de las mezclas estabilizadas.

3.4. Efectos del CaO en la Resistencia y Expansión

Para el estudio de la resistencia se recurrió al ensaye de compresión no confinada (UCS), ASTM D-2166M, D-5102. Los especímenes fueron ensayados para diferentes edades de curado y bajo una carga monolítica con velocidad de aplicación de 1.33. El curado de los especímenes se realizó impidiendo la pérdida de humedad de las probetas, mediante su protección con material impermeable y resguardadas en contenedores dentro de un cuarto húmedo con temperatura controlada.

La Figura 5 se muestra dividida en dos secciones (a y b), mismas que se interpretaron en conjunto por su relación entre los puntos de las curvas de compactación (humedades, w) y su resistencia. La sección (a) presenta las tres curvas de compactación correspondientes a los porcentajes de CaO analizados (5%, 8% y 10%) y la sección (b) presenta la evaluación de la resistencia última para distintos periodos de curado, correspondientes a los Puntos 2 al 4 de la sección (a). Para el caso particular de los Puntos 1, no fue posible la determinación de la resistencia debido a la pérdida de adherencia entre los grumos de arcilla ya cementados y debido también, a la baja humedad que poseían las mezclas.

Para evaluar la evolución y la variación de la resistencia se analizaron tres variables que la influyen en su comportamiento. La primera corresponde al incremento del CaO adicionado, la segunda corresponde a la humedad inicial de las mezclas con la cual se elaboraron los especímenes y la tercera corresponde al periodo de curado de los especímenes. La influencia de éstas variables sobre la resistencia, definen que, a mayor porcentaje de CaO adicionado se logra una mayor resistencia, es decir, la resistencia última máxima correspondiente a los porcentajes de 5%, 8% y 10% de CaO resultan de 216, 471 y de 941 kPa respectivamente. Por otra parte, la humedad con la cual se compactan las mezclas estabilizadas, infiere en el grado de cementación de las mezclas y por ello, si los especímenes son compactados con humedades superiores a la HO, sobre la rama húmeda (Puntos 3 y 4), se consigue una cementación homogénea en masa con buenas características de resistencia. En contraste, si los especímenes son compactados sobre la rama seca (Puntos 2), se consigue una cementación (no homogénea) individual de grumos de arcilla de diferentes tamaños, lo que deriva a obtener resistencias bajas. Finalmente, a mayor periodo de curado se logra una mayor resistencia.

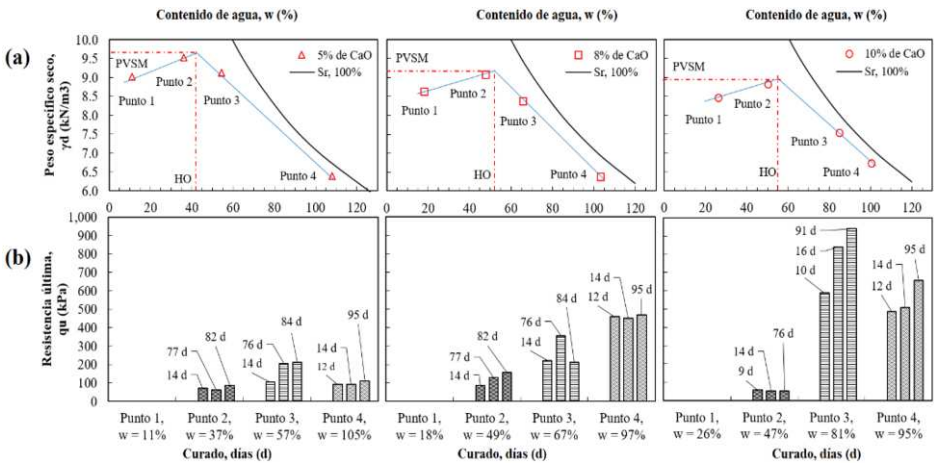


Figura 5. Relación entre los puntos de las curvas de compactación y su resistencia.

**Tabla 2.** Variación de los Parámetros de Compactación, Resistencia y Expansión.

CaO %	HO %	PVSM kN/m <sup>3</sup>	PVH kN/m <sup>3</sup>	Punto No.	PVS kN/m <sup>3</sup>	GC ---	qu máxima kPa	e, inicial ---	e, final ---	Expansión %
5	42	9.60	13.63	2	8.86	92	87	2.089	2.100	0.52
				3	8.77	91	213	2.027	2.037	0.52
				4	6.15	64	111	3.305	3.315	0.31
8	52	9.20	13.98	2	7.73	84	157	2.501	2.490	0.43
				3	7.71	84	358	2.259	2.265	0.25
				4	6.56	71	468	2.859	2.871	0.42
10	55	8.95	13.87	2	7.43	83	57	2.457	2.470	0.56
				3	7.60	85	939	2.526	2.530	0.16
				4	6.72	75	656	2.908	2.917	0.32

HO: Humedad óptima; PVSM: Peso volumétrico seco máximo; PVH: Peso volumétrico húmedo; PVS: Peso volumétrico seco; GC: Grado de compactación; qu: Resistencia última; e: Índice de vacíos.

Como es de esperarse, desde el punto de vista geotécnico, entre mayor sea la proximidad de la humedad de compactación de los especímenes al HO se logran las mayores resistencias debido a la disminución de vacíos provocado por la densificación de los materiales (efecto físico), sin embargo, los efectos cementantes inducidos por la estabilización (efecto químico) también contribuye con el incremento de la resistencia.

La Tabla 2 muestra los parámetros de compactación de las mezclas y relaciona el Grado de Compactación (GC) con la resistencia máxima (qu) con lo cual es posible evaluar cuantitativamente el efecto cementante de la estabilización a mediano plazo. Los puntos (Puntos 2) de las tres curvas de compactación en donde humedad es inferior a la HO, tienen un GC entre 83% y 92%, correspondiente a valores de resistencia máximos hasta de 157 kPa. Las resistencias máximas obtenidas, superiores a 900 kPa, corresponden a las humedades que se encuentran por encima del valor de la HO, (Puntos 3 y 4) para los cuales el GC se encuentra entre 64% y 91%. Por lo anterior se puede interpretar que, a pesar de no lograr una densificación óptima o reducción del volumen de vacíos aceptable en términos del GC, el efecto cementante generado permite conservar más del 50% de la resistencia que se lograría para un GC superior al 84%. Por otra parte, al comparar las resistencias promedio de los puntos 3 y los puntos 4, los cuales tienen diferentes humedades, se observa una variación entre ellos del orden de 37%.

En otro orden de ideas, en la Tabla 2 se muestran también las variaciones volumétricas de los especímenes estabilizados, en términos de la relación de vacíos (e). Para analizar las variaciones volumétricas, los especímenes fueron sometidos al efecto de capilaridad durante un periodo de 24 horas posteriores a su periodo de curado y previo a su ensaye de resistencia UCS. Para ello los especímenes fueron preparados y acondicionados mediante el retiro de su protección ante pérdida de humedad correspondiente al periodo de curado y envueltos totalmente con papel filtro para su posterior colocación sobre piedras porosas dentro de un recipiente adicionado con agua destilada. Para medir los cambios volumétricos se determinaron las dimensiones de los especímenes antes y después de ser sometidos al proceso de capilaridad. [6].

### 3.5. Factibilidad de la estabilización de los materiales naturales y su uso como relleno

Los procesos inducidos por la estabilización como la disminución del IP a corto plazo y la cementación a largo plazo generan que el suelo natural se transforme y pase a un estado plástico a un estado semisólido y posteriormente a un estado sólido. Estos factores resultan trascendentales para el empleo en la construcción en ambientes como los del NAICM. Comparando los datos de diseño de la LT [16], con los resultados de evaluación



obtenidos, se tiene que, la resistencia al corte del material en estado natural (9.0 kPa) presentan un incremento superior al 2400%. La variación volumétrica o expansión de los especímenes no supera el 0.6% y el promedio del peso volumétrico de las mezclas estabilizadas ( $13.83 \text{ kN/m}^3$ ) es del orden al usado en el diseño ( $14.00 \text{ kN/m}^3$ ) de la LT.

#### 4. Conclusiones

La estabilización química produce la transformación física y química de los materiales arcillosos analizados, mejorando sus propiedades geotécnicas como la resistencia, la reducción de variaciones volumétricas y la reducción del peso volumétrico.

Para el caso de la LT, resulta técnicamente favorable el empleo de los materiales excavados como materiales de relleno una vez que los mismos sean estabilizados químicamente, con 8% de CaO. Es recomendable compactar los materiales estabilizados con humedades superiores a la óptima. El tipo y calidad de cal deberán de ser controlados.

#### Referencias

- [1] Murillo F. R., y A. G. García. 1978. "Ex Lago de Texcoco". El subsuelo y la ingeniería de cimentaciones en el área urbana del Valle de México. México: Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos.
- [2] Santoyo V., Enrique, Efraín Ovando S., Federico Mooser y Elvira León P. 2005. "Síntesis geotécnica de la cuenca del Valle de México." México: TGC.
- [3] National Lime Association. 2007. "Lime The Versatile Chemical. Lime Terminology, Standards & Properties." National Lime Association.
- [4] Beetham, Dijkstra, Dixon et al. 2015. "Lime stabilisation for earthworks: a UK perspective." Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Ground Improvement Volume 168 Issue GI2: 81-95.
- [5] Ibtehaj, T. J., Mohd, R. T., Zaid, H. M., Tanveer, A. K. 2014. "Soil stabilization using lime: Advantages, disadvantages and proposing a potential alternative." Research Journal of Applied Sciences. Engineering and Technology 8(4):510–520.
- [6] National Lime Association. 2006. "Mixture Design and Testing Procedures Mixture Design and Testing Procedures for Lime Stabilized Soil for Lime Stabilized Soil." National Lime Association.
- [7] Takahashi H, Morikawa Y, Fujii N and Kitazume M. 2018. Thirty-seven-year investigation of quicklime-treated soil produced by deep mixing method. Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Ground Improvement 171(3): 135–147.
- [8] Eades, J.L. and R.E. Grim. 1960. "Reaction of hydrated lime with pure clay minerals in soil stabilization." Highway Res. Board Bull., 262, pp.51-53.
- [9] Mallela, J., P. Harold Von Quintus, K.L. Smith and ERES Consultants. 2004. "Consideration of Lime stabilized Layers in Mechanistic empirical Pavement Design" The National Lime Association, Arlington, Virginia, USA.
- [10] Terrel, R.L., J.A. Epps, E.J. Barenberg, J.K. Mitchell, and M.R. Thompson. 1979. "Soil Stabilization in Pavement Structures: A User's Manual." Volumes I and II FHWA.
- [11] Little, D.L. 1995. "Stabilization of Pavement Subgrades and Base Courses with Lime." Published by Kendall/Hunt Publishing Company. (<http://www.lime.org/publications.html>).
- [12] Mitchell, J. K. 1984 "Practical Problems from Surprising Soil Behavior." Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 112, No. 3, pp. 259-289.
- [13] National Lime Association. 2001. "Guidelines for Stabilization of Soils Containing Sulfates" Technical Memorandum, Arlington, VA.
- [14] Eades J.L. and R.E. Grim. 1966. "A Quick Test to Determine Lime Requirements of Lime Stabilisation." Highway Research Record 139, pp. 61-72.
- [15] Mendoza, M.J., Condiciones que Influyen en los Resultados de las Pruebas de Compactación de suelos, Instituto de Ingeniería UNAM, México 1986.
- [16] Proyectos y Construcciones URISA S.A. de C.V. (2017). Desarrollo de la Ingeniería de Detalle y Construcción de Subestaciones y Acometida Eléctrica del NAIC. Memoria de diseño de galería para cables (Tramo 1 y 3) Galería Tipo. URI-NAICM-LT-IC-MC-04. Estudio de mecánica de suelos.