

POLÍMEROS PARA LA ESTABILIZACIÓN VOLUMÉTRICA DE ARCILLAS EXPANSIVAS

Teresa López-Lara^{1*}, Juan Bosco Hernández-Zaragoza¹, Jaime Horta-Rangel¹, Aleyda Coronado-Márquez¹, Víctor Manuel Castaño-Meneses²

¹⁾ División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería; Universidad Autónoma de Querétaro, Cerro de las Campanas S/N, Col. Niños Héroes, CP 76010, Querétaro, Qro; México. Correo electrónico: lolte@uaq.mx, bosco@uaq.mx, horta@uaq.mx y alcoma83@hotmail.com, respectivamente.

²⁾ Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada; Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Juriquilla, A.P. 1-1010, Querétaro, Qro; México. Correo electrónico: meneses@servidor.unam.mx

Recibido: Junio 2009; Aceptado: Enero de 2010

RESUMEN

Las arcillas expansivas sufren cambios de volumen debido a las variaciones en su humedad, adquirida por capilaridad y/o por infiltración. Cualquier construcción ligera asentada sobre este tipo de suelos experimentará deformaciones causadas por la expansión de la arcilla, dichos movimientos se traducen en grietas sobre muros y el levantamiento de pisos. Por lo anterior, se han propuesto diferentes soluciones para reducir el cambio volumétrico de las arcillas; algunos métodos modifican las características físico-químicas de las arcillas, agregando diferentes materiales que estabilizan el volumen de las mismas, tal es el caso de la cal, cemento hidráulico, fosfatos, sales de aluminio y recientemente, los polímeros. Esta investigación utiliza un poliuretano, que comúnmente se aplica para sellado de grietas en la construcción. Dicho polímero se aplica en la estabilización de cambios volumétricos de suelos expansivos. Se consideraron muestras remoldeadas de suelo natural y suelo tratado con polímero; en ambas muestras se determinaron propiedades índices, compactación, resistencia al esfuerzo cortante, expansión y consolidación; pruebas que determinaron si es factible la utilización de dicho polímero. El resultado más significativo en esta investigación es el que se refiere a la expansión. Las pruebas muestran que la mezclas suelo-polímero reducen la expansión en, aproximadamente, el 40%, respecto a la del suelo natural.

Palabras claves: Arcilla, polímero, poliuretano, expansión, estabilización de suelos

ABSTRACT

The expansive clays have changes of volume that is because the variations in their humidity, acquired by capillarity or infiltration. Any light construction on this type of soils will have deformations caused by the expansion of the clay, these movements are translated in cracks on walls and the rise of floors. By the previous thing, different solutions have been selecting to reduce the volumetric change of clays; some methods modify the characteristic physical and chemical of clays, adding different materials that stabilize the volume of the same, so is the case of the lime, hydraulic cement, phosphates, salts of aluminum and recently, polymers. In this investigation we use a polyurethane, that commonly is applied for seal of cracks, in the expansive soil stabilization. Samples of disturbs natural soil and treat soil with polymer were considered properties were determined index properties, compaction, shearing resistance, expansion and consolidation; tests that determine if the use of this polymer is feasible. The most significant result in this investigation is about the expansion. We can demonstrate that the results whit mixtures whit soil-polymer decrease the expansion, approximately, 40%, with respect to the natural soil.

Key words: Clay, polymer, polyurethane, expansion, stabilization soils.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Minerales de arcilla. Los granos de dimensiones menores de 2 micras hasta los coloides de dimensiones moleculares corresponden a lo que se clasifica como mineral de arcilla. Los minerales de arcilla son el producto de la alteración química de las rocas, originados

básicamente por la hidratación de sus componentes litológicos.

Los minerales de arcilla son principalmente silicatos aluminicos en los que frecuentemente la alúmina es reemplazada en parte por hierro, magnesio, potasio, sodio, litio. Los suelos de mayores proporciones de alúmina presentan mayor actividad al complejo de absorción. Los minerales de arcilla ocurren en placas, aunque en algunos minerales presentan forma tubular o fibrosa, dependiendo del mineral que los constituya, tienen ciertas propiedades importantes como la actividad superficial que se refiere al conjunto de fenómenos fisicoquímicos y de la intensidad de la carga superficial de los granos, que en algunos minerales es mayor que en otros [1].

Los minerales de arcilla de acuerdo con su estructura reticular se dividen en tres grupos básicos; montmorilonitas, caolinitas e ilitas. Las montmorilonitas están formadas por una lámina aluminica entre dos silícicas. Es el mineral producto de la hidratación de las rocas ígneas o, en general, de productos de origen piroclástico. Los minerales de este grupo tienen la propiedad de hincharse considerablemente al entrar en contacto con el agua libre. El hinchamiento se debe a la gran afinidad que tiene el mineral montmorilonita con las moléculas de agua, la cual es absorbida entrando a formar parte de la estructura molecular del mineral.

Cuando la alúmina es reemplazada en parte por hidrógeno, sodio, calcio o litio; la montmorilonita toma el nombre de dicho complejo de absorción. Las montmorilonitas que resultan más activas son las de sodio y litio.

La actividad superficial de los minerales de la caolinita es pequeña. Están formadas por una lámina silícica y otra aluminica. La unión entre todas las retículas es lo suficientemente firme para no permitir la penetración de moléculas de agua. La forma de los granos también es plana o escamosa pero la caolinita no absorbe agua en su estructura molecular como lo hacen las montmorilonitas. Las capas de agua adheridas a los granos son también muy pequeñas, lo que las hacen diferenciarse del fuerte efecto de la viscosidad intergranular que tienen las montmorilonitas.

Por lo anterior, los minerales de caolinita pura no presentan el efecto de la expansión al contacto con el agua o fuerte contracción al secarse [1].

Las ilitas corresponden a las arcillas que son producto de la hidratación de las micas blancas, que comúnmente se les llama como: Minerales de arcilla de estructura similar a las micas.

Están estructuradas análogamente como las montmorilonitas, pero su constitución interna manifiesta tendencia a formar grumos de materia, que reducen el área expuesta al agua por unidad de volumen; por ello, su expansividad es menor que la de las montmorilonitas [1].

1.2. Polímeros, tipos y usos. La palabra polímero proviene de dos palabras griegas: “poli”, que significa *muchos*, y “meros”, que significa *parte*. La sustancia que constituye la unidad

fundamental de un polímero recibe el nombre de "monómero". Las moléculas compuestas de al menos dos unidades monoméricas diferentes se les llama copolímeros. El número de unidades monoméricas contenidos en el polímero recibe el nombre de grado de polimerización.

La molécula de un polímero final puede constituirse de miles de unidades que se repiten y cada una se denomina "mero o unidad monomérica".

Todas las sustancias naturales, artificiales o sintéticas, cuyo peso molecular es superior a 10.000 g/mol, reciben el nombre general de sustancias macromoleculares. Los productos macromoleculares orgánicos en cuyas moléculas se repiten con regularidad ciertos principios estructurales genéricos reciben el nombre de altos polímeros. Estos altos polímeros pueden ser, a su vez, naturales, artificiales o semisintéticos y sintéticos.

Los altos polímeros artificiales son los obtenidos por transformación química de los altos polímeros naturales, sin que se destruya de modo apreciable su naturaleza macromolecular. Los altos polímeros sintéticos son los que se obtienen por vía puramente sintética a partir de sustancias de bajo peso molecular; por ejemplo el nylon, poliestireno, estireno, etc.

Los altos polímeros sintéticos y semisintéticos reciben generalmente el nombre de plásticos; aún cuando no todos ellos presentan la característica de la plasticidad. A veces se les llama resinas sintéticas por su semejanza, en estructura y propiedades, a las resinas naturales [2].

1.2.1. Tipos de polímeros. Algunas de sus clasificaciones son:

Según su composición: *Homopolímeros* (un monómero) y *copolímeros* (dos o más monómeros).

Según su estructura: *Lineales* cuando los monómeros se unen por dos sitios (cabeza y cola) y *Ramificados* si algún monómero se puede unir por tres o más sitios.

Según su origen: *Naturales* como el caucho, polisacáridos (celulosa, almidón), proteínas, ácidos nucleicos, entre otros y *Artificiales* como los plásticos, fibras textiles sintéticas, poliuretano, baquelita, etc.

Por su comportamiento ante el calor: *Termoplásticos*: Se reblandecen al calentar y recuperan sus propiedades al enfriar. Se moldean en caliente de forma repetida y *Termoestables*: Una vez moldeados en caliente, quedan rígidos al ser enfriados por formar nuevos enlaces y no pueden volver a ser moldeados. Las fibras pueden tejerse en hilos finos y los elastómeros poseen gran elasticidad por lo que pueden estirar varias veces su longitud. Un elastómero pero de origen natural sería el caucho.

En este trabajo se utiliza un polímero sintético del tipo termoplástico, por lo que a continuación se anexa la descripción de éstos.

Los polímeros termoplásticos son polímeros de cadenas largas que cuando se calientan se reblandecen y pueden moldearse a presión. Representan el 78-80% de consumo total. Los principales son: polietileno, polipropileno, poli(cloruro de vinilo), poliestireno y poliuretano.

El polietileno es el termoplástico más usado en nuestra sociedad. Los productos hechos de polietileno van desde materiales de construcción y aislantes eléctricos hasta material de empaque. Es barato y puede moldearse a casi cualquier forma, desde fibras hasta películas delgadas.

El polipropileno se utiliza para elaborar bolsas de microondas ya que tienen una buena resistencia térmica y eléctrica además de baja absorción de humedad. Otras propiedades importantes son su dureza, resistencia a la abrasión e impacto, transparencia, y que no es tóxico. Asimismo, se usa para fabricar juguetes, valijas, jeringas, baterías, tapicería, ropa interior y ropa deportiva, alfombras, cables, selladores, partes automotrices y suelas de zapatos.

El poli(cloruro de vinilo) (PVC) se obtiene polimerizando el cloruro de vinilo. Existen dos tipos, el flexible y el rígido. Ambos tienen alta resistencia a la abrasión y a los productos químicos. Pueden estirarse hasta cuatro veces y se suele copolimerizar con otros monómeros para modificar y mejorar la calidad de la resina. Las resinas de PVC casi nunca se usan solas, sino que se mezclan con diferentes aditivos. El PVC flexible se destina para hacer manteles, cortinas para baño, muebles, alambres y cables eléctricos; El PVC rígido se usa en la fabricación de tuberías para riego, juntas, techado y botellas.

El poliestireno (PS) es el tercer termoplástico de mayor uso debido a sus propiedades y a la facilidad de su fabricación. Posee baja densidad, estabilidad térmica y bajo costo. El hecho de ser rígido y quebradizo lo desfavorecen. Estas desventajas pueden remediarse copolimerizándolo con el acrilonitrilo (más resistencia a la tensión). Es una resina clara y transparente con un amplio rango de puntos de fusión. Fluye fácilmente, lo que favorece su uso en el moldeo por inyección.

Los poliuretanos pueden ser de dos tipos, flexibles o rígidos. El uso más importante del poliuretano flexible es el relleno de colchones. Otros usos: bajo alfombras, recubrimientos, calzado, juguetes y fibras. Por su resistencia al fuego se usa como aislante de tanques, recipientes, tuberías y aparatos domésticos como refrigeradores y congeladores [2, 3].

1.2.2. Usos de los polímeros. Actualmente los polímeros sintéticos tienen infinidad de usos en la industria, por lo que se hacen cada vez más importantes. Por ejemplo, el polietileno que se utiliza para fabricar una botella de plástico. Los polímeros sintéticos también se utilizan para el temple del acero, aluminio y algunos tipos de aceros especiales para usos militares. También han sido formalmente aceptados para usarse en el temple de materiales de la industria aeroespacial.

Recientemente, en el área de la ingeniería de la construcción, se han producido los llamados

"productos geosintéticos", fabricados mediante polímeros, que son productos geotextiles y geomembranas que tienen cuatro funciones principales: separación, al evitar o minimizar la mezcla de materiales de diferente granulometría; filtración y drenaje, al evitar la migración de partículas de suelo permitiendo el libre flujo de agua y gases; refuerzo, al soportar tensiones, estabilizar la masa del suelo y proteger geomembranas; e impermeabilización, al formar una barrera que impide el paso de fluidos y partículas de suelo.

Los geoproductos se aplican a una amplia variedad de obras, como taludes y muros de tierra, terraplenes en suelos blandos, control de erosión, almacenamientos, cortinas de presas, canales, vías de comunicación, sistemas de filtración y drenaje, disposición de residuos, entre otros [4].

1.3. Métodos de estabilización de suelos arcillosos. Las estabilizaciones son procedimientos físicos y/o químicos que nos permiten modificar las características de un suelo con la finalidad de mejorar su comportamiento en cuanto a resistencia y deformación. Para disminuir los cambios volumétricos en un suelo, se puede incorporar un aditivo a éste, uno de los métodos más comunes involucra el uso de cal. Este aditivo es particularmente efectivo con suelos arcillosos, con los que reacciona tanto química como físicamente [5, 6].

A continuación se mencionan los procedimientos de estabilización más comunes:

- Estabilización por medios mecánicos, de los que la compactación es el más conocido.
- Estabilización por drenaje.
- Estabilización por medios eléctricos, donde la electroósmosis y la utilización de pilotes electrometálicos son probablemente los más conocidos.
- Estabilización por empleo de calor y calcinación.
- Estabilización por medios químicos, generalmente lograda por agentes estabilizantes específicos, como el cemento, la cal, asfalto.

La gran variabilidad de los suelos y sus composiciones hacen que cada método resulte sólo aplicable a un número limitado de tipos de ellos; en muchas ocasiones esa variabilidad se manifiesta a lo largo de algunos metros, en tanto que en otras a lo largo de algunos kilómetros [7].

Las propiedades de los suelos que más frecuentemente se estudian en problemas de estabilización son: Estabilidad volumétrica, resistencia, permeabilidad, compresibilidad y durabilidad.

1.4. Estabilización de suelos con resinas y polímeros. El uso de estos materiales en la estabilización de suelos ha tenido por objeto principal, formar una estructura impermeable al agua; ciertas resinas sintéticas tales como las del sistema anilina y furfural de naturaleza orgánica

aumentan la resistencia mecánica del suelo mejorando su cohesión.

En algunos casos, la resistencia al esfuerzo cortante se reduce en tanto que la compactación se mejora en forma notable; es así como a estos materiales se les conoce más como "agentes que mejoran la compactación" que como estabilizantes. Un gran número de productos comerciales caen dentro de esta categoría y su efectividad es muy variable, dependiendo del tipo de suelo y los elementos constituyentes del aditivo [8].

2. PARTE EXPERIMENTAL

Esta investigación consistió en estudiar la adición de un polímero al suelo expansivo para determinar su efectividad en la disminución del cambio volumétrico, problema que estos suelos presentan cuando se hidratan; para lo cuál, se realizaron varios ensayos que se detallan a continuación.

2.1. Diversas propiedades.

2.1.1. Propiedades índice. El suelo utilizado en esta investigación es del fraccionamiento *Jacarandas, Querétaro, Oro (México)*, zona considerada con suelo altamente expansivo [9]. Tanto al suelo natural como al suelo-polímero se les realizaron las pruebas para determinar los Límites Líquido, Plástico y de Contracción, así como el *índice plástico*. Estas pruebas permitieron clasificarlos, tomando como base el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

El polímero utilizado es un Poliuretano que se usa comúnmente en la industria de la construcción para el sellado de grietas, reparación de malecones y en el refuerzo de suelos granulares. Su humedad y viscosidad son bajas y su color es ámbar. Las mezclas suelo-polímero se realizaron al 2, 4, 6, 8 y 10%, respecto al peso seco del suelo. De los resultados obtenidos de estas pruebas, se decidió utilizar la mezcla suelo-polímero al 5%, combinación que mejor logra los objetivos de este estudio; además de que un mayor porcentaje, no mostró cambios significativos.

2.2.2. Peso específico seco máximo. Se realizó la prueba de compactación AASHTO Modificada Variante A, por medio de la cual se obtuvieron datos fundamentales como la humedad óptima y el peso específico seco para el suelo natural y suelo-polímero al 5%.

2.2.3. Resistencia a la compresión simple. Para dicha propiedad se utilizó la prueba de compresión simple. Se ensayaron probetas de suelo natural remoldeado y suelo-polímero al 5%, con humedad óptima y peso volumétrico seco máximo.

2.2.4. Expansión. Al igual que para la prueba de compresión simple, se elaboraron probetas de suelo natural y suelo-polímero, con humedad óptima y peso específico seco máximo. Luego las probetas se saturaron en el consolidómetro sin carga y se registró su expansión máxima (proceso

que tardó aproximadamente tres semanas).

2.2.5. Consolidación. Después de la saturación de las probetas (expansión), se aplican cargas a éstas (0,5, 1,0, 2,0, 4,0, 8,0 y 16,0 kg). Por último, se procede a realizar la descarga de igual forma en que se fue aplicando la carga, pero ahora en sentido inverso.

3. RESULTADOS

3.1. Propiedades índice del suelo natural y de la mezcla suelo-polímero. El suelo natural presenta un límite líquido promedio de 89,7%. El suelo natural tratado con polímero a diferentes porcentajes presenta, desde el 4%, una considerable reducción del límite líquido en casi 50% y para mayores porcentajes (6, 8 y 10), tuvo muy poca variación (Tabla 1).

Tabla 1. Propiedades Índice en suelo natural y suelo polímero (valores promedio).

| Material | Límite Líquido, % | Límite Plástico, % | Límite de Contracción, % | Índice Plástico, % |
|--------------------|-------------------|--------------------|--------------------------|--------------------|
| Suelo natural | 89,7 | 36,0 | 12,5 | 53,7 |
| Suelo-polímero 4% | 49,3 | 28,2 | 17,9 | 21,1 |
| Suelo-polímero 6% | 48,8 | 36,0 | 17,7 | 12,8 |
| Suelo-polímero 8% | 44,0 | 38,8 | 20,7 | 5,2 |
| Suelo-polímero 10% | 45,3 | 37,0 | 19,5 | 8,2 |

El *índice plástico* del suelo natural tiene un valor de 54% aproximadamente, con un 4% de polímero, el *índice plástico* se reduce más de la mitad (21%). Al seguir aumentando el contenido de polímero se va reduciendo todavía más el *índice plástico*.

El *límite de contracción* de la arcilla natural es de 12,5%. En el suelo-polímero, a partir del 4%, el límite de contracción es de 18%, aproximadamente, aumenta ligeramente con 6%; para mantenerse constante a partir del 8%.

El suelo natural es de un CH (suelo arcilloso de alta compresibilidad) y mezclado con polímero va perdiendo plasticidad y con ello, expansividad, para quedar en un ML, limo de baja compresibilidad (véase la Figura 1), según el SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos).

3.2. Resistencia al esfuerzo cortante mediante compresión simple del suelo natural y suelo-polímero. Los resultados de compresión simple en suelo natural, variaron de 3,2 a 4,1

kg/cm², aproximadamente; con una resistencia promedio de 3,6 kg/cm². Para el suelo-polímero, los resultados de compresión simple variaron de 2,3 a 2,7 kg/cm², aproximadamente; con una resistencia promedio de 2,5 kg/cm² (véase la Tabla 2). Es importante mencionar que la resistencia del suelo modificado, aunque haya disminuido, sigue siendo suficiente para construcciones ligeras, que son las que frecuentemente son dañadas.

3.3. Peso específico seco del suelo natural y de la mezcla suelo-polímero. De la Compactación Proctor Modificada que se realizó al suelo natural, se obtuvo un peso específico seco máximo de 1.347 ton/m³ y humedad óptima de 32%. Para la mezcla suelo-polímero, el peso específico seco máximo fue de 1.327 ton/m³ y humedad óptima de 31%. La utilidad de estos datos radica en la necesidad de obtener el mejor acomodo del suelo y poder ensayarlos en esa forma.

3.4. Expansión y consolidación del suelo natural y de la mezcla suelo-polímero. En la prueba de expansión del suelo natural, se obtuvo una deformación máxima promedio de 4,72 mm, determinada en un tiempo de tres semanas, tiempo en el cual la muestra se saturó por completo. Durante las primeras 24 horas en que el suelo entró en contacto con el agua, ya se había presentado el 85% de la deformación máxima que alcanzaría el suelo al término de tres semanas (véase la Figura 2).

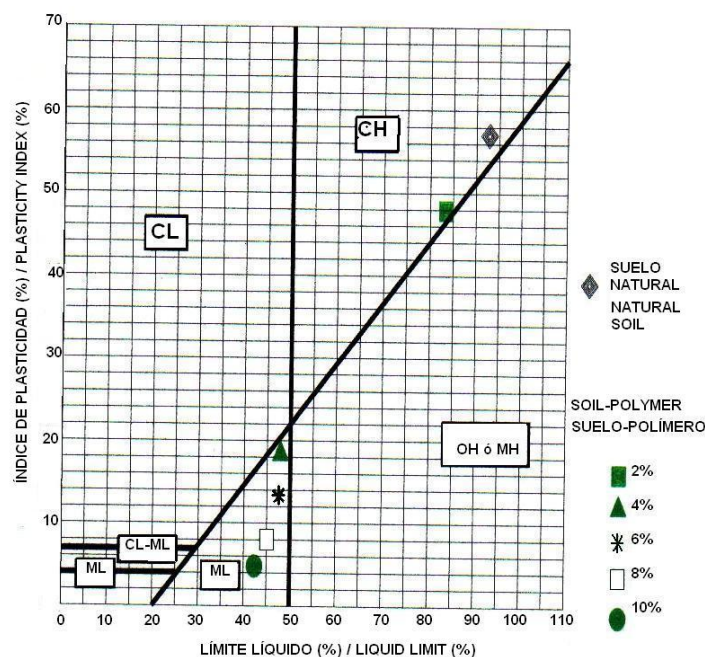


Figura 1. Clasificación del suelo natural y del suelo-polímero.

Con respecto a la prueba de expansión realizada a la mezcla suelo-polímero, se obtuvo una deformación máxima promedio de 2,7 mm, dejándose también las muestras tres semanas para que se saturaran por completo. La mezcla de suelo-polímero alcanzó el 95% de su deformación máxima

en las primeras 24 horas (véase la Figura 2). Y a partir de este tiempo, la mezcla ya no se expandió aún cuando se siguió saturando.

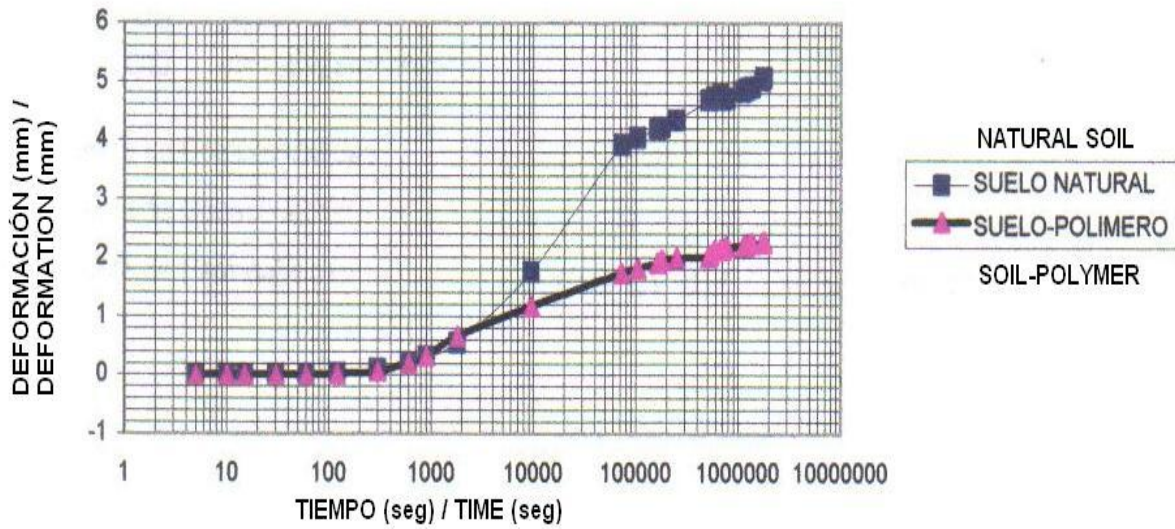


Figura 2. Expansión del suelo natural y suelo-polímero.

De acuerdo con los resultados, se obtuvo un porcentaje de expansión del 46,40% para suelo natural y 26,50% para la mezcla suelo-polímero. También se representaron las curvas de compresibilidad, para el suelo natural y con polímero al 5% (véase la Figura 3).

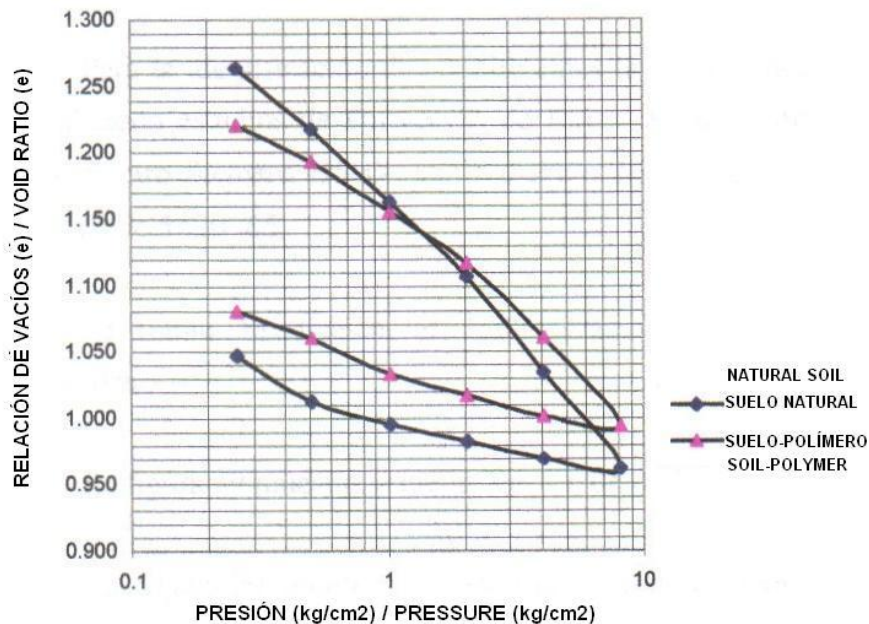


Figura 3. Curvas de compresibilidad del suelo natural y suelo-polímero.

De los resultados de consolidación, se deduce que la mezcla suelo-polímero reduce la

compresibilidad del suelo natural en un 20%, aproximadamente (véase la Figura 3).

4. CONCLUSIONES

El suelo natural es un CH (suelo arcilloso de alta compresibilidad) y el suelo-polímero al 5% ubican a la mezcla en ML (limo de baja compresibilidad), de acuerdo a la clasificación del SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos), lo que significa que esta mezcla reduce su potencial de expansión de alto a bajo [10].

La mezcla suelo-polímero no mejora las propiedades de resistencia, aspecto que no es primordial en un suelo expansivo por presentar frecuentemente altas resistencias.

Uno de los resultados más significativos dentro de esta investigación, es el que se refiere a la expansión. Las pruebas muestran que la mezcla suelo-polímero tiene una reducción en la expansión de alrededor del 40% respecto a la expansión del suelo natural.

De las pruebas de consolidación, se obtuvo que el coeficiente de permeabilidad se reduce con polímero; lo que impide la entrada de agua, disminuyendo los cambios volumétricos del suelo expansivo. Además, el suelo con polímero es menos compresible que el natural, reduciendo significativamente posibles asentamientos.

BIBLIOGRAFÍA

1. Zeevaert L "La Investigación del Suelo por su Estructura y Comportamiento Reológico"; Segunda Conferencia Magistral en el Instituto Politécnico Nacional; México, 1997
2. Katime I "Química Física Macromolecular". Servicio editorial de la Universidad del País Vasco, Bilbao 1994; Martínez de las Marías P "Química y Física de los Altos Polímeros y Materias Plásticas". Editorial Alhambra; 1ª edición, 1972
3. Brandrup J, Immergut EH "Polymer Handbook". 3ª edición, Editorial John Wiley & Sons, 1989
4. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos "Geosintéticos, Geotextiles, y Geomembranas". Memorias del Simposio, México, Julio 1990.
5. López Lara T "Reflexión y Análisis sobre el Tratamiento de Suelos con Diferentes Materiales". Curso Técnicas Modernas de Caracterización en la Ciencia y Tecnología de Suelos Arcillosos; U.A.Q.; Querétaro, México, 1998.
6. López Lara T, Zepeda Garrido JA, Castaño MV "Comparative Study of the effectiveness of different additives on the expansion behavior of clays", Volumen 4, Electronic Journal of Geotechnical Engineering, USA, 1999.
7. Rico Rodríguez A, Del Castillo H "Ingeniería de Suelos Aplicada a las Vías Terrestres". Volumen 2, Editorial Limusa, México, 1998
8. Berry Peter L, Reid D "Mecánica de Suelos", Editorial McGraw-Hill; Santa Fé de Bogotá, Colombia, 1993
9. Zepeda Garrido JA, Castañeda AH "Distribución de suelos expansivos en la República Mexicana", Curso Internacional de Mecánica de Suelos Arcillosos". UAQ, Querétaro, Qro; México, 1992
10. Chen FH "Foundations on Expansive Soils". Elsevier Scientific Publishing Company; Amsterdam, Holanda, 1975