INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

Evaluación de las propiedades mecánicas de suelos estabilizados con un polímero

Natalia Pérez García
Alfonso Pérez Salazar
Paul Garnica Anguas

Publicación Técnica No. 619
Sanfandila, Qro.
2021

ISSN 0188-7297

Esta investigación fue realizada en la Coordinación de Infraestructura del Instituto Mexicano del Transporte, por la Dra. Natalia Pérez García, el Ing. Alfonso Pérez Salazar y el Dr. Paul Garnica Anguas.

Esta investigación es el producto final de los proyectos de investigación externa IE-01/16: Evaluación de un modificador de suelos, IE-15/17: Evaluación del aditivo TECNOSOIL. Segunda Fase e IE-15/18: Evaluación del aditivo TECNOSOIL. Tercera Fase.

Se agradece al Ing. Omar Cravioto por permitir que los resultados de los proyectos se plasmen en este documento.

En los proyectos colaboraron los ingenieros David Leyva, Norma Patricia Curiel Iñiguez y el técnico Miguel A. Cervantes Nieto.

Contenido

	Página
Índice de figuras	v
Índice de tablas	ix
Sinopsis	xi
Abstract	xiii
Resumen ejecutivo	xv
Introducción	1
1. La estabilización de suelos con polímeros	3
1.1. Introducción	3
1.2. ¿Qué son los polímeros?	4
1.3. Mecanismos de estabilización de los polímeros	4
1.4. Estudios que han abordado la estabilización de suelos con polímeros	5
2. Procedimientos de prueba	23
2.1. Procedimientos para la evaluación de las propiedades índice y características de compactación	23
2.2. Preparación de los especímenes de prueba	23
2.2.1. Fabricación de los especímenes de prueba por medio de compactación dinámica (Proyecto 1)	24
2.2.2. Fabricación de los especímenes de prueba por medio de compactación en equipo giratorio (Proyecto 2 y 3)	26
2.2.3. Acondicionamiento de las muestras	27
2.3. Pruebas para determinar propiedades mecánicas	28
2.3.1. Valor de Soporte California (ASTM D1883)	28
2.3.1.1. Espécimen de prueba	28
2.3.1.2. Procedimiento de prueba	29
2.3.1.3. Cálculo	30
2.3.2. Prueba de resistencia en compresión simple (ASTM D2166)	30
2.3.2.1. Preparación de los especímenes de prueba	30
2.3.2.2. Procedimiento	31
2.3.3. Prueba de módulo de resiliencia (NCHRP 1-28A)	31
2.3.3.1. Preparación del espécimen de prueba	31
2.3.3.2. Procedimiento de prueba	32
2.3.4. Procedimiento de deformación permanente	36
2.3.5. Prueba de permeabilidad	37
3. Proyecto 1	39
3.1. Introducción	39
3.2. Muestreo y preparación del suelo en estudio	39

3.3. Determinación de las propiedades índice del suelo en estado natural 41
3.4. Características de compactación del suelo natural 41
3.5. Mezclas de prueba y programa de ensayes 42
3.6. Resultados obtenidos 42
3.6.1. Límites de consistencia 42
3.6.2. Valor de Soporte California (CBR) 43
3.6.3. Resistencia en compresión simple 45
3.6.4. Módulo de resiliencia 49
3.6.5. Deformación permanente 51
4. Proyecto 2 55
4.1. Material en estudio y características 55
4.2. Curva de compactación 56
4.3. Mezclas de prueba 56
4.4. Resultados de las pruebas 56
4.4.1. Valor de Soporte California (CBR) 56
4.4.2. Resistencia en compresión simple 57
4.4.3. Módulo de resiliencia 60
4.4.4. Deformación permanente 63
4.4.5. Permeabilidad 66
5. Proyecto 3 69
5.1. Introducción 69
5.2. Suelo 1 69
5.2.1. Propiedades y características de compactación 69
5.2.2. Evaluación de la resistencia en compresión simple 71
5.2.2.1. Procedimiento de preparación de los especímenes 71
5.2.2.2. Resultados de resistencia en compresión simple de muestras que se secan 73
5.2.2.3. Resultados de resistencia en compresión simple de muestras que se humedecen 75
5.2.2.4. Resultados de CBR 78
5.3. Suelo 2 79
5.3.1. Descripción del suelo y granulometría 79
5.3.2. Curva de compactación 80
5.3.3. Evaluación de la resistencia en compresión simple 81
5.3.3.1. Elaboración de los especímenes de prueba 81
5.3.3.2. Ensaye de los especímenes 82
5.3.3.3. Resultados de resistencia en compresión simple 82
5.3.4. Resultados de CBR 85
6. Conclusiones 87
Bibliografía y Referencias 89

Índice de figuras

		Página
Figura 1.1.	Efecto del tiempo entre mezclado y compactación para la arcilla NoVa	5
Figura 1.2.	Efecto del tiempo entre mezclado y compactación para la arcilla Staunton	6
Figura 1.3.	Tiempo de curado contra resistencia en compresión para el suelo Staunton (óptimo de compactación) (3% de polímero)	6
Figura 1.4.	Arena estabilizada con polímero sintético	7
Figura 1.5.	Resultados de resistencia en compresión de muestras secadas y muestras secadas y humedecidas (resultados de Santoni et al., 2005)	8
Figura 1.6.	Resultados de límites de consistencia de muestras con y sin polímero	9
Figura 1.7.	Resultados de expansión libre de muestras con y sin polímero	9
Figura 1.8.	Gráficas realizadas con los datos de Reza y Shahaboddin (2010)	10
Figura 1.9.	Resultados de resistencia en compresión de dos suelos estabilizados con polímero (Kolay et al., 2016)	11
Figura 1.10.	Fotografías de la arena de duna con y sin polímero	12
Figura 1.11.	Resultados de permeabilidad de arena con y sin polímero	13
Figura 1.12.	Resultados de resistencia en compresión simple y módulo de elasticidad de muestras de arena de médano con polímero	13
Figura 1.13.	Figura realizada con los resultados de Naeini et al. (2012)	14
Figura 1.14.	Pruebas de compresibilidad en suelo con y sin polímero	15
Figura 1.15.	(a) Resistencia en compresión simple del suelo-polímero; (b) comportamiento de las muestras con y sin humedecimiento	16
Figura 1.16.	Fotografías del suelo con y sin polímero	16
Figura 1.17.	(a) Resultados de resistencia en compresión; 3 g/cm^3 de poliuretano; (b) Resultados de resistencia en compresión simple; 5 g/cm^3 de poliuretano	17
Figura 1.18.	(a) Variación del peso volumétrico de acuerdo con la cantidad de polímero; (b) Contenido de agua óptimo normalizado con respecto a la cantidad de polímero.	18
Figura 1.19.	Pruebas Proctor estándar para el suelo A y B	19

Figura 1.20.	Resultados de resistencia en compresión simple del suelo A	19
Figura 1.21.	Resultados de resistencia en compresión simple del suelo B	20
Figura 1.22.	(a) Resultados de resistencia en compresión simple: (b) Pérdida de resistencia por humedecimiento	21
Figura 2.1.	Preparación de la mezcla suelo-agua-polímero	24
Figura 2.2.	Esquema del molde y pisón de compactación	25
Figura 2.3.	Proceso de fabricación de los especímenes	25
Figura 2.4.	Extracción, enrase y medición de las características del espécimen compactado	26
Figura 2.5.	Fabricación de los especímenes en el compactador giratorio	26
Figura 2.6.	Registro de peso y dimensiones del espécimen	27
Figura 2.7.	Humedecimiento o secado de los especímenes	27
Figura 2.8.	(a) Papel filtro sobre el disco poroso de la base; (b) Papel filtro húmedo sobre la muestra; (c) Molde con collarín	37
Figura 2.9.	Sistema para medir la permeabilidad	38
Figura 3.1.	Aspecto del polímero en estudio	39
Figura 3.2.	Material de la excavación del HVS	40
Figura 3.3.	Cuarteo y mezclado del material	40
Figura 3.4.	Curva de compactación del suelo natural	41
Figura 3.5.	(a) Agua y polímero; (b) Solución de agua-polímero; (c) Adición de solución al suelo; (d) Mezcla de suelo-agua-polímero; (e) compactación de la muestra; (f) secado de la muestra al ambiente; (g) saturación durante 96 horas y (h) aplicación de carga para determinar CBR	44
Figura 3.6.	CBR del suelo y del suelo-polímero	44
Figura 3.7.	Humedecimiento o secado de los especímenes	45
Figura 3.8.	Curvas esfuerzo-deformación de especímenes ensayados después de haber sido compactados	46
Figura 3.9.	Curvas esfuerzo-deformación de especímenes ensayados después de haber sido secados durante 7 días	47
Figura 3.10.	Curvas esfuerzo-deformación de especímenes ensayados después de haber sido secados durante 28 días	47
Figura 3.11.	Curvas esfuerzo-deformación de especímenes ensayados después de haber sido humedecidos 14 días	47
Figura 3.12.	Resumen de las resistencias en compresión simple	48
Figura 3.13.	Módulos de resiliencia de muestras después de compactadas	49
Figura 3.14.	Módulos de resiliencia de muestras secadas durante 7 días	50
Figura 3.15.	Módulos de resiliencia de muestras secadas durante 28 días	50

Figura 3.16. Módulo de resiliencia de muestras humedecidas durante 14 días 51
Figura 3.17. Muestras ensayadas después de compactar. (a y b) Muestras de suelo natural; (c y d) Muestras de suelo-polímero 52
Figura 3.18. (a y b) 7 días de secado; (c y d) 28 días de secado; (e y f) 14 días de humedecimiento 53
Figura 3.19. Resumen de los valores de deformación permanente en el ciclo 20000 54
Figura 4.1. Curva granulométrica del suelo natural 55
Figura 4.2. Curva de compactación del suelo natural 56
Figura 4.3. CBR del suelo natural y del suelo-polímero 57
Figura 4.4. Resistencia en compresión simple de especímenes de suelo natural y suelo-polímero 58
Figura 4.5. Resistencia en compresión de especímenes de suelo estabilizado con polímero. Muestras que se almacenan después de compactarse 58
Figura 4.6. Resistencia en compresión simple de muestras secadas y humedecidas 59
Figura 4.7. Absorción de agua de especímenes con polímero y un espécimen de suelo natural 59
Figura 4.8. Falla de los especímenes humedecidos 60
Figura 4.9. Módulos de resiliencia de suelo natural 61
Figura 4.10. Módulos de resiliencia de suelo-polímero 61
Figura 4.11. Módulos de resiliencia de suelo-polímero. Muestras almacenadas a diferentes tiempos 62
Figura 4.12. Módulos de resiliencia de suelo-polímero. Muestras secadas y posteriormente humedecidas 63
Figura 4.13. Pruebas de deformación a 20000 ciclos de carga para especímenes con y sin polímero 64
Figura 4.14. Prueba de deformación a 20000 ciclos de carga para especímenes con y sin polímero. 14 días de secado. 64
Figura 4.15. Pruebas de deformación a 20000 ciclos de carga para muestras con polímero. 14 días de secado-14 días de humedecimiento-14 días de almacenamiento 65
Figura 4.16. Resumen de las pruebas de deformación permanente de las tres condiciones estudiadas 65
Figura 4.17. Agua que fluye durante la prueba de permeabilidad. (a) Espécimen de suelo-polímero ensayado inmediatamente; (b) Espécimen de suelo-polímero ensayado después de 7 días de secado 67
Figura 5.1. Curvas granulométricas de los materiales por separado y la mezcla arena-suelo 70
Figura 5.2. Curva de compactación Proctor estándar de la mezcla arena-suelo 70
Figura 5.3. Preparación de la mezcla suelo-agua-polímero (6, 8 y 10% de polímero) 71

Figura 5.4.	Fabricación de los especímenes en el compactador giratorio	71
Figura 5.5.	Registros de peso y dimensiones de los especímenes	72
Figura 5.6.	Secado y humedecimiento de especímenes	72
Figura 5.7.	Resultados de resistencia en compresión simple de muestras que se secan	74
Figura 5.8.	Porcentajes de pérdidas de agua para los diferentes tiempos de secado y cantidades de polímero estudiadas	74
Figura 5.9.	Resistencia en compresión simple de especímenes que se secan. Graficados por tiempo de secado	75
Figura 5.10.	Resultados de resistencia en compresión simple de especímenes cuyo ciclo fue secado-humedecimiento-almacenamiento	76
Figura 5.11.	Resultados de resistencia en compresión simple de especímenes que se secan, humedecen y secan nuevamente	77
Figura 5.12.	Resultados de CBR para las diferentes condiciones de ensaye	78
Figura 5.13.	CBR del suelo con y sin polímero. Ensayes sin saturación	79
Figura 5.14.	Materiales colocados en la sección de pavimento de concreto	79
Figura 5.15.	Granulometría de la base utilizada en la sección del pavimento	80
Figura 5.16.	Curva de compactación de la base	80
Figura 5.17.	Preparación de la mezcla suelo-polímero para alcanzar el contenido de agua óptimo	81
Figura 5.18.	Compactación de especímenes de prueba	81
Figura 5.19.	Ensaye de compresión simple	82
Figura 5.20.	Resistencia en compresión simple de la base con y sin polímero y tres tiempos de secado	83
Figura 5.21.	Resistencia en compresión simple de la base con y sin polímero. Condición de humedecimiento posterior al secado	84
Figura 5.22.	Resistencia en compresión simple de la base con y sin polímero. Condición de secado-humedecimiento-secado	85
Figura 5.23.	Valores de CBR de la base natural y estabilizada con polímero para cuatro tiempos de secado	86
Figura 5.24.	CBR con y sin saturación para la base granular	86

Índice de tablas

		Página
Tabla 2.1.	Procedimientos de prueba para determinación de propiedades índice	23
Tabla 2.2.	Procedimiento 1b. Secuencia de prueba	33
Tabla 2.3.	Procedimiento II. Subrasante de suelo cohesivo	36
Tabla 3.1.	Resumen de las propiedades del suelo en estudio	41
Tabla 3.2.	Mezclas de estudio	42
Tabla 3.3.	Pruebas con suelo-polímero y suelo natural	42
Tabla 3.4.	Límites de consistencia	43
Tabla 3.5.	Características de los especímenes	46
Tabla 3.6.	Características de las muestras ensayadas en módulo de resiliencia	49
Tabla 3.7.	Características de las muestras ensayadas en deformación permanente	52
Tabla 4.1.	Resumen de las propiedades del suelo en estudio	55
Tabla 4.2.	Valores de permeabilidad	66
Tabla 4.3.	Clasificación de los suelos de acuerdo a la permeabilidad	66
Tabla 5.1.	Propiedades de los suelos individuales y la mezcla arena-suelo	70
Tabla 5.2.	Resumen de los contenidos de agua iniciales y finales de los especímenes que se secan	73
Tabla 5.3.	Incrementos en resistencia dependiendo del tiempo de secado y cantidad de polímero	83

Sinopsis

En este documento se presentan tres estudios en los que se evaluó un polímero como estabilizador de suelos. Este polímero fue desarrollado por ingenieros mexicanos.

Se presentan tanto los procedimientos de prueba utilizados en la evaluación del polímero; se describen los suelos de prueba y los resultados obtenidos.

En los tres proyectos se observó que hay condiciones bajo las cuales el polímero potencializa de forma importante las propiedades mecánicas de los suelos estudiados. De hecho, para la condición en donde se ve efecto positivo del polímero es cuando después de compactar la mezcla, a ésta se le permite secado. Sin embargo, las propiedades se potencializan de forma importante cuando a la mezcla suelo-polímero se le permite secado durante 28 días.

Por otro lado, si la mezcla suelo-polímero absorbe agua y no la pierde, las propiedades mecánicas se ven perjudicadas. Por ejemplo, la resistencia del material se reduce. Pero si la mezcla suelo-polímero que absorbe agua la pierde posteriormente, la resistencia, por el contrario, parece incrementarse ligeramente.

De los proyectos desarrollados, se observa que el secado posterior a la compactación de la mezcla es clave en el desempeño del material.

Abstract

This document presents three studies in which a polymer was evaluated as a soil stabilizer. This polymer was developed by Mexican engineers.

The document first shows the test procedures used in the evaluation of the polymer. After that, the test soils are described, and finally, the results obtained are discussed and final conclusions are presented.

In all three projects, it was observed that there are conditions under which the polymer significantly enhances the mechanical properties of the soils studied. In fact, the condition where a positive effect of the polymer is seen is when the soil is allowed to dry after compaction. In the same sense, the properties are significantly enhanced when the soil-polymer mixture is allowed to dry for 28 days.

On the other hand, if the soil-polymer mixture absorbs water and does not lose it, the mechanical properties are degraded. For example, the strength of the material is reduced. But if the soil gains and loses water, the strength is not lost and it seems to increase a little.

From the projects developed, it is observed that the drying after the compaction of the mixture is key to the performance of the mixture.

Resumen ejecutivo

Los polímeros se ofertan como aditivos estabilizadores de suelos en varios países y México no es la excepción. En México, se ha desarrollado un polímero que, de acuerdo con su distribuidor, mejora varias propiedades de suelos y materiales granulares. El Instituto Mexicano del Transporte ha estado evaluando este polímero desde 2016 para verificar su comportamiento en conjunto con el suelo. En este documento se presentan los resultados de tres proyectos que se han desarrollado a la fecha para evaluarlo.

El capítulo 1 del documento presenta los antecedentes de la evaluación de polímeros como estabilizadores de suelos. De los estudios consultados se observó que los investigadores han utilizado las siguientes características para verificar el comportamiento de la mezcla suelo-polímero:

- Límites de consistencia
- Curvas de compactación
- Resistencia en compresión simple
- Compresibilidad
- Expansión
- Durabilidad en humedecimiento-secado
- Durabilidad en congelamiento-descongelamiento
- Fotografías de la microestructura
- Conductividad hidráulica
- California Bearing Ratio (CBR)
- Expansión libre, etc.

Además, se han estudiado diferentes condiciones de curado, es decir, en algunos casos las muestras se almacenaron posterior a la compactación, en otros casos, las muestras se secaron, en otros, las muestras se humedecieron, etc. En algunos estudios se ha encontrado que los polímeros sí mejoran las propiedades del o de los suelos estudiados; en otros, no se observaron diferencias importantes. Y en otros han encontrado que el secado de la mezcla es punto clave del comportamiento.

En el capítulo 2 del documento se presentan los principales procedimientos de prueba seguidos en la evaluación del polímero. Ellos son: Preparación de especímenes, evaluación de CBR de acuerdo con la norma ASTM D1883; determinación de la resistencia en compresión simple con procedimiento ASTM D2166; módulo de resiliencia de acuerdo con protocolo NCHRP 1-26A, deformación permanente y permeabilidad con procedimiento ASTM D5856.

En los capítulos 3, 4 y 5 se presentan los tres proyectos. Cada capítulo está dedicado a un proyecto; se manejaron en capítulos por separado ya que en cada proyecto se fueron modificando las propiedades estudiadas. Por ejemplo, el proyecto uno es el que menos pruebas tiene, pero a medida que se fue teniendo más conocimiento del polímero, se adicionaron o quitaron pruebas. Esto tenía la finalidad de que se obtuvieran resultados más contundentes, aunque fueran menos pruebas las que se realizaran. En cada proyecto se observaron condiciones bajo las cuales, aplicar el polímero es ventajoso, debido al incremento en una o varias propiedades mecánicas.

En el proyecto 1 en donde se usó una arena limosa y 6% de polímero, se encontró que los límites de consistencia se ven ligeramente incrementados con el polímero. En cuanto a CBR, el del suelo-polímero se incrementó 22% con respecto al del suelo natural. Con respecto a la resistencia en compresión simple, ésta indicó que cuando los especímenes de suelo polímero se secaron por 7 o 28 días, la resistencia sí es superior a la mostrada por el suelo natural. Sin embargo, cuando los especímenes se humedecen durante 14 días (ya sea el suelo natural o el suelo-polímero), éstos pierden la mayor parte de su resistencia. Cabe aclarar que los especímenes sometidos a humedecimiento no se secaron previo al humedecimiento.

En las pruebas de módulo de resiliencia no se obtuvieron mayores diferencias. Con respecto a la deformación permanente, se observó que para suelo natural o suelo-polímero y para 7 o 28 días de secado, se obtuvieron deformaciones permanentes similares; en el caso de especímenes ensayados inmediatamente después de compactarse y los que se humedecieron, al parecer los de suelo-polímero proporcionan mayores deformaciones permanentes.

En el proyecto 2 (capítulo 4) se presenta la segunda etapa de la evaluación del polímero. En éste se informa sobre los resultados obtenidos de propiedades índice y mecánicas obtenidas en una arena limosa mal graduada (SP-SM), con y sin polímero. De los resultados se puede concluir que polímero sí mejora sustancialmente las propiedades mecánicas del suelo natural cuando se permite secado después de la compactación; cuando el material estabilizado absorbe agua, las propiedades mecánicas que habían sido mejoradas se degradan, sin embargo, el suelo natural bajo las mismas condiciones pierde completamente su rigidez y colapsa.

Del proyecto 3 (capítulo 5) se muestran los resultados de la evaluación del polímero en dos materiales. Un material tipo subrasante y uno tipo base granular. Con los resultados obtenidos nuevamente se concluye que hay condiciones bajo las cuales el polímero mejora de forma importante la resistencia en compresión simple y el valor de soporte California.

Posterior a la presentación de los resultados de cada proyecto, se finaliza con las conclusiones a las que se ha llegado después del desarrollo de los trabajos. Cabe señalar que aun cuando este polímero se ha estudiado en tres proyectos, en el

futuro se llevarán a cabo otros proyectos para poder determinar el comportamiento en otro tipo de suelos (como, por ejemplo, las bases y subbases granulares).

Introducción

El mercado de los aditivos está abarrotado de varios productos a los que en la actualidad se les categoriza como tradicionales y no tradicionales. En los no tradicionales se tienen varios productos químicos líquidos los cuales son diluidos en el agua de compactación y esparcidos en suelo por tratar antes de la compactación (Rauch et al. 2002). A pesar de que estos productos pueden tener ventajas, la falta de aceptación se debe a (Rauch et al. 2002):

- La falta de publicaciones independientes, ya que la información proporcionada por los distribuidores se ve con escepticismo,
- No se tienen resultados de tramos de prueba de campo,
- Faltan procedimientos de prueba de laboratorio que puedan utilizarse efectivamente para predecir el comportamiento de campo,
- Los resultados positivos o negativos obtenidos en laboratorio son algunas veces cuestionados como estimadores del comportamiento de campo, ya que las preparaciones de laboratorio no simulan las condiciones de campo,
- La información proporcionada por el distribuidor es muchas veces inadecuada. Los fabricantes consideran que la composición química de sus productos es de su propiedad, lo que hace más difícil evaluar el mecanismo de estabilización y predecir beneficios potenciales en campo,
- Los distribuidores y los aditivos aparecen y desaparecen, o cambian nombres de forma regular, haciendo más difícil que una agencia desarrolle confianza en un producto a través de la experiencia a largo plazo.

Debido a todo lo anterior, es recomendable que los productores de aditivos soliciten que sus productos sean evaluados por organismos independientes, pero que, además, permitan que los resultados sean publicados para que se genere la información que la comunidad ingenieril requiere para determinar en qué casos los productos pueden ser utilizados.

En este documento se presentan los estudios realizados para un polímero. Esperando que la información sea útil y contribuya a la ampliación del conocimiento de los suelos estabilizados con aditivos no tradicionales.

1. La estabilización de suelos con polímeros

1.1. Introducción

El mejoramiento de las propiedades de los suelos se puede hacer mediante dos métodos: estabilización mecánica y estabilización química. La primera se refiere a un proceso de alteración de las propiedades del suelo cambiando su granulometría (mezclando con otros suelos) y posteriormente densificando por medio de un proceso de compactación. El segundo método promueve un cambio en las propiedades del suelo adicionando productos químicos como cemento, cenizas volantes, cal, o una combinación de estos[1].

La estabilización química usa químicos y emulsiones como ayuda en la compactación. Estos pueden ser agentes repelentes de agua o agentes de unión. El material químico más efectivo será el que proporcione una matriz rígida y no soluble en agua. Un ejemplo es la estabilización con polímeros, la cual tiene la ventaja que son baratos y son menos peligrosos para el ambiente comparado con otras soluciones (Swain, 2015).

En los últimos años han aparecido en el mercado varios aditivos no tradicionales que pueden agruparse como sigue:

- Cloruros: Cloruros, sales, cloruro de calcio, cloruro de magnesio, cloruro de sodio.
- Aditivos de arcilla: Aditivos de arcilla, arcilla, filler, bentonita, montmorilonita.
- Emulsiones electrolíticas: Emulsiones enzimáticas, enzimas.
- Lignosulfonatos: Lignosulfonatos, lignina, sulfato de lignina, sulfitos de lignina.
- Emulsiones sintéticas de polímero: acetato de polivinilo, acrílico de polivinilo.
- Emulsiones de resinas de árboles: emulsiones de aceites, emulsiones de alquitrán de pino.

Muchos de estos productos son anunciados como:

- Se requiere una cantidad pequeña de aditivo y tiempos de curado cortos;
- Proporcionan altas resistencias y durabilidad superior.

Debido a la poca investigación de varios de estos productos es difícil decidirse por el uso de ellos, ya que algunos se comportan bien en ciertos tipos de suelos o ambientes, pero se comportan mal en otros. Por otro lado, por su reciente introducción se desconocen los mecanismos de estabilización, etc. (U.S. Department of Agriculture, 2009).

La información concerniente a estos nuevos aditivos son videos, folletos, etc. que testifican los beneficios del producto, pero este tipo de información es subjetiva, ya que las propiedades ingenieriles no han sido bien documentadas (Santoni et al., 2003). Santoni et al (2003) indican que el U.S. Army, muchas veces requiere pistas de aterrizaje de construcción rápida, por lo que se requiere aplicar productos de curado rápido. Indican que el cemento requiere un curado de 28 días para conocer su efecto, sin embargo, para el caso mencionado (pistas), se necesita conocer las propiedades de los materiales en plazos más cortos (de 1 a 7 días).

Debido a la falta de información de los aditivos no tradicionales, uno de los retos que los ingenieros enfrentan en campo es decidir rápidamente qué aditivo aplicar y la cantidad de éste.

Por la problemática a la que se enfrentan los distribuidores y fabricantes de aditivos, varios de ellos se han acercado al Instituto Mexicano del Transporte para que se investiguen las propiedades de algunos suelos una vez que son estabilizados con su producto. De esta forma se puede demostrar con pruebas más contundentes la ventaja del uso del producto.

Uno de los aditivos que se ha venido evaluando desde 2016 en el Instituto Mexicano del Transporte es un polímero. En este documento se muestran los resultados que se han obtenido en tres proyectos; en cada uno de ellos se ha evaluado uno o dos suelos.

1.2. ¿Qué son los polímeros?

Los polímeros consisten en cadenas largas de hidrocarburos. Estos materiales son fácilmente modificados, dando como resultado combinaciones sin fin de polímeros utilizados en diferentes industrias. Muchos de estos (ya sean aniónicos, catiónicos o no iónicos) han sido propuestos como estabilizadores (Ingles y Metcalf, 1973; citados por Dhakad y Trivedi, 2018).

1.3. Mecanismo de estabilización de los polímeros

Varios estudios han determinado que la mayor parte de los estabilizadores químicos reaccionan con el suelo en dos formas: el aditivo se basa en reacciones químicas específicas con las partículas de suelo, o los aditivos proporcionan estabilización física a través del uso de agentes de unión. Los polímeros caen dentro de la segunda categoría (Tingle et al., 2007; citado por Dhakad y Trivedi, 2018).

Los polímeros más comúnmente utilizados en la estabilización de suelos son el acetato de vinil o acrílico basado en copolímeros. Estas emulsiones de polímeros

consisten generalmente de 40-50% de partículas sólidas con respecto a peso de la emulsión (Newman y Tingle, 2004; Tingle et al., 2007). Los copolímeros acrílicos se dispersan en una emulsión polímerica por surfactantes, o agentes de humedecimiento cuando se mezclan con el suelo. El polímero se cura entonces por evaporación del agua, y el polímero que queda se une para formar una película continua de polímero alrededor del agregado. Estas ligas crean resistencia adicional entre las partículas de suelo. Debido a que el mecanismo principal del polímero es formar ligas físicas, la mejora en resistencia depende de la capacidad del polímero para recubrir las partículas. Por lo tanto, los polímeros son menos efectivos en suelos finos debido a la alta superficie específica (Tingle et al., 2007).

1.4. Estudios que han abordado la estabilización de suelos con polímeros

En la literatura existen varios estudios en los que se ha evaluado el comportamiento de las mezclas de suelo-polímero. En los siguientes párrafos se resumen algunos de ellos.

Geiman et al. (2005) llevaron a cabo un estudio de estabilización de tres suelos y seis tipos de estabilizantes (aquí solo se comenta lo referente al polímero). Los suelos estudiados fueron dos arcillas y una arena.

Uno de los primeros aspectos que estudiaron los autores fue el efecto del tiempo entre el mezclado del suelo con el aditivo y su compactación. Para esto, prepararon mezclas suelo-aditivo y se dejaron reposar por diferentes tiempos. Posteriormente compactaron especímenes y determinaron la resistencia en compresión simple.

Los resultados para el polímero indicaron que el tiempo que pasa entre el mezclado del aditivo y la compactación tiene poco efecto para el caso de las arcillas estudiadas (Figura 1.1 y 1.2).

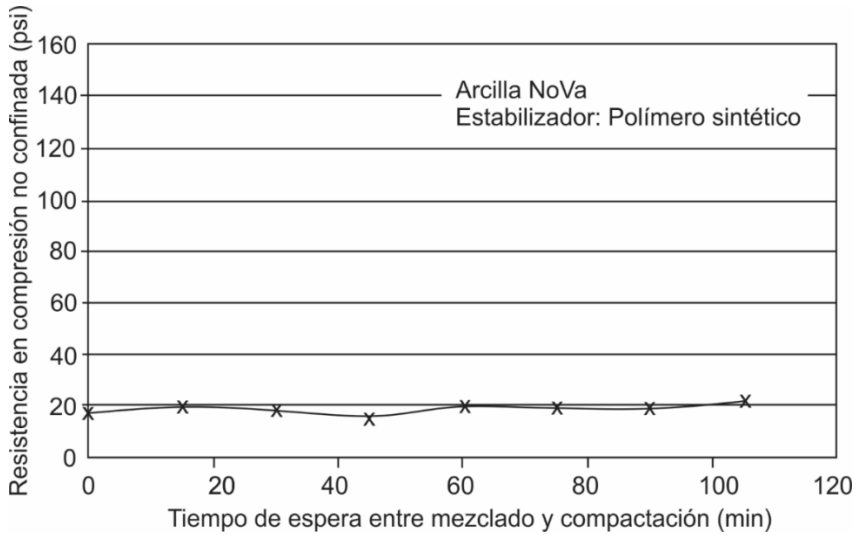


Figura 1.1. Efecto del tiempo entre mezclado y compactación para la arcilla NoVa

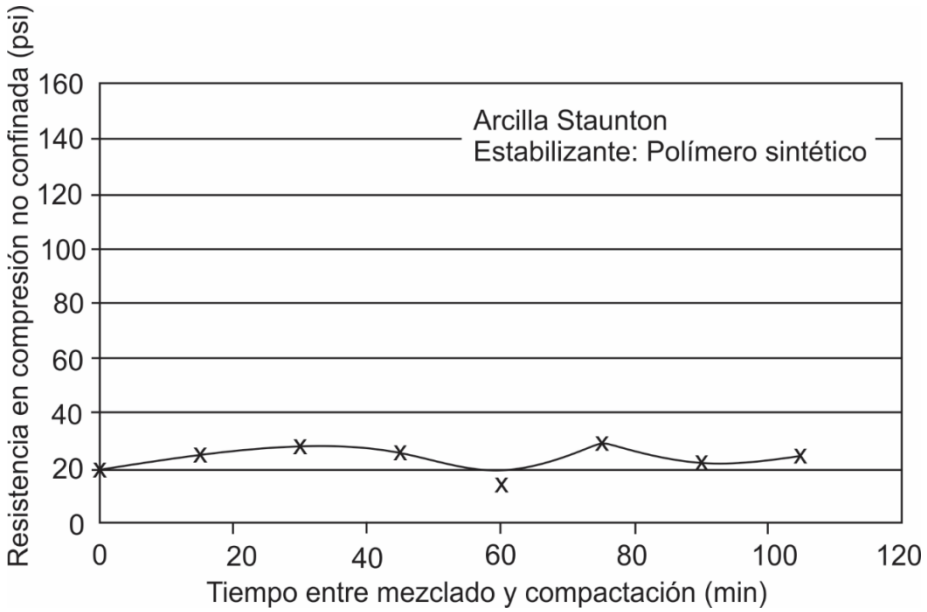


Figura 1.2. Efecto del tiempo entre mezclado y compactación para la arcilla Staunton

La investigación medular de estos autores fue la determinación de la resistencia a compresión no confinada de muestras estabilizadas con los diferentes estabilizadores y curadas a diferentes tiempos. En cuanto al polímero sintético, no se observó un cambio importante en la resistencia de muestras con o sin el polímero (Figura 1.3). Eso indicó que la resistencia parece ser independiente del tiempo de curado.

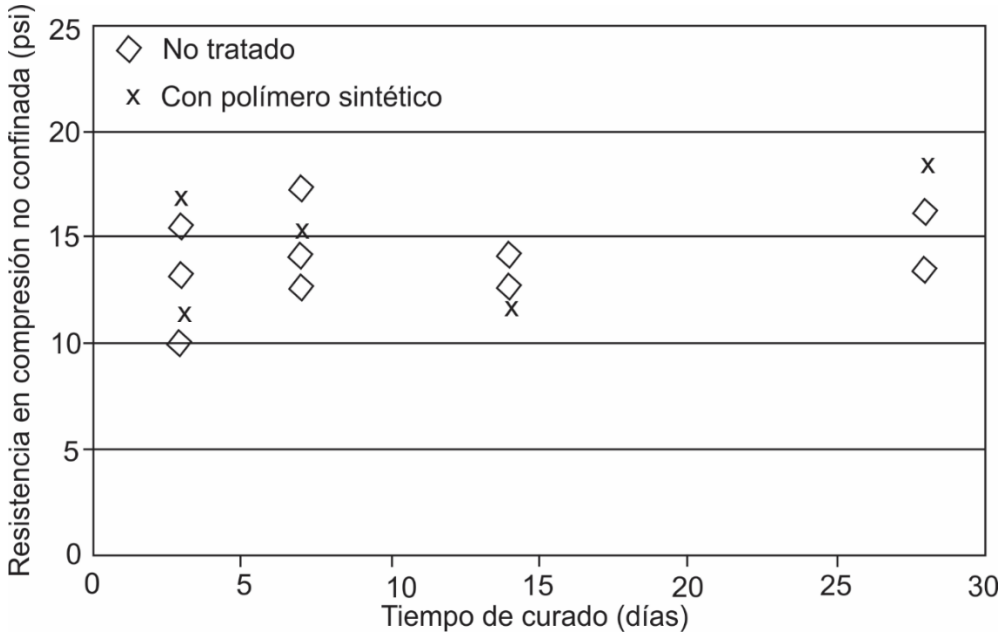


Figura 1.3. Tiempo de curado contra resistencia en compresión para el suelo de Staunton (óptimo de compactación) (3% de polímero)

En la misma investigación también realizaron el mismo experimento, pero con la arena Linchburg. En esta sí se observó incremento en la resistencia cuando se agregó 2 y 3% de polímero sintético. Cabe señalar, que las resistencias son similares para 2 o 3% de polímero. Asimismo, se observa que el tiempo de curado presentó efecto marginal (Figura 1.4).

Los autores concluyeron que quizá la resistencia de las muestras con polímero no incrementó de forma importante ya que no se permitió secado de ellas, lo cual hizo que el agua obstaculizara la formación de las ligas entre el suelo y el polímero.

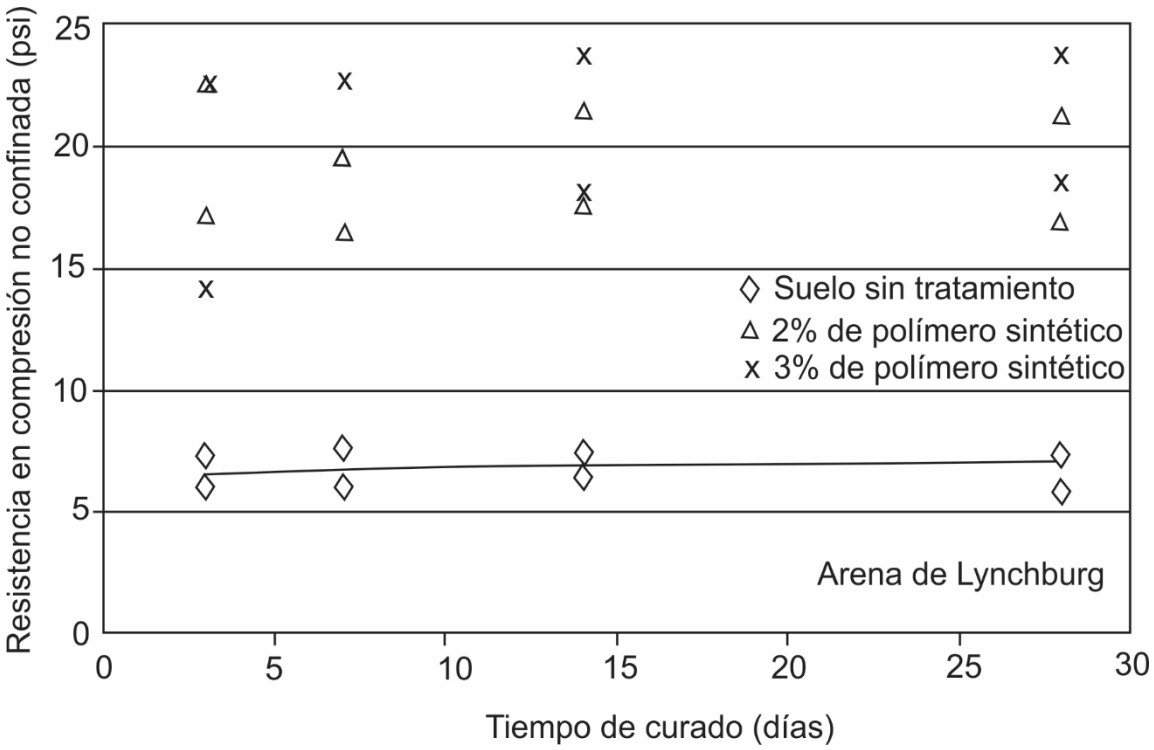


Figura 1.4. Arena estabilizada con polímero sintético

Por su lado, Santoni et al. (2005) también estabilizaron una arena limosa (formada por 34% grava, 46% arena y 20 % de material más fino que la malla No. 200) con varios aditivos no tradiciones. Estos fueron lignosulfatos, polímeros, silicato y tres resinas. En esta investigación se compactaron 6 muestras de cada mezcla en equipo giratorio. Tres muestras de cada grupo fueron ensayadas después de secadas durante cierto periodo; otras tres fueron ensayadas después de que cumplieron su tiempo de curado y después fueron humedecidas para que pudiera observase la susceptibilidad a la humedad.

La Figura 1.5 ilustra los resultados mostrados por Santoni et al. (2005). Estos indican que la resistencia en compresión simple se incrementa con el tiempo de secado; para un día de secado se observa que sólo el polímero tres incrementa de forma importante la resistencia; para siete días de secado sólo el polímero dos muestra una resistencia mayor a la del suelo natural.

Para la condición de humedecimiento, los dos tiempos de curado muestran que la resistencia se reduce a valores más pequeños cuando a las muestras solo se les permitió un día de secado previo al humedecimiento. Para la condición de humedecimiento pero con especímenes con 7 días de secado previos, el polímero tres indica una mayor resistencia.

Es importante señalar que hay polímeros como el 1, 2, 4, 5 y 6 que al parecer hacen que la resistencia se reduzca (7 días de secado). Santoni et al (2005) comentan en su artículo que los polímeros 5 y 6 fueron desarrollados para control de polvo, por lo tanto, esto explicaría el por qué la resistencia no se incrementa.

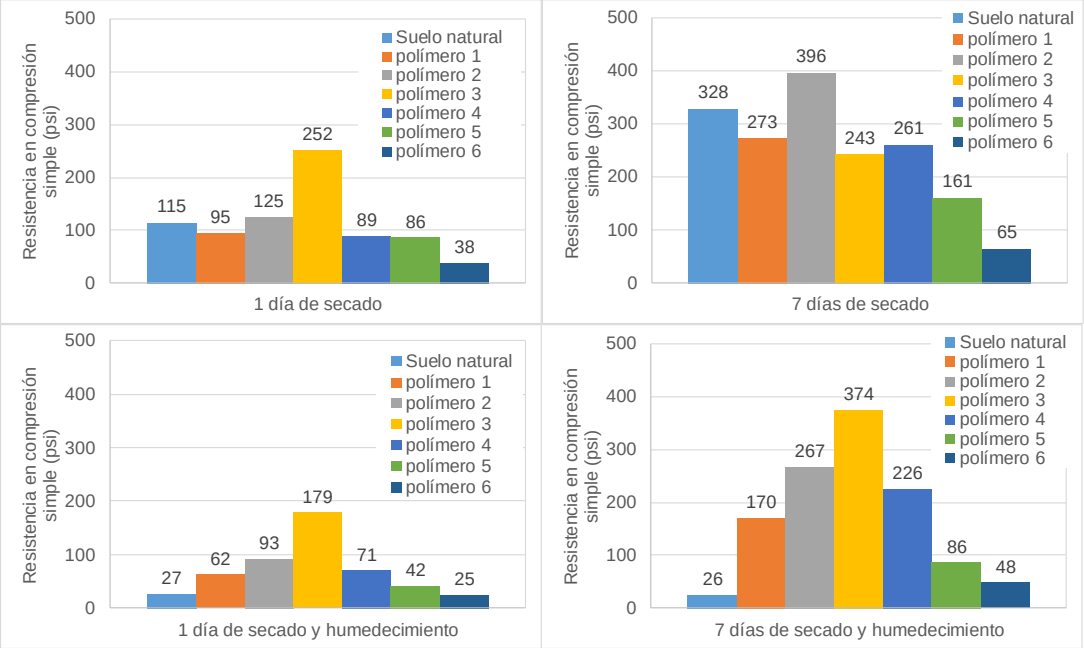


Figura 1.5. Resultados de resistencia en compresión de muestras secadas y muestras secadas y humedecidas (resultados tomados de Santoni et al. 2005)

Otro estudio fue desarrollado por Rauch et al (2002). Estos investigadores estudiaron el efecto de tres estabilizantes líquidos (un iónico, polímero y una enzima) en cinco suelos. Tres de los suelos fueron clasificados como CH, un suelo como MH y otro como CL.

Los especímenes de prueba utilizados en la investigación fueron compactados con contenido de agua óptimo con respecto a la prueba Proctor modificada. Los especímenes se compactaron en el molde Proctor, se extrajeron y se guardaron durante 7 días. Previo a los ensayes, se labraron especímenes de las dimensiones adecuadas. Para los límites de consistencia, solo se preparó el suelo con y sin los aditivos; se almacenaron y no se compactaron. Aunque los autores obtuvieron resultados para los tres líquidos estabilizantes, aquí solo se hace referencia a los resultados obtenidos con suelo no tratado y el suelo tratado con el polímero.

La Figura 1.6 muestra los resultados de límites de consistencia para los cinco suelos. Si se observan los índices de plasticidad obtenidos en muestras con y sin polímero, ellos son similares. Por lo que, para este tipo de prueba, el adicionar polímero no indicó cambios importantes.

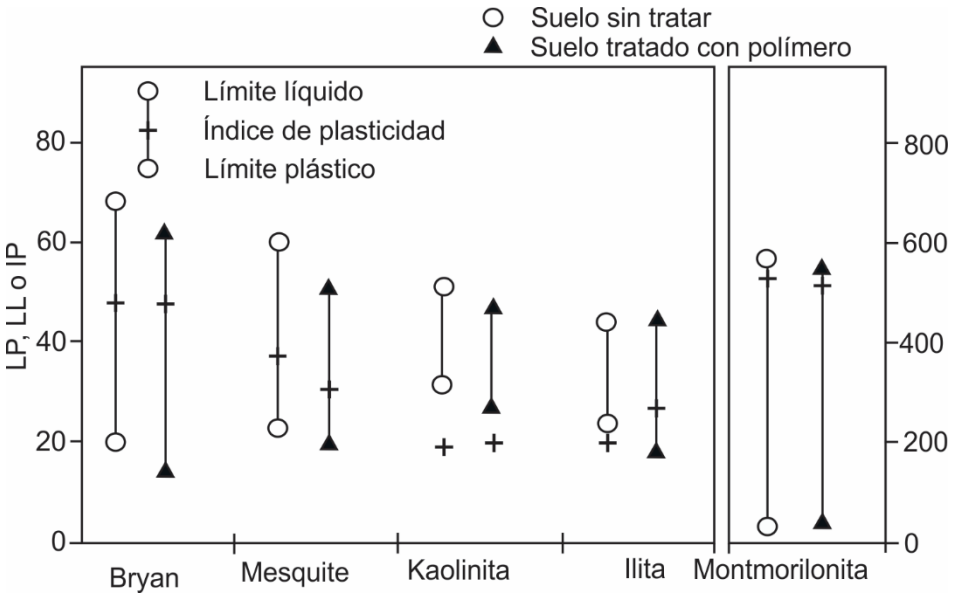


Figura 1.6. Resultados de límites de consistencia de muestras con y sin polímero

En cuanto a las pruebas de expansión libre en consolidometro, los resultados indicaron que el polímero redujo la expansión en un 10% para la montmorilonita. El polímero también redujo la expansión en los suelos de Mesquite y en la ilita. En la caolinita y en el suelo de Bryan, por el contrario, la expansión se incrementó (Figura 1.7).

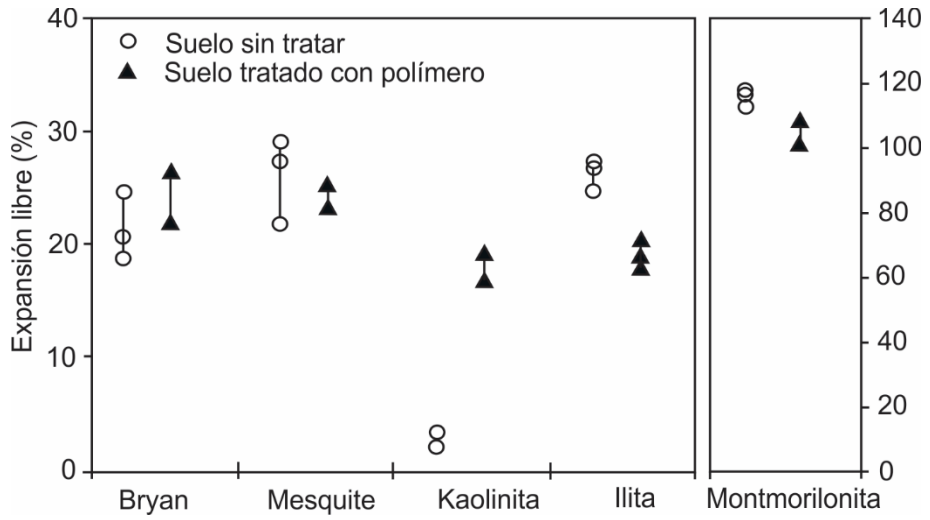


Figura 1.7. Resultados de expansión libre de muestras con y sin polímero

Con respecto a resistencia no consolidada-no drenada, los autores comentan que los especímenes de cada grupo presentaron variaciones importantes en sus características, pero además señalaron que los resultados no mostraron cambios importantes debido a la adición de los aditivos líquidos. En las conclusiones los autores indican que se utilizaron las cantidades de aditivo especificadas por los distribuidores, pero consideraron que quizá no eran las más adecuadas.

Reza y Shahaboddin (2010) demostraron que dos diferentes polímeros sí mejoran las propiedades de resistencia de una arena. Estos autores llevaron a cabo pruebas de resistencia en compresión simple de muestras de arena de médano con y sin polímero. Ellos utilizaron dos polímeros. El polímero uno era acetato de polivinilo MW:83000, Aldrich; y el dos fue polimetil metacrilate (PMMA); MW: 14000, Aldrich.

Para verificar el comportamiento de los dos polímeros, se prepararon muestras de 5 cm de diámetro. Se realizaron ensayes de resistencia en compresión simple de muestras que se secaron por 1, 2, 7, 14 o 28 días. Para evaluar el efecto del humedecimiento, se ensayaron muestras que se secaron durante 7 días, pero después del secado, se colocaron de forma horizontal en una charola, se le puso agua con un tirante de 12.5 mm de agua; los cilindros se dejaron humedecer por 3 minutos y después se dejaron drenar por 5 minutos, posteriormente se ensayaron. La Figura 1.8 muestra los resultados de resistencia en compresión simple tanto de las muestras secadas como de las que se secaron y se humedecieron, asimismo, presenta los resultados de ambos polímeros.

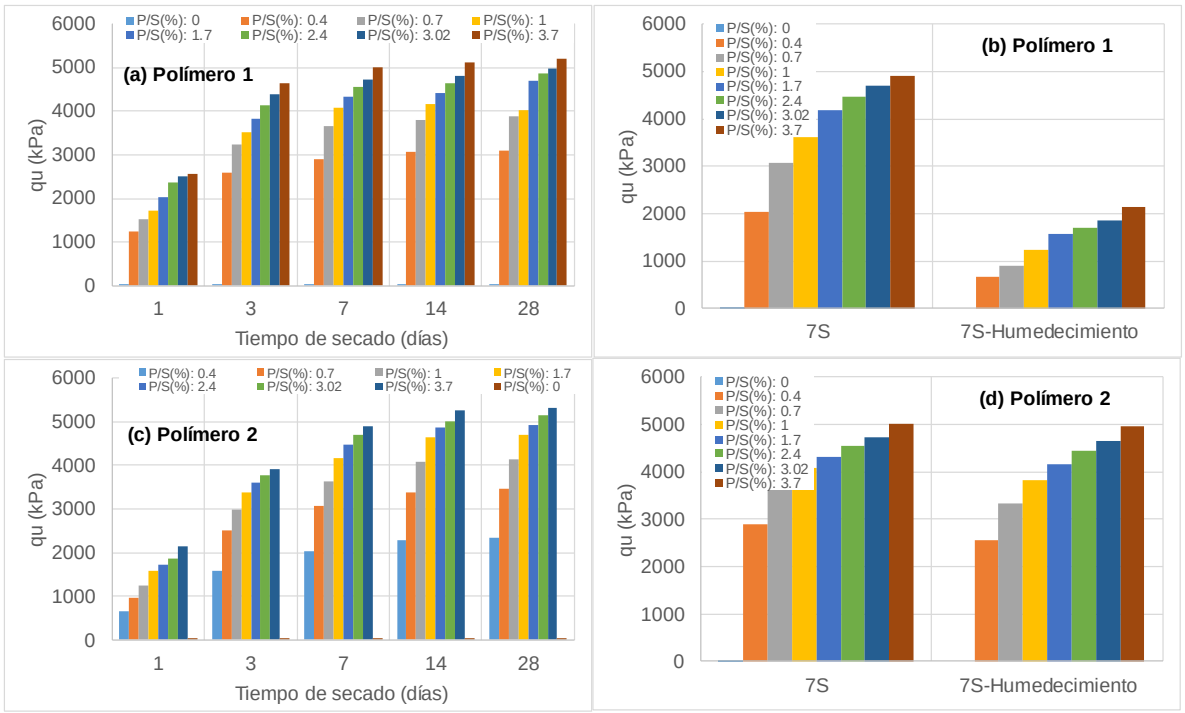


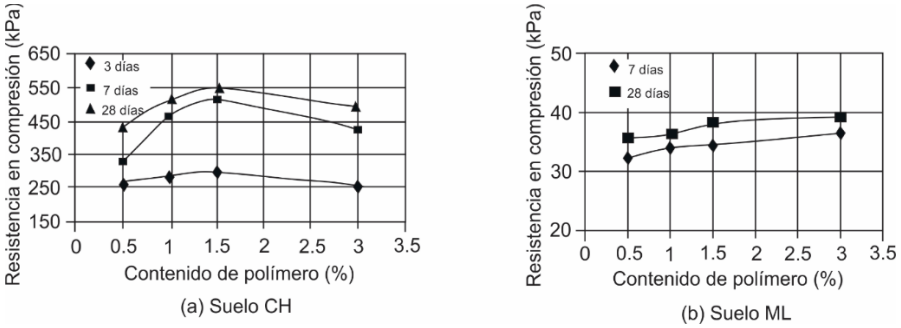
Figura 1.8. Gráficas realizadas con los datos de Reza y Shahaboddin (2010)

Lo que se puede concluir de las gráficas (a) y (c) es que el tiempo de secado es un factor que influye de forma importante en la resistencia adquirida por el suelo estabilizado, sin embargo, parece que entre tres y siete días de secado, el suelo ya ha adquirido alrededor del 90% de su resistencia. Por otro lado, la misma figura muestra que el incremento de la cantidad de polímero también hace que la resistencia se incremente, pero para tiempos de curado de 14 y 28 días y relaciones de aditivo/suelo de 3.02 y 3.7, las resistencias son similares.

Con respecto al comportamiento de las muestras humedecidas, si el suelo es mezclado con el polímero 1, para todas las relaciones polímero/suelo, la resistencia se reduce de forma importante. Lo interesante es que con el polímero 2, las muestras pierden muy poca resistencia cuando ellas son humedecidas, por lo tanto, con respecto a estos resultados, pareciera que el polímero 2 proporcionaría un mejor comportamiento en humedecimiento, que es la peor condición a la que estaría sometido el suelo.

Otro estudio sobre la evaluación del polímero SOILTAC fue realizado por Kolay et al. (2016). En su estudio se evaluaron las propiedades de un suelo CH y ML con y sin polímero. A estos suelos se les determinaron límites de consistencia, características de compactación, resistencia en compresión simple y CBR. La resistencia en compresión simple del suelo CH se determinó para especímenes curados 3, 7, y 28 días. El suelo ML solo se ensayó a 7 y 28 días. En cuanto al polímero, a los suelos se les agregó 0.5, 1.0, 1.5 y 3.0% con respecto a peso seco del suelo.

Con los resultados, los autores concluyeron que los límites de consistencia no se vieron afectados por las cantidades de polímero agregadas. Por el lado de las propiedades de compactación, se observó que un incremento en la cantidad de polímero disminuyó el contenido de agua óptimo e incrementó el peso volumétrico seco máximo; esto para ambos suelos. Respecto a resistencia en compresión simple, ésta se incrementó solo en el suelo CH (Figura 1.9a); en el suelo ML fue mínimo el efecto del polímero (Figura 1.9b). Cabe hacer notar que en este estudio no se muestra la resistencia del suelo sin polímero.

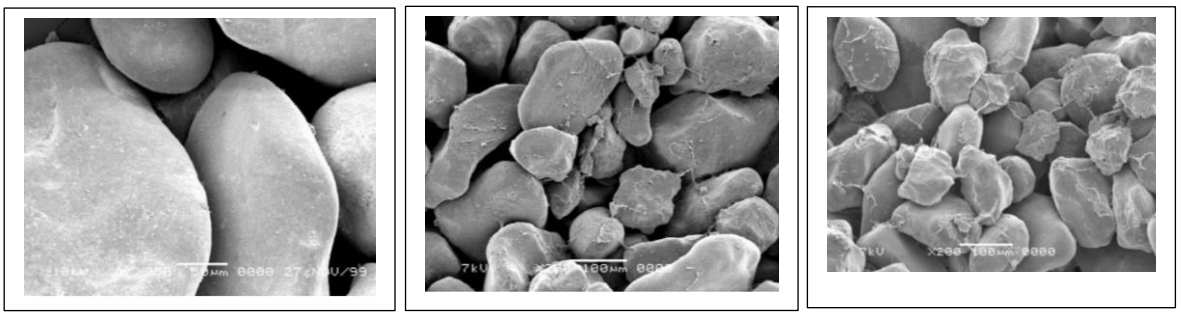


(a) **(b)**

Figura 1.9. Resultados de resistencia en compresión de dos suelos estabilizados con polímero (Kolay et al., 2016)

La literatura muestra otro estudio realizado por Al-Khanbashi y El-Gamal (2003). En éste, los autores indican que prepararon muestras de arena de duna con diferentes cantidades de polímero. El objetivo del estudio era verificar cómo cambiaba la permeabilidad y la resistencia en compresión.

Las variables estudiadas en esta investigación fueron la cantidad de polímero y la forma de aplicar el polímero. Una forma de aplicar el polímero fue diluirlo en agua, agregarlo a la arena, mezclar y posteriormente compactar el espécimen. El segundo método consistió en preparar los especímenes de arena y posteriormente rociar la solución agua-polímero. En el estudio, además se tomaron fotografías con microscópico electrónico de barrido tanto de la arena natural como de la arena que contenía el polímero (Figura 1.10a, b y c). De esta figura se observa que la arena en condiciones naturales no muestra ligas entre partículas. Cuando a la arena se le agrega 0.5% de polímero, se observa cubrimiento parcial de partículas y algunas ligas entre los granos de arena; a medida que la cantidad de polímero se incrementa, la mayor parte de las partículas muestran una película de polímero, además se observan más ligas entre partículas.



(a) Arena de duna (b) Arena con 0.5% de polímero (c) Arena con 1% de polímero

Figura 1.10. Fotografías de arena de duna con y sin polímero

Respecto a permeabilidad, ésta se redujo de forma importante con la adición del polímero. Los resultados indican además que el método de rociado produjo más reducción en la permeabilidad que el método en donde las muestras fueron preparadas con una mezcla de suelo-polímero (Figura 1.11).

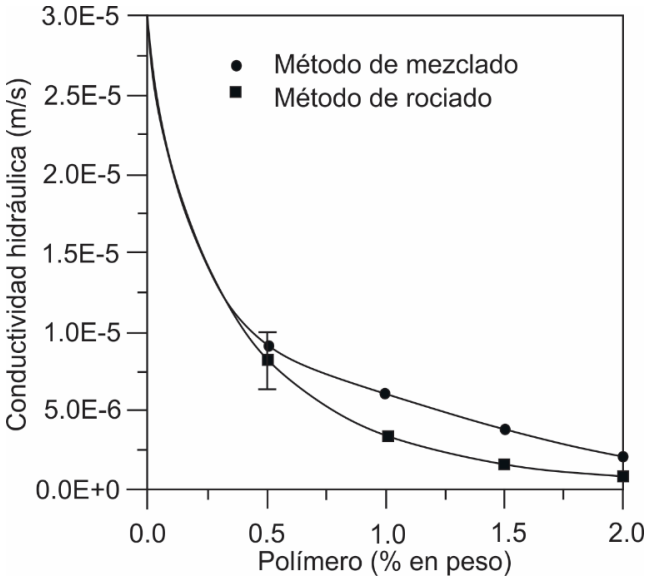


Figura 1.11. Resultados de permeabilidad de arena con y sin polímero

La resistencia en compresión simple y el módulo de elasticidad del suelo con polímero se incrementaron con un aumento en el contenido de polímero (Figura 1.12). Es importante notar que la Figura 1.12 indica, además, que, en este caso, la resistencia y el módulo de elasticidad son mayores cuando los especímenes se preparan con la mezcla suelo-polímero.

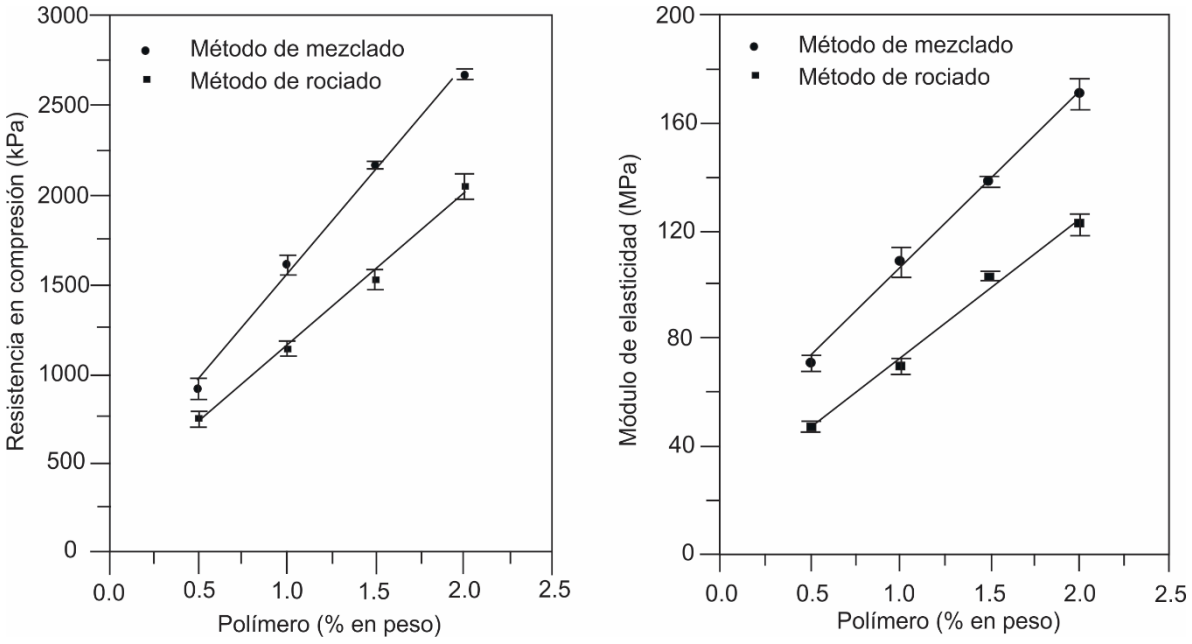


Figura 1.12. Resultados de resistencia en compresión simple y módulo de elasticidad de muestras de arena de médano con polímero

Otro estudio es el de Naeini et al. (2012). Estos investigadores estudiaron el efecto del polímero acrílico AP225 en la modificación de propiedades índice y de

resistencia de tres suelos, dos clasificados como CL y uno como CH. Dos de los suelos se produjeron a partir de la mezcla del CL con 10 y 20 % de bentonita.

Naeini et al. (2012) indican que los suelos fueron estabilizados con 2, 3, 4 y 5% de polímero con respecto al contenido de agua óptimo. Los tiempos de curado a los cuales se determinó la resistencia en compresión simple fueron 0, 2, 4, 6, 8 y 14 días. Para evaluar la resistencia en compresión, se fabricaron especímenes de 5 cm de diámetro y 10 cm de altura. Cuando se cumplieron los tiempos de curado, los especímenes fueron ensayados a una velocidad de 1.2 mm/min.

La Figura 1.13 muestra los resultados de resistencia a compresión

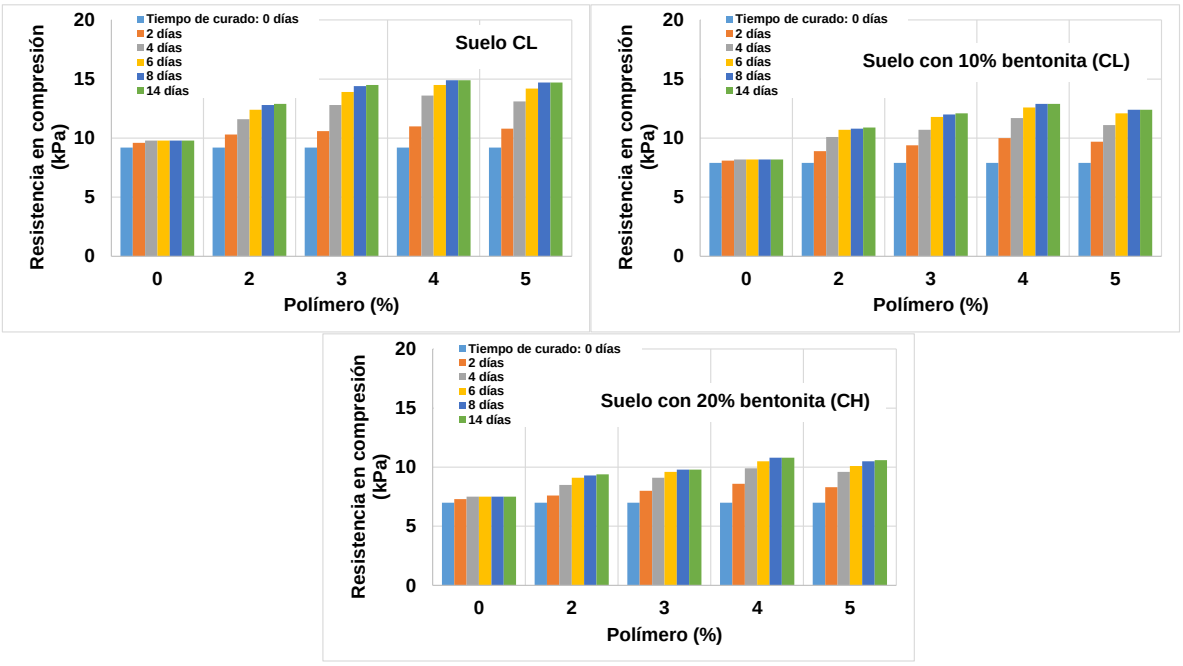


Figura 1.13. Figura realizada con los resultados de Naeini et al. (2012)

Desde el punto de vista de los autores, la resistencia en compresión simple se incrementó rápidamente en los primeros días, pero para 8 y 14 días, la resistencia permaneció similar. También indican que, a mayor contenido de polímero, la rigidez de los materiales se incrementó. Otro aspecto que se notó fue que, a mayor plasticidad del suelo, la resistencia se redujo.

A pesar de que los autores indican que la resistencia sí se incrementó, habría que preguntarse si un incremento en resistencia de 5 kPa puede considerarse como un efecto benéfico del polímero. Es importante señalar que, en el caso de este estudio, no se permitió el secado de los especímenes, lo que pudo haber inhibido la formación de las ligas del polímero.

Pocos estudiados han abordado a la vez la evaluación de la interacción suelo-polímero con estudios a nivel micro y macroscópico. Pero un ejemplo de estos

estudios es el de Azzam (2014), que publicó resultados obtenidos en un suelo CH (formado por 31% limo y 69% arcilla).

Azzam estabilizó el suelo con 3, 6 y 10% de polímero (polipropileno homopolímero H030SG) y lo ensayó en pruebas como resistencia en compresión, pruebas de compresibilidad en consolidómetro, pruebas de expansión, y además observó el grado de agrietamiento de muestras que se colocaron en anillos.

Azzam encontró que tanto el índice de compresión como el índice de expansión se redujeron al incrementarse el contenido de polímero, lo que atribuyó al incremento en la rigidez del material (Figura 1.14).

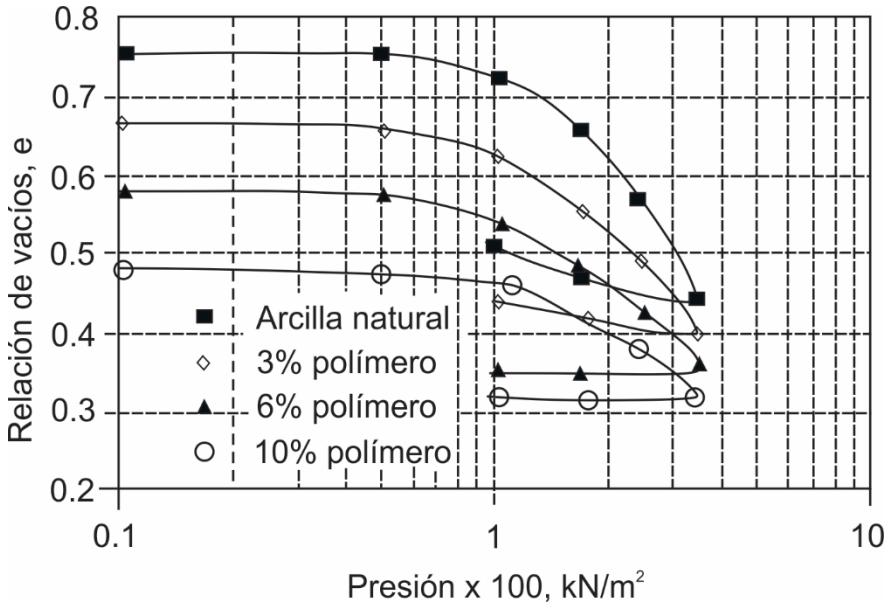


Figura 1.14. Pruebas de compresibilidad en suelo con y sin polímero

Respecto a la resistencia en compresión simple, ésta se incrementó al aumentar el contenido de polímero (Figura 1.15a). Con este mismo tipo de prueba (resistencia en compresión simple), Hazzam evaluó el efecto del agua. En este sentido, Hazzam ensayó algunas muestras después de haberse sumergido en agua durante 24 horas y después comparó los resultados con los obtenidos en muestras preparadas en el contenido de agua de compactación. Sus resultados indicaron que, aunque las muestras estuvieron sometidas a absorción de agua, la resistencia no sufrió mayor reducción (Figura 1.15b).

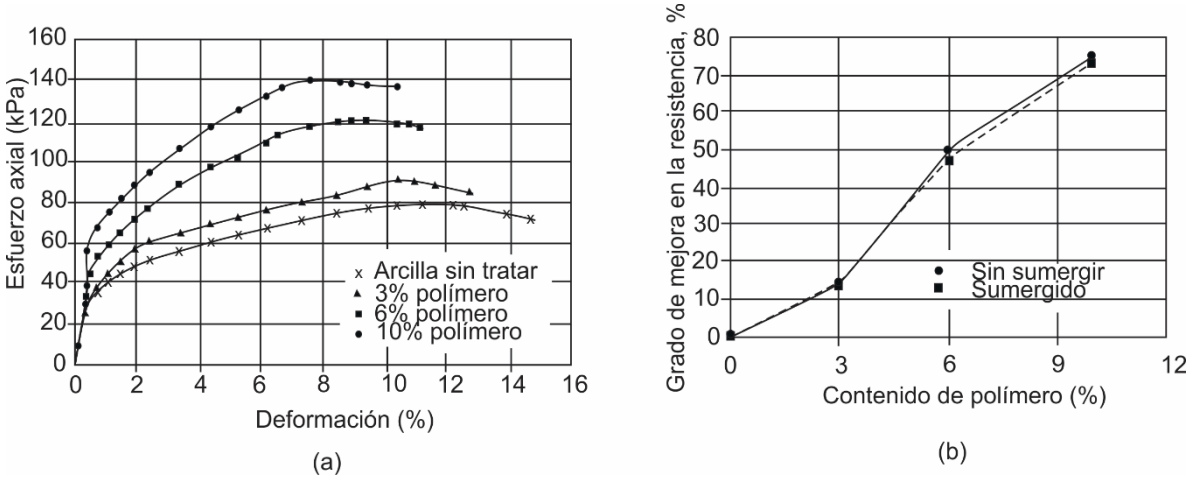
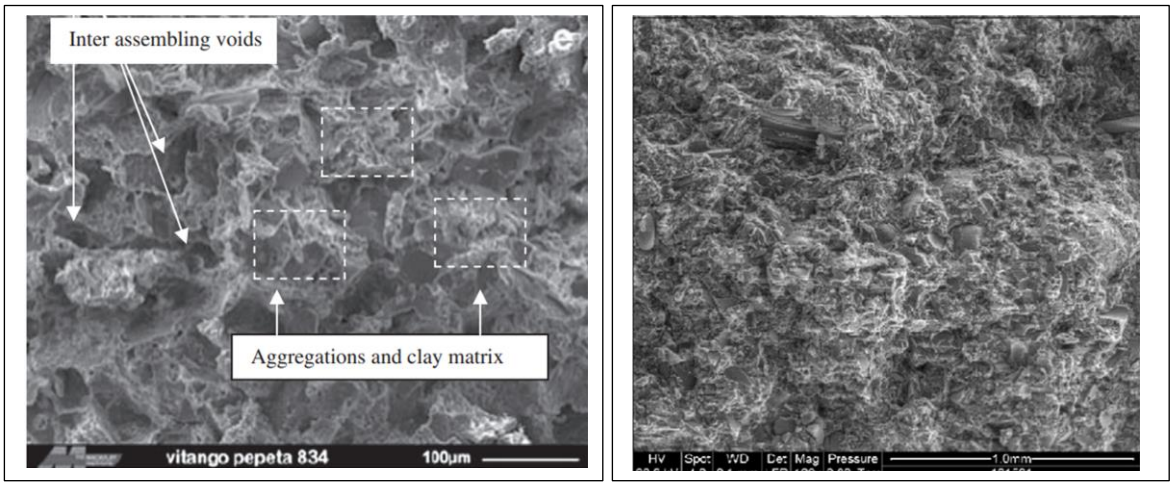


Figura 1.15. (a) Resistencia en compresión simple del suelo-polímero; (b) Comportamiento de las muestras con y sin humedecimiento

Sus resultados también indicaron que la expansión del suelo con polímero se redujo y no se observó agrietamiento, pero sí se observó que el suelo se despegó del anillo.

Para observar la estructura del suelo con y sin polímero, Hazzam utilizó microscopio electrónico de barrido, difracción de rayos X y microscopio de transmisión de electrones. Un ejemplo de las fotografías que obtuvo se muestra en la Figura 1.16. En ésta se observa la diferencia en la estructura del suelo con y sin polímero.



(a) Foto de suelo sin tratar **(b) Foto del suelo con 10% de polímero**

Figura 1.16. Fotografías de suelo con y sin polímero

Otro trabajo de investigación relacionado a estabilización con polímeros es el publicado por Liu et al. (2012). En su artículo los autores indican que utilizaron mezclas de arena y arcilla a las cuales estabilizaron con tres poliuretanos (los identificaron como PUA, PUB, PUC) en dos concentraciones cada uno.

Para verificar el comportamiento del suelo-polímero, Liu et al. llevaron a cabo pruebas de resistencia en compresión simple, pruebas de corte directo y pruebas de erosión. En el caso de este estudio, las probetas para evaluar la resistencia en compresión fueron secadas al aire a 25º durante 48 horas; las de resistencia a corte se secaron bajo las mismas condiciones, pero en horno. Los especímenes utilizados para erosión se secaron a las mismas condiciones de las probetas de resistencia en compresión simple.

La Figura 1.17 muestra los resultados de resistencia en compresión simple, en donde se observan incrementos en la resistencia con los tres polímeros. Al parecer, el incremento fue mayor cuando el suelo tenía más arcilla.

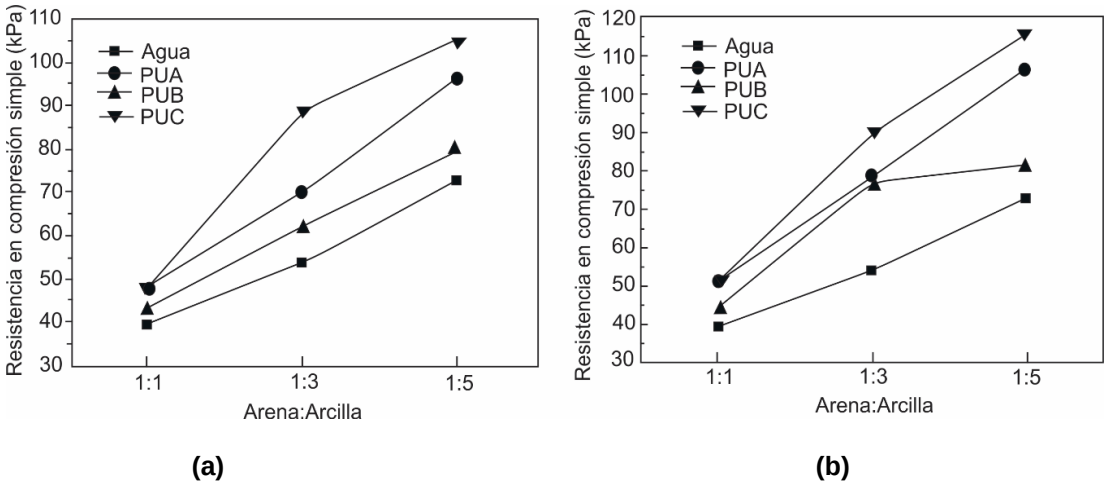


Figura 1.17. (a) Resultados de resistencia en compresión; 3 g/cm^3 de poliuretano; (b) Resultados de resistencia en compresión simple; 5 g/cm^3 de poliuretano

De las pruebas de resistencia al corte se observó que la cohesión fue más alta a mayor cantidad de arcilla y el poliuretano PUC fue el que proporcionó los mayores valores de cohesión. En cuanto al ángulo de fricción interna, la mezcla 1:1 presentó los valores más altos y nuevamente el poliuretano PUC es el que mostró los valores más altos de ángulo de fricción. Respecto a las pruebas de erosión, los especímenes estabilizados presentaron mayor resistencia a la erosión.

Hanson et al. (2017), a su vez, publicaron resultados de cuatro suelos modificados con polímero. En su estudio, los cuatro suelos fueron mezclados con un copolímero elástico aplicado en un rango de porcentajes de 0.5 a 2.5 con respecto a peso seco del suelo. Las pruebas para verificar el comportamiento fueron compactación Proctor estándar y pruebas de durabilidad.

De acuerdo con los autores, el contenido de agua óptimo sí se modificó con la adición del polímero, no así el peso volumétrico seco máximo (Figura 1.18).

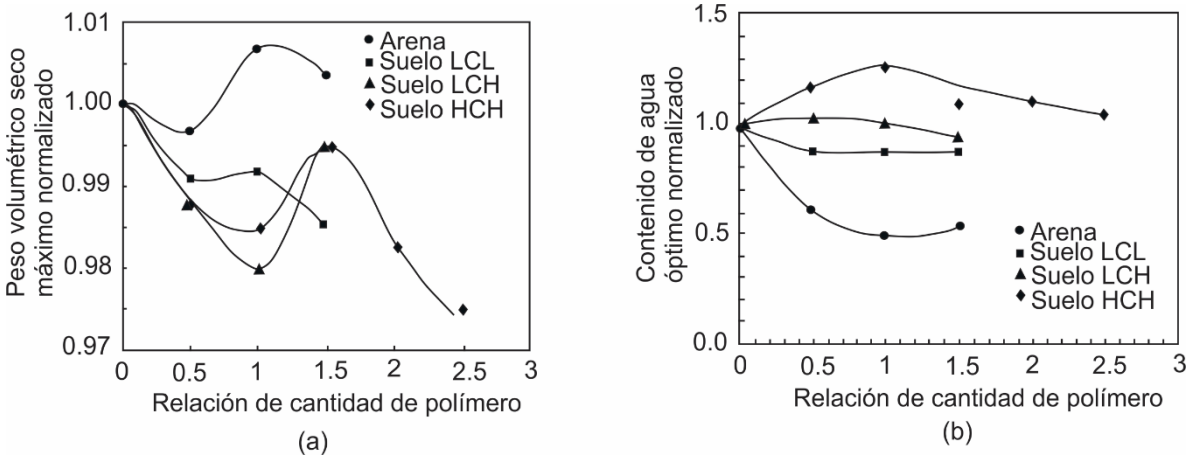


Figura 1.18. (a) Variación del peso volumétrico de acuerdo con la cantidad de polímero; (b) Contenido de agua óptimo normalizado con respecto a la cantidad de polímero.

Con respecto a las pruebas de durabilidad en humedecimiento-secado o congelamiento-descongelamiento, los suelos con polímero mostraron mejor comportamiento. De hecho, la arena y el suelo LCH indicaron mejor comportamiento en pruebas de congelamiento-descongelamiento; el suelo LCH también mejoró de forma importante respecto a la prueba de durabilidad de humedecimiento-secado.

En 2016, Kolay et al., publicaron resultados obtenidos al evaluar la efectividad de un polímero en dos tipos de suelo (A y B; clasificados como CH y MH). En su estudio, Kolay et al. determinaron la efectividad en términos de límites de consistencia, compactación Proctor estándar y resistencia en compresión simple en suelo con y sin polímero acrílico. Las variables estudiadas fueron la cantidad de polímero (2, 3, 4 y 5%; además de la referencia que fue el suelo natural); los tiempos de curado (7, 14 y 28 días), además, el tipo de curado (muestras confinadas y muestras secadas al aire). En el estudio solo se utilizó suelo que pasó la malla No. 40.

Las pruebas de límites de consistencia confirmaron resultados que ya se habían observado en otros estudios, es decir, el LL, LP e IP no se modificaron al adicionar el polímero; lo mismo se observó para la contracción lineal. Respecto a las curvas de compactación, las del suelo con polímero redujeron su peso volumétrico seco máximo e incrementaron el contenido de agua óptimo, esto para ambos suelos (Figura 1.19).

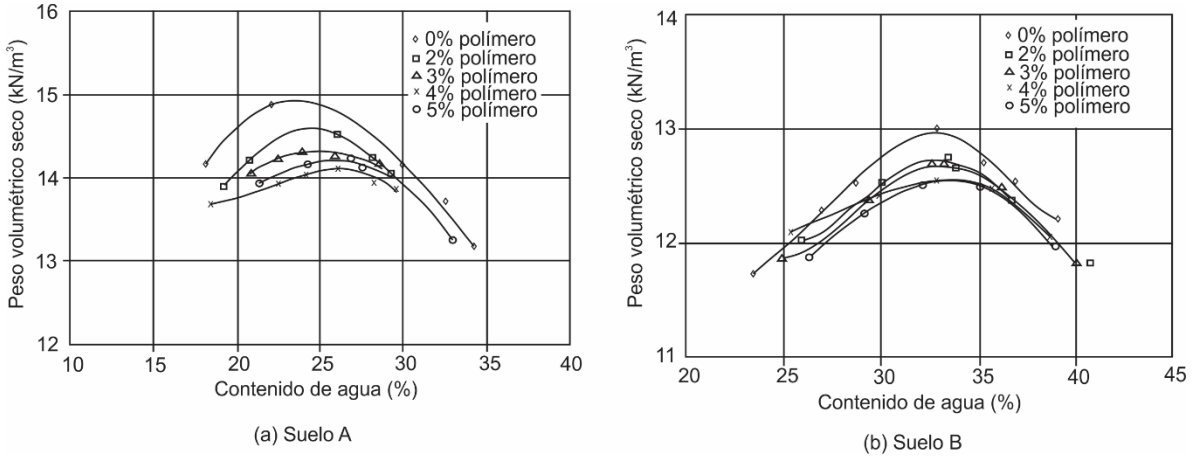


Figura 1.19. Pruebas Proctor estándar para el suelo A y B

Con respecto a las pruebas de resistencia en compresión simple, los resultados indicaron que si las muestras se confinaban (no se permitió evaporación de agua de la muestra), la resistencia de las muestras del suelo A con polímero no se incrementó y en algunos casos se redujo ligeramente. Los autores argumentaron que esto fue consecuencia de no permitir que se presentara la polimerización (Figura 1.20 a, b y c).

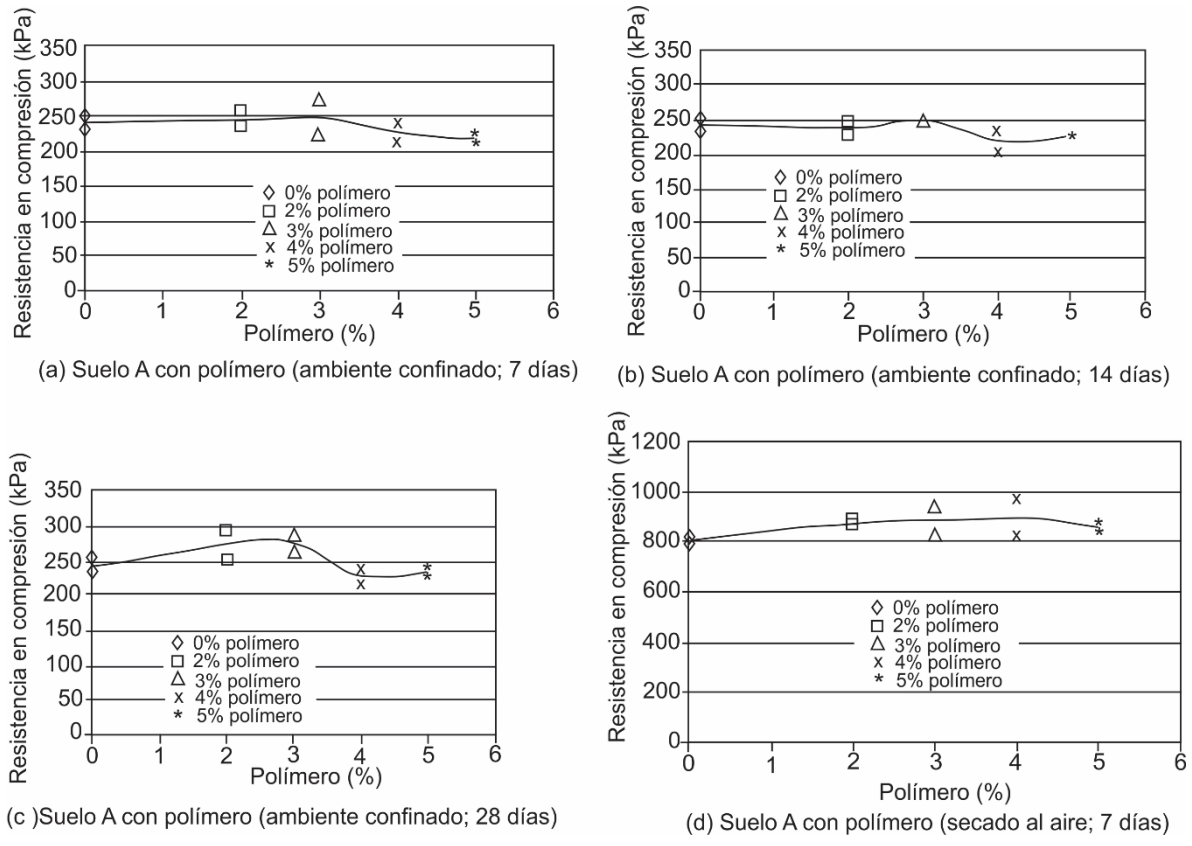


Figura 1.20. Resultados de resistencia en compresión simple del suelo A

Como no se observó incremento en la resistencia, se prepararon otros especímenes del suelo A, pero estos se compactaron a un contenido de agua más bajo que el óptimo y un peso volumétrico seco fijo; las muestras se secaron aire durante 7 días. En este caso, se observó un incremento marginal de la resistencia (Figura 1.20d).

Para el suelo B se evaluaron las mismas variables (muestras confinadas y muestras secadas al aire) y lo que se observó en el caso de las muestras confinadas fue un incremento marginal de la resistencia. Pero para este suelo sí se notó un incremento importante de la resistencia cuando las muestras se secaron al aire durante 7, 14 o 28 días. De hecho, los mayores incrementos en la resistencia se obtuvieron a 28 días de secado (Figura 1.21).

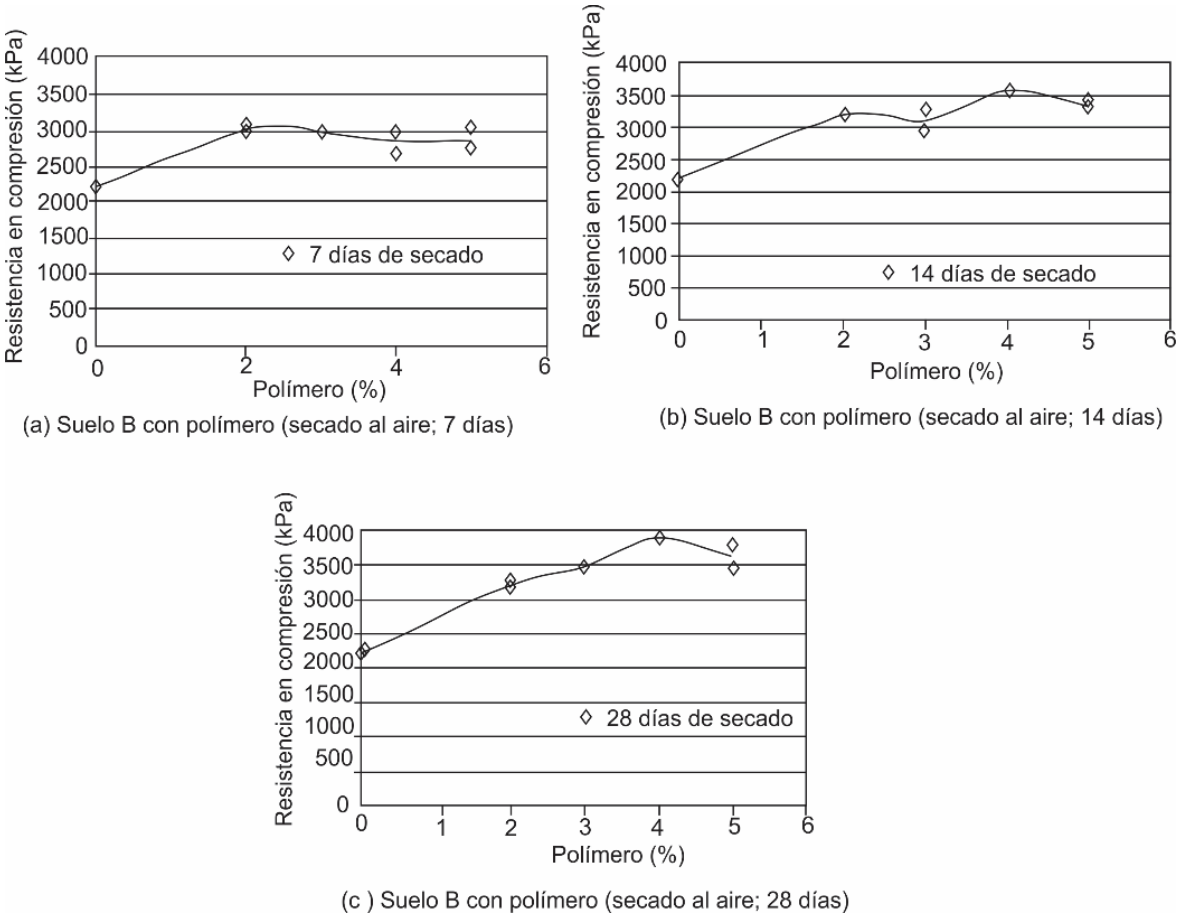


Figura 1.21. Resultados de resistencia en compresión simple del suelo B

Xing et al. (2018) publicaron resultados resistencia en compresión simple y permeabilidad de un suelo arenoso al que mejoraron con 4 polímeros. Tres de ellos líquidos y uno en polvo. Los polímeros líquidos fueron designados como L13126, L13142 y Producto A; el sólido era L13140.

Para evaluar el comportamiento del suelo-polímero, se compactaron especímenes de 10 cm de diámetro y 15 cm de altura en equipo giratorio en condiciones óptimas de compactación respecto a la prueba Proctor modificada. Posterior a la

compactación, éstos se secaron durante 7, 14 o 28 días; el aditivo también se aplicó en tres proporciones. Otra de las variables estudiadas también fue el efecto de la humedad. Para esto, a las muestras se les permitió absorber agua durante 15 minutos y se dejaron drenar durante 5 minutos. Después se ensayaron en compresión.

De acuerdo con los resultados del estudio, los cuatro polímeros mejoraron la resistencia en compresión simple comparada la resistencia del suelo que solo se compactó con agua. Asimismo, al incrementarse la cantidad de polímero también se incrementó la resistencia, sin embargo, el mayor incremento lo mostró el polímero A. El polímero líquido L13142 fue el que menos efecto provocó en la resistencia (Figura 1.22a). En la Figura 1.22b lo que se presenta es la pérdida de resistencia cuando las muestras se humedecen. En este caso, las muestras mejoradas con el polímero en polvo perdieron aproximadamente 20% de su resistencia cuando se humedecieron, mientras que las muestras a las que se adicionó polímero líquido mostraron una pérdida de 30%, aproximadamente.

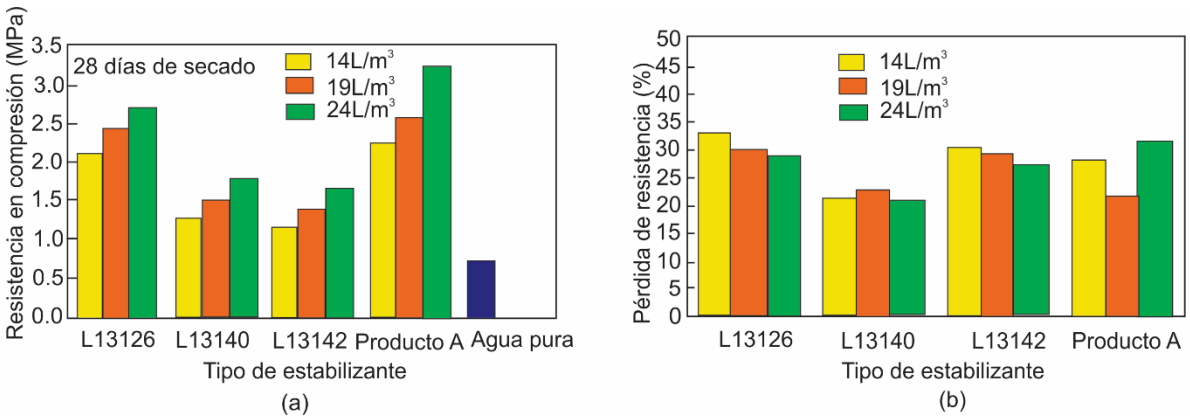


Figura 1.22. (a) Resultados de resistencia en compresión simple; (b) pérdida de resistencia por humedecimiento

En este estudio también se documentó que, a 14 días, la mayor parte del agua de las muestras se había evaporado. Los autores indican que, en el caso de los polímeros, la ganancia en resistencia se debe solo a la evaporación de agua y no a otras reacciones químicas.

Como se puede notar de los estudios anteriores, los investigadores han utilizado diferente metodología para evaluar la efectividad de los polímeros. Algunas propiedades que se han evaluado para estudiar la efectividad de los polímeros son:

- Límites de consistencia
- Curvas de compactación
- Resistencia en compresión simple
- Compresibilidad
- Expansión
- Durabilidad en humedecimiento-secado

- Durabilidad en congelamiento-descongelamiento
- Fotografías de la microestructura
- Conductividad hidráulica
- California Bearing Ratio (CBR)
- Expansión libre, etc.

A pesar de todos los estudios que se tienen, no existe un procedimiento estándar para la evaluación de los polímeros como estabilizadores de suelos. Sin embargo, cada uno de estos estudios ha definido algunos de los aspectos importantes en la evaluación de estos productos.

En este documento se presentan resultados de tres estudios realizados con un polímero, esperando que estos, sumados a los ya existentes en la literatura contribuyan para poder dilucidar en qué medida, el polímero en estudio puede ser utilizado como estabilizador de suelos.

2. Procedimientos de prueba

En los tres proyectos que se llevaron a cabo, se realizaron pruebas similares para verificar el comportamiento del polímero. En este capítulo se describen los procedimientos generales utilizados, pero en los capítulos 2,3, 4 y 5 se mencionan algunos detalles de los procedimientos que fueron específicos de cada proyecto.

2.1. Procedimientos para la evaluación de las propiedades índice y características de compactación

La determinación de las propiedades índice se llevó a cabo de acuerdo con procedimientos ASTM. En la Tabla 2.1 se listan estos procedimientos. No se describen a detalle ya que cada uno de ellos ha sido ampliamente descrito en otros documentos.

Tabla 2.1. Procedimientos de prueba para determinación de propiedades índice

Designación	Nombre de la norma
ASTM D854-14	Determinación de la gravedad específica de suelo usando el picnómetro con agua
ASTM D4318-10	Determinación del límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad
ASTM D1140-17	Determinación de la cantidad de suelo más fino que la malla 75 μm (malla no. 200) por medio de lavado
ASTM C136-14	Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos
ASTM D698-12	Determinación de las características de compactación de un suelo. Prueba Proctor estándar

2.2. Preparación de los especímenes de prueba

Después de obtener las curvas de compactación y obtener el contenido de agua óptimo y el peso volumétrico seco, los especímenes a ser utilizados en las pruebas de compresión simple, módulo de resiliencia y deformación permanente, se fabricaron siguiendo el procedimiento que a continuación se describe:

2.2.1. Fabricación de los especímenes de prueba por medio de compactación dinámica (Proyecto 1)

- Se preparó la mezcla de suelo-agua o suelo-agua-polímero (Figura 2.1).

Figura 2.1. Preparación de la mezcla suelo-agua-polímero

- La mezcla suelo-solución de polímero agua, se compacta inmediatamente después del mezclado. En el caso del suelo-agua, se mezcla y se deja reposar de 12 a 18 horas, previo a la compactación.
- Para compactar el espécimen se utiliza un molde de 7.1 cm de diámetro y 14.4 cm de altura (sin collarín) (Figura 2.2). También se utiliza un pisón de 1 kg de masa y 30.5 cm de altura.

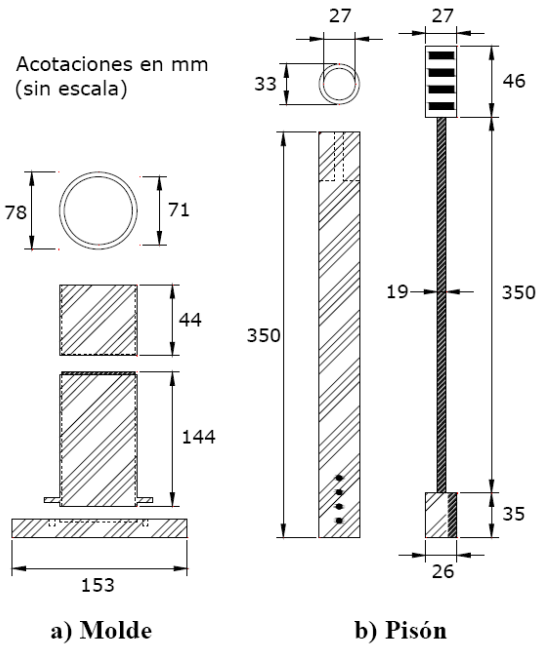


Figura 2.2. Esquema de molde y pisón de compactación

- Se calculó la cantidad de suelo a ser compactado en el molde de tal manera que se alcanzara el peso volumétrico seco máximo. La cantidad de suelo se dividió en 8 partes, porque el espécimen se compacta en 8 capas.
- Se calculó el número de golpes a aplicarse en cada capa.
- En el interior del molde se coloca un acetato para evitar que el suelo se pegue al molde. Con el mismo propósito, en la parte inferior se coloca también un disco de acetato para que el suelo no se quede pegado al extraer la muestra.
- Después de preparar el molde, se vierte en éste el suelo de la primera capa y se compacta con el número de golpes previamente calculado.
- Después de aplicar el número de golpes especificado, se escarifica la superficie y se coloca el material de la segunda capa. Se compacta y el procedimiento se repite para las capas restantes.

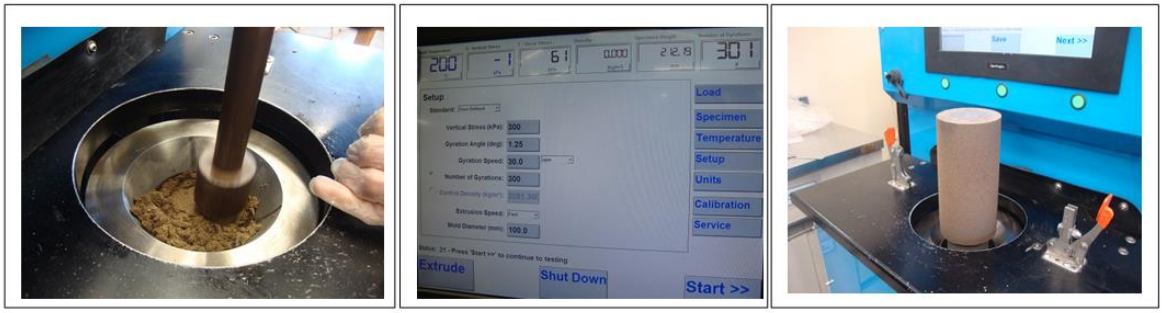
Figura 2.3. Proceso de fabricación de los especímenes

- Después de compactar la última capa de suelo, se quita el collarín, se enrasa la superficie de la muestra y se toman dimensiones del espécimen.

Figura 2.4. Extracción, enrase y medición de las características del espécimen compactado

2.2.2. Fabricación de los especímenes de prueba por medio de compactación en equipo giratorio (Proyecto 2 y 3)

- Se preparó la mezcla suelo-agua-polímero como se describió en el inciso anterior.
- Se calculó la cantidad de material a ser compactada en el molde para alcanzar el peso volumétrico especificado.
- Se pesó el suelo, se colocó en el molde del compactador giratorio (molde de 10 cm de diámetro).
- El espécimen se compactó controlando las siguientes variables de compactación:
    1. Velocidad de giro: 30 giros/minuto
    2. Presión vertical: 300 kPa
    3. Número de giros: 300
    4. Ángulo de giro: 1.25º



(a) (b) c)

Figura 2.5. Fabricación de los especímenes en el compactador giratorio

- Posterior a la fabricación, los especímenes fueron medidos y pesados (Figura 2.6).

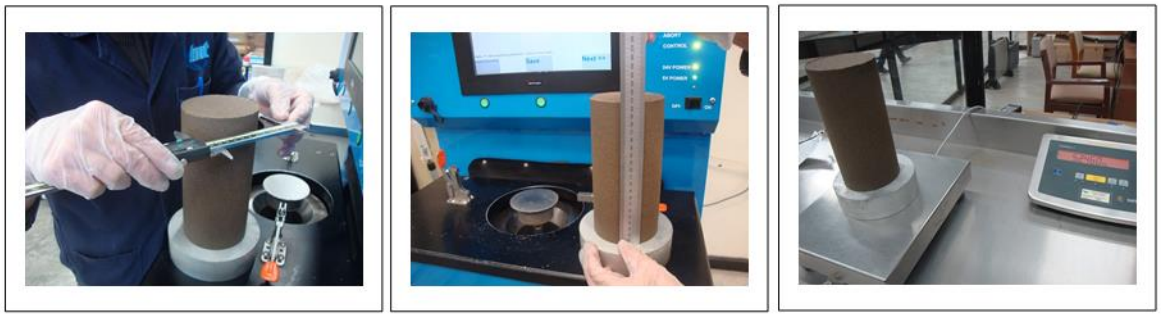


Figura 2.6. Registro de peso y dimensiones del espécimen

2.2.3. Acondicionamiento de las muestras

En los tres proyectos, se ensayaron especímenes acondicionados en diferentes formas. Éstas fueron:

- Después de compactarse,
- Después de ser secados 7, 14 o 28 días. Después del tiempo de secado, los especímenes se almacenan 14 días antes de ensayarse (Figura 2.7a),
- Después de ser secados 7, 14 o 28 días, humedecidos durante 14 días y almacenados durante 14 días previo a llevar a cabo el ensaye (Figura 2.7b),
- Después de ser compactados y almacenados durante 7, 14 y 28 días.
- Después de ser secados 14 o 28 días. Humedecidos 14 días y secados 14 o 28 días nuevamente. Finalmente, almacenados 14 días.

(a) (b)

Figura 2.7. Humedecimiento o secado de los especímenes

2.3. Pruebas para determinar propiedades mecánicas

2.3.1. Valor de Soporte California (ASTM D1883)

En este procedimiento solo se hace referencia a la sección de preparación del espécimen de prueba y la prueba en sí misma.

2.3.1.1. Espécimen de prueba

- Se determina primeramente la curva de compactación Proctor estándar o Proctor modificada, la que corresponda.
- Cuando se requiere obtener el CBR al 100 % del peso volumétrico seco máximo y contenido de agua óptimo, se compacta un espécimen empleando el procedimiento de compactación especificado, ya sea el D698 o D1557, y que tenga una variación de contenido de agua de ± 0.5%.
- Cuando se requiere determinar el CBR con contenido de agua óptimo y un cierto porcentaje de peso específico seco máximo, se compactan tres especímenes con el suelo preparado con contenido de agua en el cual la variación esté entre ± 0.5 % del contenido de agua óptimo y usando la compactación especificada pero con diferente número de golpes por capa para cada espécimen. El número de golpes por capa debe variarse como sea necesario para preparar especímenes con pesos volumétricos menores y mayores que el valor deseado. Típicamente, si se requiere el CBR de un suelo a 95 % del peso volumétrico seco máximo, los especímenes se compactan con 56, 25 y 10 golpes por capa.
- Se toma una muestra representativa del material, antes de la inmersión, para determinar el contenido de agua.
- Si el espécimen de prueba de compactación no se va a sumergir, se podría tomar una muestra para el contenido de agua después de la penetración.
- Se coloca el disco espaciador, con el orificio para la manija de extracción hacia abajo, en la placa base. Se sujeta el molde (junto con el collar de extensión) a la placa base con el orificio para la manija de extracción hacia abajo. Se inserta el disco espaciador sobre la placa base y se colca un disco de papel filtro en la parte superior del disco espaciador. Se compacta la mezcla de suelo en el molde.
- Se quita el collarín y se enrasa con cuidado el suelo compactado. Se rellena con material de tamaño más pequeño, cualquier hueco que quede en la superficie debido a la remoción del material grueso. Se retira la placa base perforada y el disco espaciador, se pesa y se registra la masa del molde y del suelo compactado. Se coloca un disco de papel filtro en la placa base perforada, se invierte el molde y el suelo compactado y se sujeta la placa base perforada al molde con el suelo compactado en contacto con el papel filtro.
- Se aplica una sobrecarga igual al peso del material de base y pavimento con un valor de 2.27 kg de masa, pero en ningún caso el peso total empleado

deberá ser menor a 4.54 kg de masa. Si no se especifica algún peso, se usa 4.54 kg. La masa del equipo de medición de expansión se ignora. Se sumerge el molde y pesas en agua permitiendo el libre acceso de agua al tope superior e inferior del espécimen. Se toman las medidas iniciales para expansión y se permite que el espécimen permanezca en agua por 96 ± 2 horas. Se mantiene un nivel constante de agua durante este período. Se puede permitir un tiempo menor de inmersión para suelos de grano fino o granulares que tomen agua inmediatamente, si las pruebas muestran que un período más corto no afecta los resultados. Al final del período de inmersión, se toma una medición final de expansión y calcula la expansión como un porcentaje de la altura inicial del espécimen.

- Se remueve el agua libre de la superficie superior del espécimen y se permite que el espécimen drene por abajo por lo menos durante 15 minutos. Debe tenerse cuidado de no alterar la superficie del espécimen durante la remoción del agua. Puede ser necesario inclinar el espécimen para quitar el agua superficial. Se retiran los pesos, la placa perforada y el papel filtro, entonces se determina y se registra la masa.

2.3.1.2. Procedimiento de prueba

- Se coloca una sobrecarga de pesas suficiente sobre el espécimen para producir una intensidad igual al peso del pavimento u otra carga especificada; si no se especifica ningún peso para el pavimento, se usa una masa de 4.54 kg. Si el espécimen ha sido previamente humedecido, la sobrecarga deberá ser igual a la usada durante el período de humedecimiento. Para prevenir expansión del suelo dentro del orificio de las pesas de sobrecarga, se coloca una pesa anular de 2.27 kg de masa sobre la superficie del suelo antes del asentamiento del pistón de penetración, después se colocan las pesas de sobrecarga restante.
- Se asienta el pistón de penetración con una carga de contacto lo más pequeña posible, pero en ningún caso debe exceder de 4.54 kg. Se ponen en ceros los micrómetros (ambos) de carga y penetración o se hacen las provisiones necesarias para restar los valores iniciales de todos los datos recopilados posteriormente. La carga inicial se requiere para asegurar un asentamiento satisfactorio del pistón y debe considerarse como la carga cero cuando se determina la relación de penetración. Se conecta el instrumento de medición de penetración.
- Se aplica la carga al pistón de penetración con una velocidad de penetración de aproximadamente 1.27 mm/min. Se registran las lecturas de carga a penetraciones de 0.64 mm, 1.3 mm, 1.9 mm, 2.5 mm, 3.18 mm, 3.8 mm, 4.45 mm, 5.1 mm, 7.6 mm, 10.0 mm y 13 mm. Se anota si la máxima carga y penetración ocurren a una penetración menor a 13 mm. Se mide la profundidad de penetración dentro del suelo colocando una regla dentro del lugar dentado y se mide la diferencia desde la parte superior del suelo hasta el fondo de la identación. Si la profundidad no es similar a la profundidad de penetración que marca el micrómetro determine la causa y ensaye una nueva muestra.

- Si el espécimen de prueba se humedeció previamente, retire el suelo del molde y determine el contenido de agua de la parte superior de 25.4 mm.

2.3.1.3. Cálculo

- Curva carga-penetración—Se calcula el esfuerzo de penetración en mega pascales (MPa) tomando la fuerza de carga medida dividida entre el área de la sección transversal del pistón. Se grafica la curva esfuerzo-penetración. En algunos casos, la curva esfuerzo-penetración puede ser cóncava hacia arriba en la parte inicial debido a las irregularidades de la superficie u otras causas y en tales casos el punto cero debe ajustarse.
- Relación de soporte o resistencia—Se usan los valores de esfuerzo corregidos tomados de la curva de esfuerzo-penetración para 2.54 mm y 5.08 mm de penetración. Se calculan las relaciones de soporte o resistencia para cada uno dividiendo el esfuerzo corregido entre el esfuerzo estándar de 6.9 MPa y 10 MPa respectivamente, y se multiplica por 100. La relación de soporte reportada para el suelo es normalmente la de 2.54 mm de penetración. Cuando la relación a 5.08 mm de penetración es mayor, se lleva a cabo la prueba nuevamente. Si la prueba de comprobación proporciona resultados similares, se usa la relación de soporte para penetración de 5.08 mm.

2.3.2. Prueba de resistencia en compresión simple (ASTM D2166)

2.3.2.1. Preparación de los especímenes de prueba

- Tamaño del espécimen—tendrán un diámetro mínimo de 30 mm y la partícula más grande contenida en el espécimen de prueba será más pequeña que un décimo del diámetro del espécimen. Para especímenes con diámetros de 72 mm o mayores, el tamaño de partícula más grande será menor que un sexto del diámetro del espécimen. Si, después de completar una prueba en un espécimen inalterado, se encuentra, en función de observación visual, que hay partículas más grandes que las permitidas, se indica esta información en la sección de observaciones del informe de datos de la prueba. La relación altura-diámetro debe estar entre 2 y 2.5. Se determina la altura y el diámetro promedio del espécimen. Se determina un mínimo de tres mediciones de altura y al menos tres mediciones de diámetro aproximadamente en los cuartos de la altura.
- Especímenes reconstituidos—Los especímenes se prepararán de acuerdo con el contenido de agua y densidad predeterminados. Después de formado el espécimen, se enrasan los extremos de manera perpendicular al eje longitudinal, se retira del molde y se determina la masa y las dimensiones del espécimen de prueba.

2.3.2.2. Procedimiento

- Se coloca el espécimen en el equipo de carga de modo que quede centrado en la placa inferior.
- Se ajusta el instrumento de carga para que la placa superior haga contacto con el espécimen.
- Se pone en ceros el indicador de deformación o se registra la lectura inicial del dispositivo de deformación.
- Se aplica la carga de manera que se produzca una deformación axial a una velocidad de $^1/_2$ a 2%/min.
- Se registran los valores de carga, deformación y tiempo a intervalos suficientes para definir la forma de la curva de esfuerzo-deformación.
- La aplicación de la carga se continua hasta que los valores de carga decrezcan al aumentar la deformación, o hasta que se alcance el 15% de la deformación.
- Al finalizar la prueba, se determina el contenido de agua del espécimen de prueba utilizando el espécimen completo, a menos que se obtengan restantes del enrase representativos para este propósito. Se indica en el informe de la prueba si la muestra de contenido de agua se obtuvo antes o después de la prueba de corte.
- Se prepara un esquema o se toma una foto del espécimen de prueba a la falla que muestre el ángulo de inclinación de la superficie de falla si el ángulo es mensurable.

2.3.3. Prueba de módulo de resiliencia (NCHRP 1-28A)

2.3.3.1. Preparación del espécimen de prueba

Se deben seguir los siguientes lineamientos (basados en análisis granulométrico) para determinar el tamaño del espécimen:

- Se usan tres muestras con un diámetro de 152 mm y 305 mm de altura para todos los materiales con tamaño de partícula mayor a 19 mm. El material mayor a 25.4 mm (1 in) debe descartarse.
- Use muestras de 102 mm de diámetro y 204 mm de altura para materiales con tamaño de partícula menor a 14 mm.
- Especímenes compactados en laboratorio: Todos los especímenes deben prepararse de acuerdo con la densidad (γ_d) y contenido de agua (w) especificados. Pueden prepararse con material de base, sub-base y subrasante. El contenido de agua de la muestra no debe variar $\pm$ 0.5% del valor requerido (para todos los materiales). La densidad de laboratorio no debe variar más de $\pm$ 1 % de la requerida.

2.3.3.2. Procedimiento de prueba

- Calibración inicial del sistema: El sistema de prueba incluyendo el instrumento de carga y la celda triaxial debe calibrarse antes de llevar a cabo cualquier prueba; esta calibración debe incluir pasos para minimizar la deformación del sistema y asegurar alineación del sistema-espécimen.
- Si se sigue este procedimiento de prueba, para todos los tipos de materiales usan una celda triaxial.

Suelos granulares para subrasante (procedimiento Ib)

Este procedimiento se usa para todos los suelos de subrasante compactados en laboratorio y donde el porcentaje que pasa la malla 200 es menor a 35%. Los especímenes reconstituidos generalmente se compactan directamente en el pedestal de la celda triaxial.

- Se ensambla la celda triaxial: Si aún no está en el lugar, coloque el espécimen en la celda triaxial.
- Se acopla el dispositivo de carga al espécimen.
- Se coloca el sistema de medición de desplazamiento y se verifica que trabaja correctamente.
- Se abren las líneas de drenaje que conducen al interior del espécimen, esto permite que se aplique el confinamiento al espécimen.
- Si aún no se conecta la línea para presión de confinamiento a la cámara triaxial, conectar.
- Se aplica una presión de confinamiento de 27.6 kPa. Se aplica un esfuerzo de contacto de 20% de la presión de confinamiento de tal manera que el pistón de carga se mantenga en contacto con el cabezal superior todo el tiempo.
- Condicionamiento. Se inicia la prueba aplicando 1000 repeticiones de carga con un esfuerzo axial de 60.72 kPa y un esfuerzo cíclico de 55.2 kPa usando una onda haversine. Se aplica la carga durante 0.2 segundo y un periodo de reposo de 0.8 segundo.
- Si la deformación permanente alcanza un valor de 5% durante el condicionamiento se debe terminar la prueba.
- Se comparan los desplazamientos de dos transductores durante la fase de condicionamiento de la prueba de Mr para identificar y minimizar una mala colocación del espécimen. Las dos mediciones de desplazamiento vertical resiliente debe tener una relación aceptable. Ésta se define como $R = Y_{max}/Y_{min}$ menor o igual a 1.10, donde Y_{max} es el desplazamiento mayor y Y_{min} es el valor más pequeño. Si se obtienen relaciones inaceptables no se debe continuar la prueba y se debe corregir la posición del espécimen. Se golpea ligeramente la base de la celda triaxial en la dirección correcta o se ajustan los tornillos en un lado de la celda para reducir la relación de excentricidad. La parte superior del espécimen (y cabezal superior) debe de estar en ángulos rectos con respecto al eje del espécimen. Una vez que se obtengan valores de deformación vertical aceptables, continúe la prueba hasta

terminarla. La alineación del espécimen es crítica para obtener buenos resultados de Mr.

- Espécimen de prueba: Se lleva a cabo la prueba de módulo de resiliencia siguiendo la secuencia de la Tabla 2.2 (procedimiento 1b-materiales de subrasante granulares y cohesión baja). Se inicia reduciendo el esfuerzo axial máximo a 9.66 kPa y el confinamiento a 13.4 kPa.
- Se aplican 100 repeticiones con el esfuerzo axial cíclico correspondiente usando una onda haversine que consiste en aplicar la carga por 0.2 segundo y después un periodo de descanso de 0.8 segundo. Se registra la deformación recuperable de cada LVDT para los últimos 5 ciclos.
- Se incrementa el esfuerzo axial máximo a 19.32 kPa y el confinamiento a 27,6 kPa y se repite la etapa anterior para este nivel de esfuerzo.
- Se continua la prueba con las secuencias restantes de la Tabla 2.2 (secuencia 3 a 20) y se registran las deformaciones recuperables. Si la deformación permanente excede 5 %, detenga la prueba y se reporta el resultado en el formato apropiado.
- Al finalizar la prueba, se reduce la presión de confinamiento a cero y se retira el espécimen de la cámara.
- Se retira la membrana del espécimen y se usa el espécimen completo para determinar el contenido de agua.

Tabla 2.2. Procedimiento 1b. Secuencia de prueba para materiales de subrasante granulares y de baja cohesión

Secuencia	Confinamiento (kPa)	Esfuerzo axial cíclico (kPa)	Esfuerzo axial máximo (kPa)	No. ciclos
0	27.6	55.2	60.7	1000
1	13.8	6.9	9.7	100
2	27.6	13.8	19.3	100
3	41.4	20.7	29.0	100
4	55.2	27.6	38.6	100
5	82.8	41.4	58.0	100
6	13.8	13.8	16.6	100
7	27.6	27.6	33.1	100
8	41.4	41.4	49.7	100
9	55.2	55.2	66.2	100
10	82.8	82.8	99.4	100
11	13.8	27.6	30.4	100
12	27.6	55.2	60.7	100
13	41.4	82.8	91.1	100
14	55.2	110.4	121.4	100
15	82.8	165.6	182.2	100
16	13.8	41.4	44.2	100
17	27.6	82.8	88.3	100
18	41.4	124.2	132.5	100
19	55.2	165.6	176.6	100
20	82.8	248.4	265.0	100

Materiales cohesivos para subrasante (procedimiento II)

Este procedimiento se usa para especímenes compactados para los cuales más del 35 % pasa la malla 200 y para especímenes inalterados de materiales cohesivos de subrasante.

- Se ensambla la celda triaxial.
- Especímenes rígidos y muy rígidos: Para especímenes de suelo cohesivo rígidos y muy rígidos (S_u > 36 kPa), la deformación debe medirse directamente o entre los cabezales usando especímenes con extremos pegados (el símbolo S_u es la resistencia en compresión en condiciones no drenadas). Estos especímenes tienen módulo de resiliencia mayor a 69 000 kPa. Si los extremos no están pegados, las mediciones de deformación axial se pueden tomar siguiendo una aproximación menos exacta, es decir, las mediciones de módulo de resiliencia pueden incrementarse empíricamente por las irregularidades en los contactos del espécimen.
- Especímenes suaves: La deformación axial de suelos de subrasante suaves (S_u < 37.9 kPa) no debe medirse con instrumentos colocados en el espécimen.
- Pegado de los extremos del espécimen: Todos los especímenes deben pegarse al cabezal superior e inferior usando una pasta que tenga un espesor no mayor a 3.0 mm. La pasta permite ajustar el cabezal superior para eliminar cualquier imperfección en las superficies del espécimen.
- La pasta debe prepararse usando agua y cemento mezclado con una relación (W/C) de 0.40. Una vez que el agua se mezcla con el cementante, se inicia la hidratación, de lo cual se obtiene consistencia rápidamente. Se recomienda tiempo de curado de 120 min mínimo; esto asegura que el cementante sea lo suficientemente resistente para soportar los esfuerzos aplicados en la prueba de módulo de resiliencia sin poner en riesgo la exactitud y confiabilidad de las mediciones.
- Para agilizar esta operación, el cementante debe colocarse sobre el pedestal, similar a lo que se hace con el cabeceo de los cilindros de concreto.
- Colocación de los sensores de desplazamiento axial: Se coloca la instrumentación elegida para medir los desplazamientos axiales. Para medir los desplazamientos del extremo inferior a superior, se colocan los LVDTs en barras de aluminio o acero que se colocan entre los cabezales. Si se usan sujetadores, colóquelos en puntos a ¼ de diámetro sobre el espécimen usando dos medidores de altura o para asegurar que los sujetadores se posicionan en forma horizontal a la altura correcta. Cada medidor de altura consiste de dos varillas de aluminio maquinadas a la longitud correcta. Estas varillas se colocan al lado de los sujetadores para asegurar una localización correcta. Asegure que la instrumentación para desplazamientos trabaja de forma apropiada; se desplaza cada uno y observe el voltaje de salida mostrado, en el sistema de adquisición.
- Se conecta el suministro de aire a la cámara triaxial.

- Se abren todas las válvulas de drenaje que conducen al interior del espécimen; esto es para que se desarrolle la presión de confinamiento en el espécimen.
- Se aplica una presión de confinamiento de 27.6 kPa al espécimen. Se debe aplicar una carga de contacto al espécimen igual a 20 % de la presión de confinamiento de tal forma que el pistón de carga se mantenga en contacto con el cabezal superior.
- Condicionamiento: Se inicia la prueba aplicando un mínimo de 1000 repeticiones de carga equivalente a un esfuerzo axial máximo de 53.8 kPa y un esfuerzo axial cíclico de 48.3 kPa usando una onda tipo haversine, con una pulsación de 0.2 de segundo seguida por un período de retraso de 0.8 de segundo.
- Si la deformación vertical permanente alcanza 5% en la etapa de preacondicionamiento, se debe terminar esta etapa. Se debe de llevar a cabo una revisión del proceso de compactación para identificar la razón o razones por las cuales la compactación no fue adecuada. Si no se encuentra explicación, los materiales deben recompactarse y ensayarse nuevamente. Si la muestra alcanza 5% de deformación permanente vertical durante el precondicionamiento, debe terminarse la prueba y se debe completar el registro. No es necesario ensayar el material nuevamente.
- Excentricidad de la carga. Minimizar la excentricidad de la carga a un nivel aceptable es muy importante en la prueba de módulo de resiliencia. Para hacer esto, observe los datos de salida de las mediciones independientes durante la etapa de preacondicionamiento. Para esta condición, coloque dos LVDTs o medidores de proximidad entre el cabezal superior e inferior.
- Espécimen de prueba: Se lleva a cabo la prueba de módulo de resiliencia siguiendo la secuencia de carga mostrada en la Tabla 3.3 (procedimiento II-Subrasantes de suelo cohesivo). Iniciando con la reducción del esfuerzo axial máximo a 38.6 kPa y aplicando un esfuerzo de confinamiento de 55.2 kPa.
- Se aplica 100 repeticiones del correspondiente esfuerzo axial cíclico usando un pulso de carga haversine que consiste de 0.2 segundo de carga seguido por un periodo de descanso de 0.8 segundo. Se registra la deformación recuperable promedio para cada LVDT para los últimos cinco ciclos.
- Reduzca el esfuerzo axial máximo a 35.8 kPa e incremente la presión de confinamiento a 41.4 kPa y repita el paso previo con este nuevo nivel de esfuerzos.
- Continúe la prueba para las secuencias restantes de la Tabla 2.3. Si la deformación permanente total excede 5 %, detenga la prueba y reporte el resultado en el formato adecuado.
- Al final de la prueba, reduzca la presión de confinamiento a cero y remueva la muestra de la celda triaxial.
- Se retira la membrana del espécimen y éste se usa para determinar el contenido de agua.

Tabla 2.3. Procedimiento II. Subrasante de suelo cohesivo

Secuencia	Presión de confinamiento (kPa)	Esfuerzo axial cíclico (kPa)	Esfuerzo axial máximo (kPa)	No. repeticiones
0	27.6	48.3	53.8	1000
1	55.2	27.6	38.6	100
2	41.4	27.6	35.9	100
3	27.6	27.6	33.1	100
4	13.8	27.6	30.4	100
5	55.2	48.3	59.3	100
6	41.4	48.3	56.6	100
7	27.6	48.3	53.8	100
8	13.8	48.3	51.1	100
9	55.2	69.0	80.0	100
10	41.4	69.0	77.3	100
11	27.6	69.0	74.5	100
12	13.8	69.0	71.8	100
13	55.2	96.6	107.6	100
14	41.4	96.6	104.9	100
15	27.6	96.6	102.1	100
16	13.8	96.6	99.4	100

2.3.4. Procedimiento de deformación permanente

La prueba de deformación permanente no tiene una norma. Por lo tanto, para este tipo de pruebas, se ha utilizado el siguiente procedimiento.

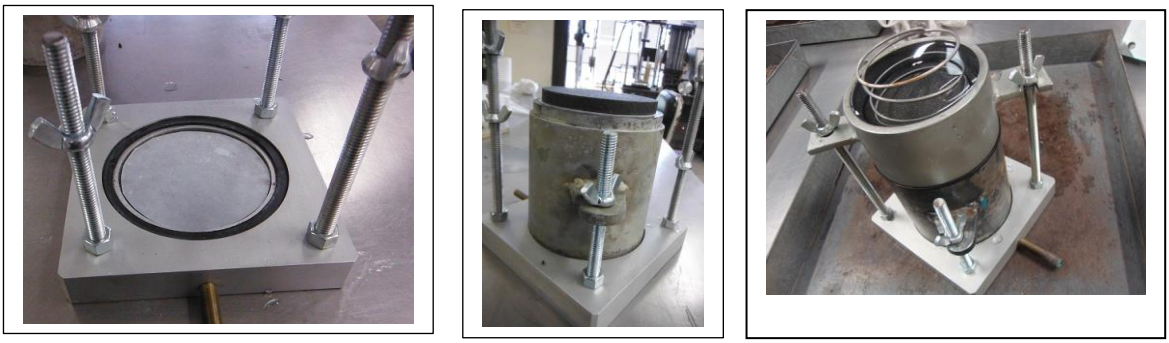
- Preparación de la mezcla suelo-agua o suelo-agua-polímero, como ya se describió en un inciso anterior.
- Fabricación del espécimen de prueba en las condiciones óptimas de compactación (con respecto a la prueba Proctor estándar).
- Acondicionamiento del espécimen de acuerdo al procedimiento especificado (secado, humedecimiento, almacenamiento, etc).
- Se coloca el espécimen en el equipo triaxial.
- Se colocan dos transductores para el registro de la deformación del espécimen. Estos transductores se colocan en el exterior de la celda triaxial.
- Se programa la prueba para que durante ésta, se apliquen 20 000 repeticiones de carga, con un esfuerzo desviador de 97 kPa y una presión de confinamiento de 14 kPa.
- Al finalizar la prueba, se desensambla la celda triaxial, se extrae el espécimen y se disgrega para determina su contenido de agua.
- Con los datos obtenidos se grafica el número de ciclos versus deformación axial del espécimen.

2.3.5. Prueba de permeabilidad

La conductividad hidráulica o coeficiente de permeabilidad (k), es la velocidad con la que fluye el agua a través de un suelo bajo un gradiente hidráulico. Para determinar la conductividad hidráulica en el laboratorio se puede utilizar un permeámetro de carga constante o carga variable; en esta investigación se utilizó el procedimiento de carga constante usando un permeámetro de pared rígida. El procedimiento utilizado es como se describe a continuación:

Preparación del espécimen y prueba de permeabilidad

- Se prepararon las mezclas como se describió en incisos anteriores.
- Las muestras se compactaron en moldes de 101.6 mm de diámetro y 116.43 mm de altura. Éstas se compactaron en tres capas aplicando 25 impactos por capa. Para la compactación se utilizó el pisón de 2.5 kg de peso y 30.5 cm de altura de caída.
- Una vez que se cumplió el tiempo de curado (secado posterior a la compactación) la muestra se colocó sobre la base del permeámetro, la cual cuenta con un disco poroso que es el que permite el flujo de agua. Previo a la colocación de la muestra, el disco poroso y el papel filtro se saturan (Figura 2.8a).
- Sobre la superficie de la muestra se coloca un papel filtro (Figura 2.8b) y sobre el papel filtro se coloca otro disco poroso (Figura 2.8b). Se colocan el collarín del molde y un resorte que presionará el disco durante la prueba para que permanezca en contacto con la superficie de la muestra (Figura 2.8c).



(a) **(b)** **(c)**

Figura 2.8. (a) Papel filtro sobre el disco poroso de la base; (b) Papel filtro húmedo sobre la muestra; (c) Molde con collarín

- Se coloca agua en la superficie del disco poroso superior y se atornilla la placa superior del molde para cerrar el sistema.
- El sistema completo se coloca sobre un pedestal.
- La conexión de la placa superior del molde se conecta a una celda con agua (Figura 2.9).
- Se permite que el agua fluya por gravedad (Figura 2.9).

Figura 2.9. Sistema para medir la permeabilidad

- Después de haber permitido flujo de agua por gravedad, se aplica presión al agua para que continúe el flujo. En esta fase se observa cómo van fluyendo las burbujas de aire, lo que indica que la muestra no está completamente saturada aún.
- Cuando se tiene un flujo continuo de agua se llevan a cabo las mediciones. Es decir, se mide la cantidad de agua que fluye en un cierto periodo de tiempo.
- Después de obtener los datos, la permeabilidad se calcula como:

$$k = \frac{QxL}{Ath}$$

En donde:
k = Permeabilidad,
Q = Cantidad de agua que fluye en el tiempo de medición,
L = Longitud de la muestra,
A = Área transversal a través de la cual se presenta el flujo,
t = Tiempo de medición
h = Gradiente hidráulico.

3. Proyecto 1

3.1. Introducción

De acuerdo con lo mostrado en el Capítulo 1, los polímeros han sido sujeto de investigaciones en varios países. Sin embargo, cada polímero tiene sus propias características que en la mayor parte de los casos no es revelada por los fabricantes o distribuidores. En este proyecto se presentan los resultados de un polímero desarrollado por un ingeniero mexicano. De acuerdo con él, este producto emulsificado base agua, no es corrosivo y no contamina. Funciona como un cementante y como un agente de unión que permite incrementar y optimizar la atracción molecular, controla la expansión y la contracción lineal, aumentando el CBR (http://polec.com.mx/portfolio/tecnosoil). La Figura 3.1 muestra el aspecto de este polímero.

Figura 3.1. Aspecto del polímero en estudio

3.2. Muestreo y preparación del suelo en estudio

El material utilizado en este proyecto fue un limo proveniente de la excavación en donde se alojó una pista de prueba para el simulador de vehículos pesados (HVS) del Instituto Mexicano del Transporte (Figura 3.2).

En este proyecto se solicitó que el suelo por estudiar tuviera un límite líquido inferior a 15%; el material del HVS por sí solo no cumplía con este requerimiento, por lo tanto, se le mezcló con 30 % de arena de mina extraída del Banco Arcila.

Cabe señalar que el material de la excavación del HVS contenía boleos, pero en el proyecto se utilizó solo material que pasó la malla No. 4.

Figura 3.2. Material de la excavación del HVS

Una vez que se obtuvo la cantidad de material de la excavación, éste se mezcló con la arena de mina (material pasando malla No. 4), se homogeneizó y se almacenó (Figura 3.3).

Figura 3.3. Cuarteo y mezclado del material

3.3. Determinación de las propiedades índice del suelo en estado natural

Después de cuartear el material, se determinaron sus propiedades índice, las cuales se resumen en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Resumen de las propiedades del suelo en estudio

Característica	Valor
Clasificación de acuerdo con el SUCS	SM
Límite líquido (%)	38
Límite plástico (%)	25
Índice de plasticidad (%)	13
Gravedad específica	2.58
Pasa malla No. 200 (%)	35.53
Arena (%)	64.46

3.4. Características de compactación del suelo natural

La Figura 3.4 es la curva de compactación Proctor estándar obtenida con el procedimiento ASTM D 698-12. De ésta se obtuvo un contenido de agua óptimo de 18.5% y un peso volumétrico seco máximo de 15.90 kN/m^3. Estos valores son las características de control para preparación de los especímenes de prueba.

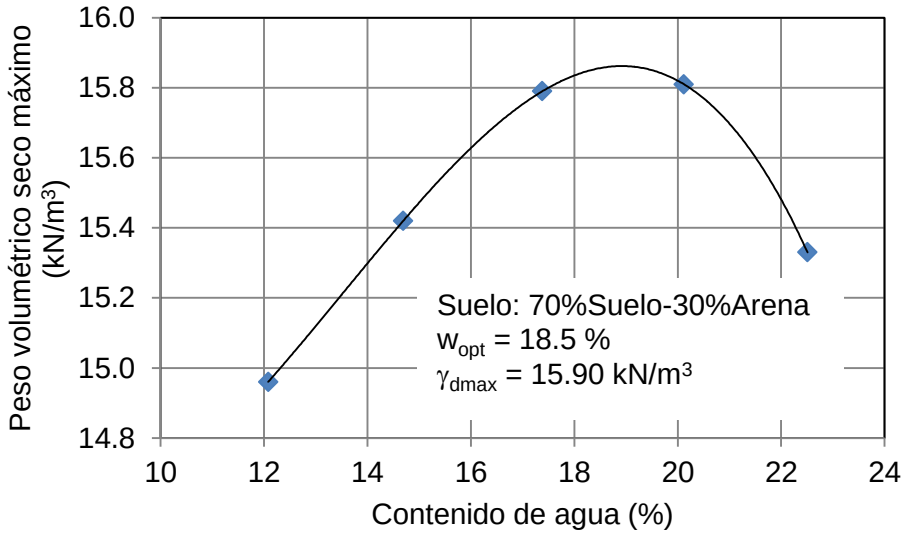


Figura 3.4. Curva de compactación del suelo natural

3.5. Mezclas de prueba y programa de ensayes

Durante el desarrollo de la investigación se utilizó sólo una mezcla de suelo-polímero (Tabla 3.2); los especímenes de control se fabricaron con suelo natural. La cantidad de polímero utilizado fue 6% con respecto a la cantidad de agua para alcanzar el contenido de agua óptimo. Es decir, el 6% de la cantidad de agua a agregar para alcanzar el contenido de agua óptima se reemplazó con 6% de polímero.

Tabla 3.2. Mezclas de estudio

Mezcla	Materiales mezclados	Polímero (% con respecto a contenido de agua óptimo)
1	Arena limosa-agua	0
2	Arena limosa-agua-polímero	6%

En la Tabla 3.3 se resumen el programa de pruebas realizadas en este proyecto y los tiempos de curado utilizados en la investigación.

Tabla 3.3. Pruebas con suelo-polímero y suelo natural

Tipo de prueba	Tiempo de secado, días	Tiempo de humedecimiento (días	Tiempo de reposo después de secado o humedecimiento (días)	No. de pruebas
Resistencia a compresión del suelo natural	Después de compactar			3
Resistencia a compresión del suelo natural	7	***	14	3
Resistencia a compresión del suelo natural	28	***	14	3
Resistencia a compresión del suelo-polímero	0	***	***	3
Resistencia a compresión del suelo-polímero	7	***	14	3
Resistencia a compresión del suelo-polímero	28	***	14	3
Resistencia a compresión del suelo natural	***	14	14	3
Resistencia a compresión del suelo-polímero	***	14	14	3
CBR del suelo natural	7	4	0	1
CBR del suelo-polímero	7	4	0	1
Límite líquido y límite plástico del suelo natural	No aplica	No aplica	No aplica	3
Límite líquido y límite plástico del suelo-polímero	7	No aplica	No aplica	3
Deformación permanente del suelo natural	Después de compactar			1
Deformación permanente del suelo natural	7	***	14	1
Deformación permanente del suelo natural	***	14	14	1
Deformación permanente del suelo-polímero	Después de compactar			1
Deformación permanente del suelo-polímero	7	***	14	1
Deformación permanente del suelo-polímero	***	14	14	1

3.6. Resultados obtenidos

3.6.1. Límites de consistencia

Para determinar los límites de consistencia del suelo-polímero, a 4 kg de suelo natural se le agregó la solución de agua-polímero. Posterior al mezclado el suelo se

dejó secar durante 7 días. Después se cribó por la malla No. 40 para obtener los límites de consistencia. Los resultados obtenidos se muestran la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Límites de consistencia

Suelo natural			Suelo-polímero		
LL (%)	LP (%)	IP (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)
38	25	13	41	24	17

Los resultados anteriores indican que el límite líquido e índice plástico se incrementan ligeramente cuando el suelo tiene polímero. La clasificación del suelo cambia de una arena limosa (SM) a una arena arcillosa (SC), por lo tanto, en cuanto a límites de consistencia, el polímero parece no mejorarlos.

3.6.2. Valor de Soporte California (CBR)

El CBR es otra de las propiedades utilizada cuando se estudia el efecto de aditivos en las propiedades del suelo. Esta prueba consiste en compactar un suelo en un molde, posteriormente saturarlo y después aplicarle carga. Aun cuando ya se describió el procedimiento de prueba, aquí se detallan puntos no indicados previamente.

Muestras de suelo con polímero (Figura 3.5)

- ✓ A una muestra de 4 kg se adicionó la solución agua-polímero.
- ✓ Se mezcló completamente el suelo-solución.
- ✓ Se compactaron tres muestras en un molde de 15.2 cm de diámetro por 17.7 cm de altura. Las condiciones de compactación fueron:
  Muestra 1: 10 golpes, material colocado en tres capas.
  Muestra 2: 25 golpes, material colocado en tres capas.
  Muestra 3: 56 golpes, material colocado en tres capas.
- ✓ Los moldes con las muestras se expusieron al ambiente durante 7 días para que se secaran. Después del tiempo de secado, las muestras se pusieron a saturar durante cuatro días (96 horas). Antes de que iniciara la saturación, se colocaron los micrómetros para medir la expansión del suelo.
- ✓ Después de los cuatro días de saturación, las muestras se colocaron en un marco de carga y se aplicó carga a una velocidad de 1.27 mm/min.
- ✓ El valor de CBR se determinó obteniendo los valores de carga soportados por el suelo para desplazamientos específicos.

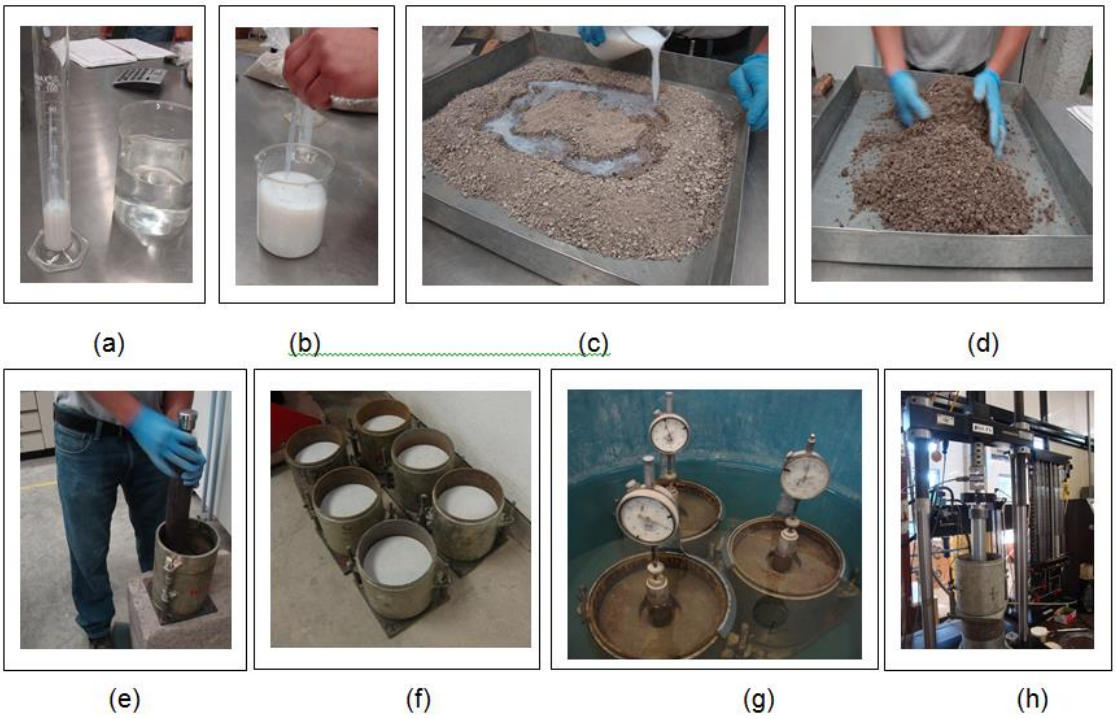


Figura 3.5. (a) Agua y polímero; (b) Solución de agua-polímero; (c) Adición de solución al suelo; (d) Mezcla de suelo-agua-polímero; (e) Compactación de muestra; (f) Secado de muestras al ambiente; (g) Saturación durante 96 horas y; (h) Aplicación de carga para determinar CBR

De los resultados se obtuvo que el suelo natural indicó un CBR de 9% mientras que el del suelo-polímero fue de aproximadamente 11 (Figura 3.6). De esto se concluye que el polímero incrementó el CBR marginalmente.

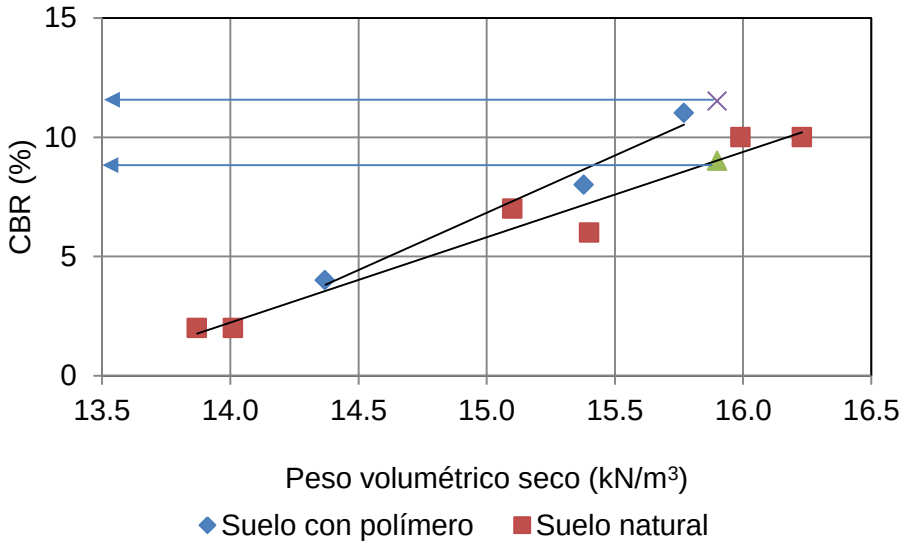


Figura 3.6. CBR del suelo y del suelo-polímero

3.6.3. Resistencia en compresión simple

La resistencia en compresión simple es otro de los parámetros medidos durante esta investigación. El procedimiento seguido fue el siguiente:

- Suelo se mezcló la solución agua-polímero.

- Después del mezclado, las muestras se compactaron en un molde de 71 mm de diámetro x 144 mm de altura. Las muestras se compactaron en 8 capas; en cada capa se aplicaron 14 golpes con un pisón de 1 kg de masa y 30.5 cm de altura de caída. Las características para compactar los especímenes fueron w_{opt} = 18.5% y γ_{dmax} = 15.90 kN/m^3. Para el contenido de agua se permitió una variación de ±0.5% y ±1% para el peso volumétrico seco.

- Posterior a la fabricación de los especímenes, estos fueron medidos y pesados.

- Los especímenes se ensayaron después de cumplir alguna de las siguientes condiciones:
  1. Después de compactarse,
  2. Después de ser secados 7 días (Figura 3.7a y 3.7b),
  3. Después de ser secados 28 días (Figura 3.7a y 6.7b),
  4. Después de ser humedecidos 14 días (Figura 3.7c).

(a) **(b)** **(c)**

Figura 3.7. Humedecimiento o secado de los especímenes

Las características de los especímenes con y sin polímero ensayados para las diferentes condiciones se resumen en la Tabla 3.5. En las Figuras 3.8, 3.9, 3.10 y 3.11 se presentan las curvas esfuerzo-deformación de los especímenes ensayados en las diferentes condiciones.

Tabla 3.5. Características de los especímenes

Esp.	Condiciones de los especímenes después de compactar					Condiciones después de secado o humedecimiento y previo a ensayarse				
	w (%)	Peso (g)	d (cm)	h (cm)	γ_d (kN/m^3)	w (%)	Peso (g)	d (cm)	h (cm)	γ_d (kN/m^3)
Después de compactar										
P38CA	18.5	1091.77	7.084	14.393	15.93	17.90	1090.63	7.095	14.429	15.91
P39CA	18.5	1085.48	7.088	14.428	15.78	18.00	1084.47	7.099	14.427	15.79
P40CA	18.5	1087.04	7.086	14.411	15.83	18.10	1085.72	7.108	14.447	15.73
P35SA	17.83	1087.47	7.084	14.415	15.83	17.83	1087.47	7.100	14.448	15.83
P36SA	17.70	1086.72	7.084	14.407	15.84	17.70	1086.72	7.097	14.452	15.84
7 días de secado										
P29CA	18.6	1084.16	7.092	14.412	15.75	5.64	969.68	7.059	14.373	16.01
P30CA	18.6	1087.00	7.087	14.393	15.84	5.70	972.54	7.039	14.372	16.14
P31CA	18.5	1092.83	7.077	14.396	15.97	5.62	977.92	7.045	14.358	16.23
P29SA	18.3	1090.95	7.094	14.409	15.88	5.58	976.82	7.073	14.378	16.07
P30SA	18.3	1088.61	7.091	14.400	15.87	5.64	974.24	7.062	14.377	16.06
P31SA	18.3	1082.50	7.081	14.387	15.84	5.54	966.55	7.071	14.368	15.92
28 días de secado										
P11CA	18.3	1084.00	7.084	14.358	15.89	3.71	958.28	7.048	14.336	16.20
P12CA	18.4	1091.88	7.075	14.369	16.02	3.67	952.10	7.059	14.358	16.03
P13CA	18.4	1091.52	7.091	14.373	15.93	3.72	958.99	7.049	14.328	16.22
P14SA	18.3	1097.57	7.092	14.359	16.04	3.80	964.01	7.056	14.339	16.25
P15SA	18.3	1091.29	7.074	14.398	15.99	3.79	959.14	7.052	14.371	16.15
14 días de humedecimiento										
P20SA	18.1	1084.81	7.092	14.372	15.87	22.38	1121.43	7.113	14.458	15.65
P24SA	18.1	1096.39	7.084	14.376	16.07	21.58	1129.80	7.116	14.476	15.83
P28SA	18.3	1083.61	7.089	14.410	15.80	22.33	1121.97	7.131	14.536	15.53
P24CA	18.4	1084.00	7.076	14.410	15.85	22.04	1121.79	7.104	14.503	15.68
P25CA	18.6	1094.58	7.082	14.401	15.96	21.66	1126.84	7.118	14.506	15.74

Nota: w = Contenido de agua; d = diámetro; h = Altura del espécimen; γ_d = Peso volumétrico seco.

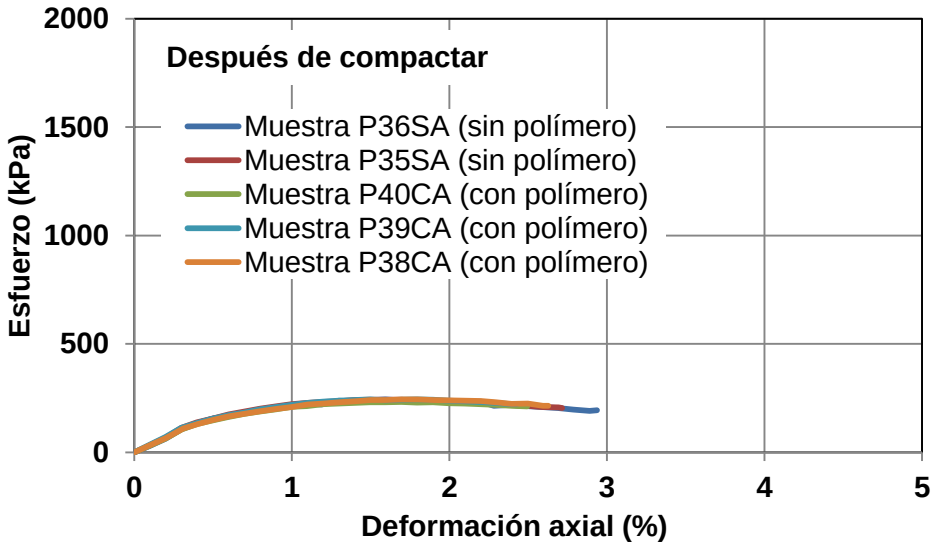


Figura 3.8. Curvas esfuerzo-deformación de especímenes ensayados después de haber sido compactados

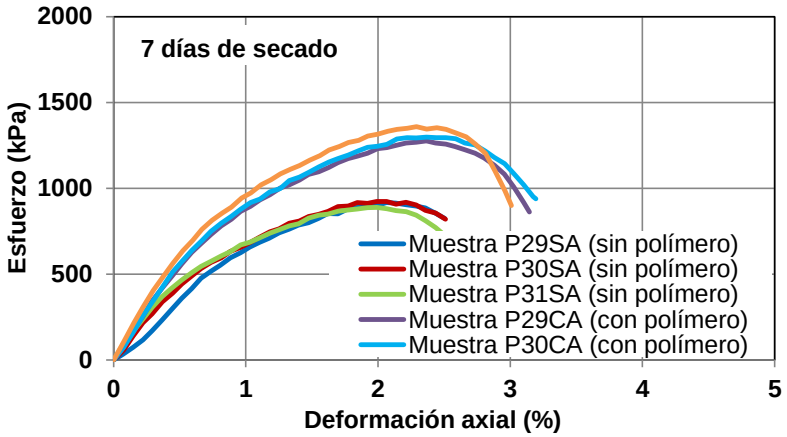


Figura 3.9. Curvas esfuerzo-deformación de especímenes ensayados después de haber sido secados durante 7 días

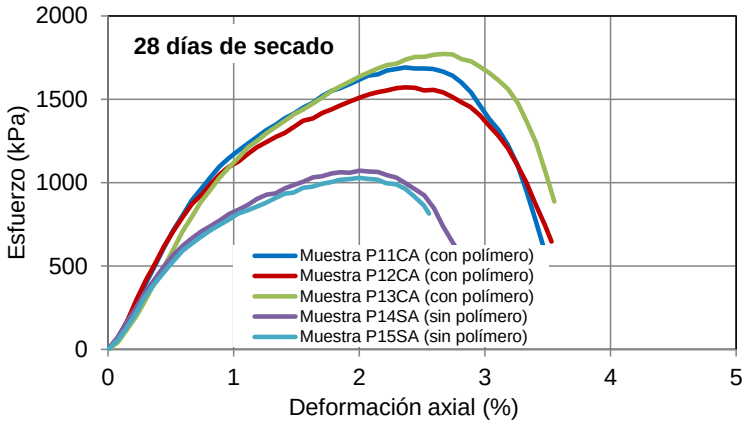


Figura 3.10. Curvas esfuerzo-deformación de especímenes ensayados después de haber sido secados durante 28 días.

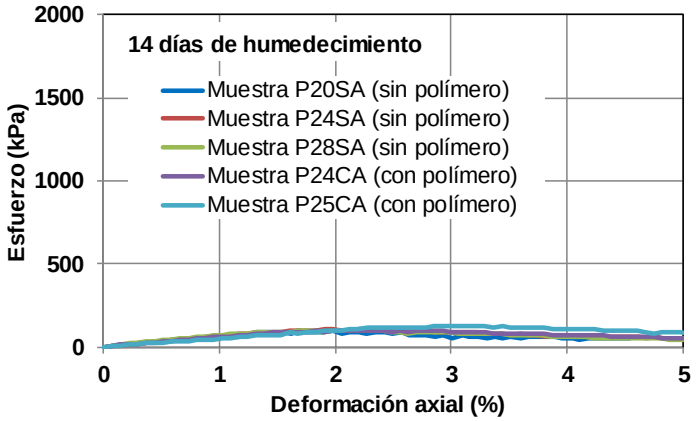


Figura 3.11. Curvas esfuerzo-deformación de especímenes ensayados después de haber sido humedecidos 14 días

De los resultados anteriores se observa que ambas mezclas (suelo natural y suelo-polímero) presentan resistencias máximas similares para especímenes que fueron ensayados después de haber sido compactados (Figura 3.8). Para la condición de 7 días de secado, los resultados indican que los especímenes que contienen el polímero tienen una resistencia 45% superior a los especímenes de suelo natural (Figura 3.9). Para 28 días de secado, el suelo-polímero presenta una resistencia 60% mayor con respecto a la del suelo natural (Figura 3.10). Por lo tanto, para las condiciones de 7 y 28 días de secado sí se observa un efecto positivo del polímero. Otra de las condiciones estudiadas fue la de humedecimiento. Para esto, muestras con o sin polímero se humedecieron durante 14 días, se guardaron durante 14 días y posteriormente se ensayaron. En este caso, tanto la resistencia del suelo natural como la del suelo-polímero se reducen a resistencias por debajo de la presentada en especímenes ensayados inmediatamente después de compactarse. Por lo tanto, al parecer, si el suelo se humedece, independientemente de si tiene o no el polímero, la resistencia se reduce. Cabe aclarar que los especímenes no fueron secados previo al humedecimiento, sino que se compactaron e inmediatamente se humedecieron.

Los puntos máximos de las curvas esfuerzo-deformación también pueden resumirse como se muestra en la Figura 3.12. De esta gráfica se observa inmediatamente que las condiciones de secado son en las cuales se puede ver el efecto positivo de aplicar el polímero.

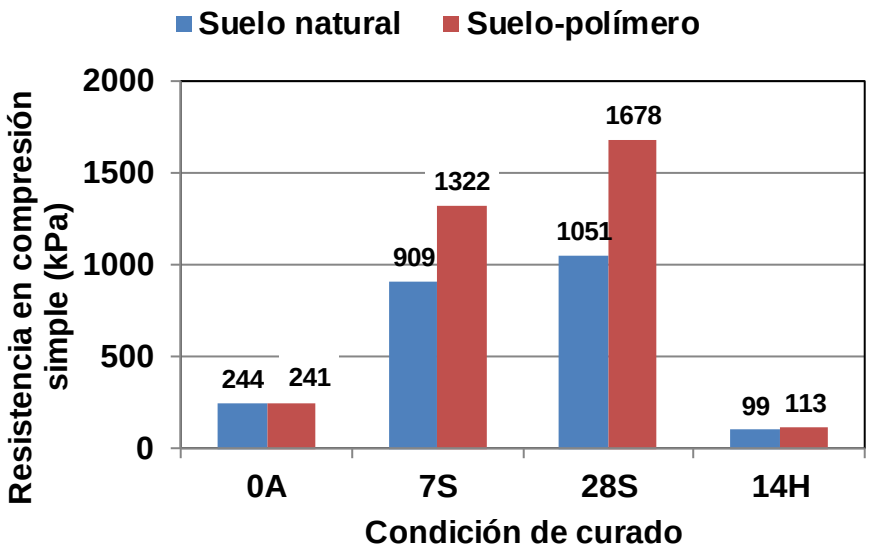


Figura 3.12. Resumen de las resistencias en compresión simple

De los resultados anteriores se observa que el polímero sí muestra resistencias en compresión simple mayores, siempre y cuando después de la compactación, se permita el secado de la mezcla suelo-polímero.

3.6.4. Módulo de resiliencia

La Tabla 3.6 muestra las características de los especímenes ensayados en módulo de resiliencia y las Figuras 3.13, 3.14, 3.15 y 3.16 muestran las gráficas obtenidas.

Tabla 3.6. Características de las muestras ensayadas en módulo de resiliencia

Esp.	Condiciones iniciales de los especímenes					Condiciones después de secado				
	w (%)	Peso (g)	d (cm)	h (cm)	γ_d (kN/m^3)	w (%)	Peso (g)	d (cm)	h (cm)	γ_d (kN/m^3)
Muestras después de compactar										
P38CA	18.5	1091.77	7.084	14.393	15.93	17.90	1090.63	7.095	14.429	15.91
P39CA	18.5	1085.48	7.088	14.428	15.78	18.00	1084.47	7.099	14.427	15.79
P40CA	18.5	1087.04	7.086	14.411	15.83	18.10	1085.72	7.108	14.447	15.73
P35SA	17.83	1087.47	7.100	14.448	15.83	17.83	1087.47	7.100	14.448	15.83
P36SA	17.70	1086.72	7.097	14.452	15.84	17.70	1086.72	7.097	14.452	15.84
P37SA	17.87	1087.03	7.099	14.428	15.84	17.87	1087.03	7.099	14.428	15.84
7 días de secado										
P8CA	18.3	1094.14	7.086	14.358	16.02	5.11	972.03	7.047	14.302	16.26
P9CA	18.3	1084.02	7.089	14.372	15.85	4.84	962.37	7.049	14.338	16.09
P10CA	18.3	1094.08	7.086	14.364	16.01	4.67	969.83	7.048	14.328	16.26
P6SA	18.3	1092.34	7.082	14.370	16.00	5.00	970.32	7.057	14.338	16.17
P7SA	18.2	1090.00	7.096	14.370	15.92	5.02	967.96	7.051	14.355	16.13
P8SA	18.2	1090.23	7.090	14.366	15.95	4.95	968.58	7.056	14.356	16.13
28 días de secado										
P16CA	18.3	1089.27	7.079	14.425	15.91	3.80	955.98	7.060	14.371	16.06
P18CA	18.3	1085.00	7.087	14.395	15.84		952.62	7.056	14.356	
P17SA	18.1	1087.55	7.083	14.395	15.93	3.71	956.57	7.055	14.371	16.11
P13SA	18.3	1087.62	7.083	14.378	15.92	3.80	955.16	7.056	14.362	16.07
P12SA	18.4	1090.65	7.081	14.339	16.00	3.82	963.31	7.054	14.305	16.28
14 días de humedecimiento										
P21CA	18.4	1096.86	7.088	14.343	16.06	21.69	1131.08	7.117	14.448	15.86
P22CA	18.4	1089.06	7.089	14.351	15.93	20.83	1123.03	7.118	14.438	15.87
P23CA	18.4	1083.00	7.079	14.388		21.44	1119.13	7.122	14.485	15.67
P21SA	18.1	1086.82	7.086	14.387	15.91	21.76	1120.03	7.121	14.466	15.66
P22SA	18.0	1082.00	7.079	14.403	15.87	22.09	1115.81	7.12	14.491	15.53
P23SA	18.1	1096.42	7.082	14.387	16.07	21.82	1130.83	7.115	14.484	15.81

Nota: w = Contenido de agua; d = diámetro; h = Altura del espécimen; γ_d = Peso volumétrico seco.

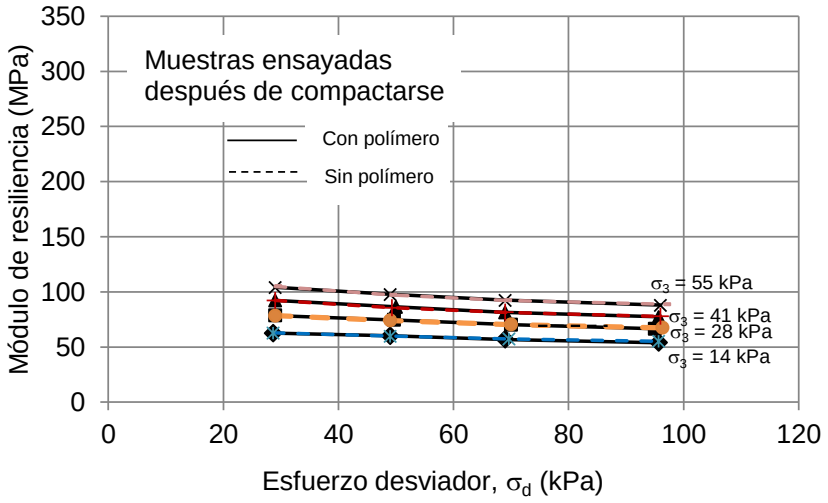


Figura 3.13. Módulos de resiliencia de muestras después de compactadas

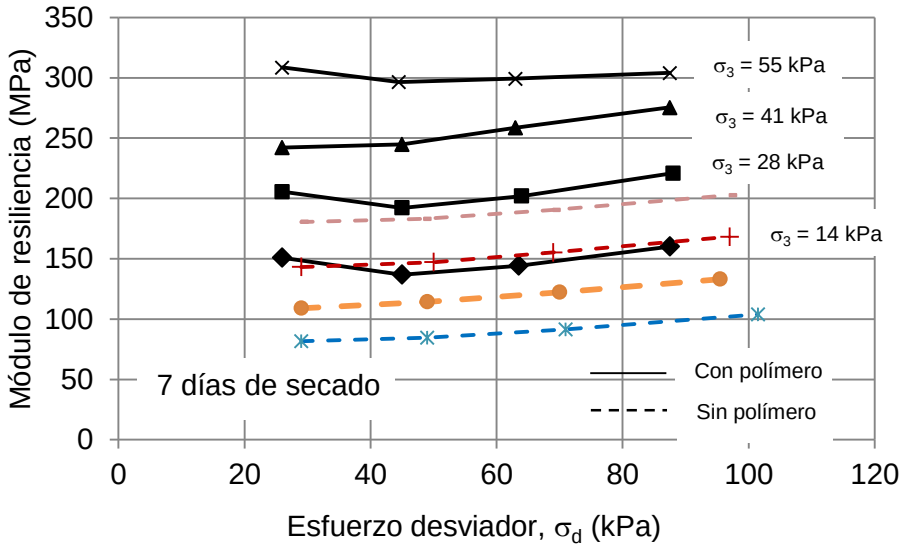


Figura 3.14. Módulos de resiliencia de muestras secadas durante 7 días

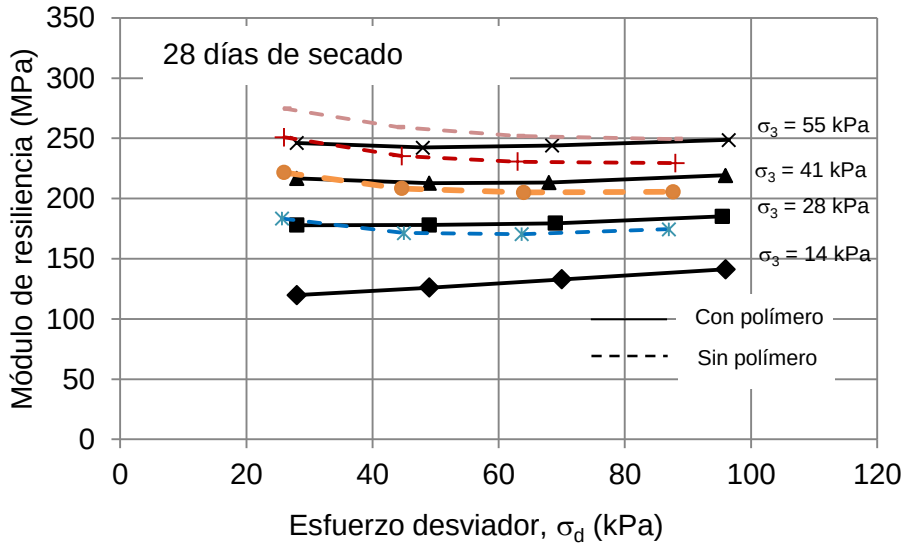


Figura 3.15. Módulos de resiliencia de muestras secadas durante 28 días

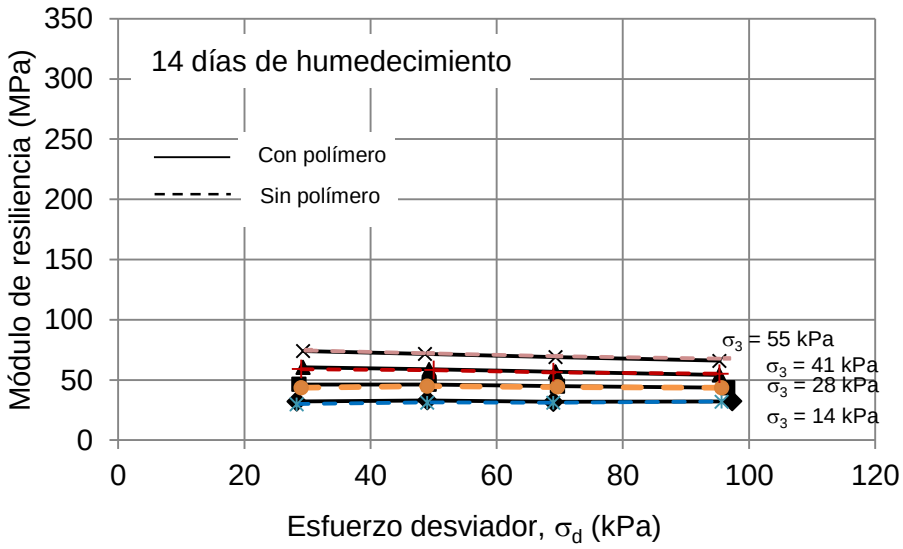


Figura 3.16. Módulos de resiliencia de muestras humedecidas durante 14 días

Los resultados anteriores muestran que los módulos de resiliencia de especímenes ensayados inmediatamente después de compactarse no muestran diferencias, es decir, tanto el suelo natural como el suelo-polímero muestran módulos de resiliencia similares (Figura 3.13). Para el caso de 7 días de secado, los módulos de resiliencia son más altos para el suelo que contiene el polímero. Por ejemplo, para un confinamiento de 55 kPa, el suelo natural presenta un módulo de resiliencia de aproximadamente 200 kPa mientras que el suelo-polímero tiene un valor de 300 kPa, lo cual indica un incremento de un 50% (Figura 3.14). Sin embargo, una vez que el suelo tiene un mayor tiempo de secado (28 días), los módulos de resiliencia tienden a ser similares para ambas condiciones (Figura 3.15). Cuando el suelo se humedece, los módulos de resiliencia son similares en ambas condiciones, pero, además, se reducen con respecto a los valores que se obtienen en los especímenes que se ensayan inmediatamente después de compactar (Figura 3.16). Por lo tanto, en módulo de resiliencia, el suelo-polímero solo presenta beneficios positivos para muestras secadas durante 7 días. Las otras condiciones presentan resultados similares.

3.6.5. Deformación permanente

La Tabla 3.7 resume las características de los especímenes ensayados en deformación y las Figuras 3.17 y 3.18 son las curvas de deformación contra número de ciclos para las condiciones de prueba estudiadas.

Tabla 3.7. Características de las muestras ensayadas en deformación permanente

Esp.	Condiciones iniciales de los especímenes					Condiciones después de secado				
	w (%)	Peso (g)	d (cm)	h (cm)	γ_d (kN/m^3)	w (%)	Peso (g)	d (cm)	h (cm)	γ_d (kN/m^3)
Muestras después de compactar										
P37CA	18.5	1093.84	7.089	14.374	15.96	17.80	1089.91	7.093	14.421	15.93
P36CA	18.5	1091.53	7.083	14.395	15.93	18.21	1092.41	7.097	14.398	15.92
P4SA	18.3	1091.40	7.092	14.359	15.95	17.85	1087.39	7.094	14.387	15.88
P5SA	18.3	1093.09	7.096	14.370	15.94	17.92	1089.48	7.086	14.396	15.96
7 días de secado										
P7CA	18.3	1098.2	7.087	14.373	16.06	5.06	978.65	7.048	14.296	16.38
P9SA	18.2	1086.85	7.081	14.385	15.93					
28 días de secado										
P19CA	18.3	1082.00	7.092	14.382	15.79	3.40	947.43	7.059	14.357	15.99
P18SA	18.1	1089.00	7.088	14.388	15.93	3.44	955.03	7.064	14.377	16.07
14 días de humedecimiento										
P26CA	18.6	1084.00	7.080	14.42	15.79	21.98	1121.29	7.115	14.535	15.60
P25SA	18.1	1094.06	7.087	14.349	16.06	21.99	1129.85	7.115	14.444	15.82

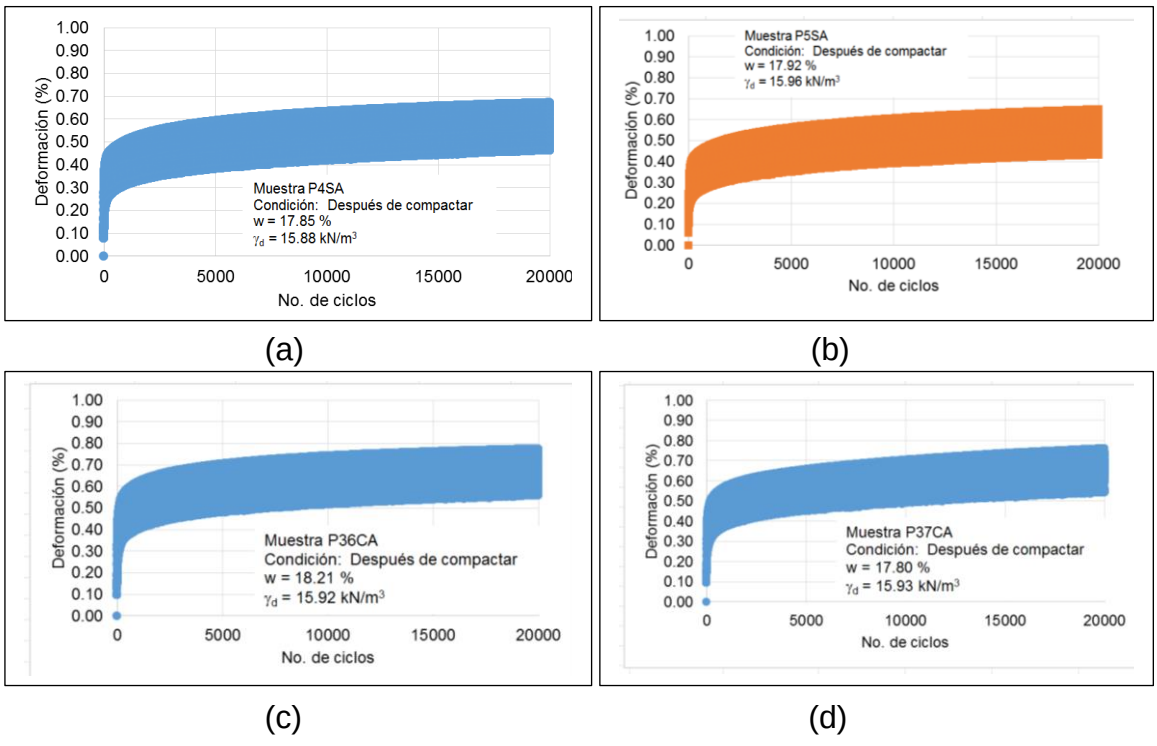


Figura 3.17. Muestras ensayadas después de compactar. (a y b) Muestras de suelo natural; (c y d) Muestras de suelo-polímero

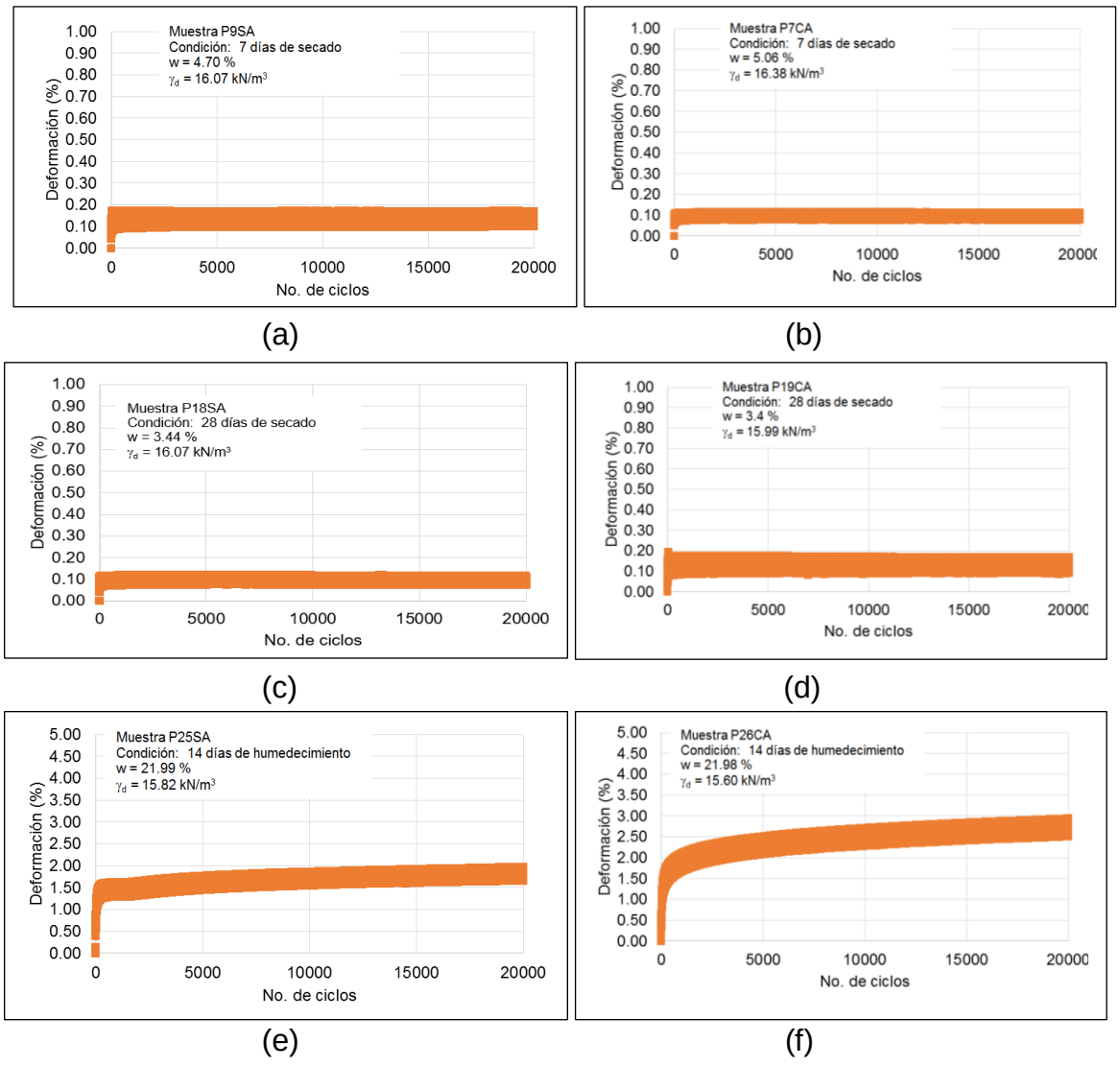
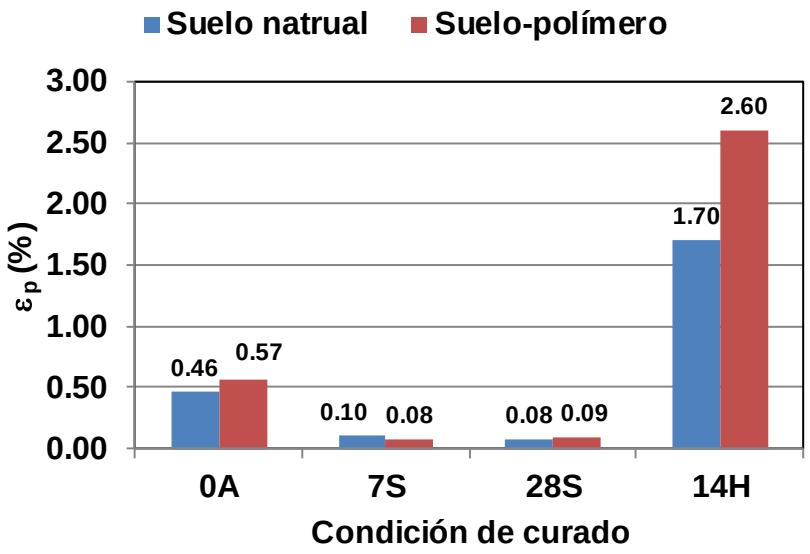


Figura 3.18. (a) y (b) 7 días de secado; (c y d) 28 días de secado; (e) y (f) 14 días de humedecimiento

Para análisis, de las curvas anteriores se toma la deformación permanente acumulada en el ciclo 20000. Por lo tanto, para muestras que se secaron 7 o 28 días, la deformación permanente es similar para suelo natural y suelo-polímero. Pero en el caso de especímenes ensayados inmediatamente y los que se humedecieron, se tienen deformaciones permanentes ligeramente más altas en la mezcla suelo-polímero (ver Figuras 3.18 y 3.19).



Nota: 0A: Ensayados inmediatamente después de la compactación; 7S: Ensayados después de 7 días de secado y 14 días de almacenamiento; 28S: Ensayados después de 28 días de secado y 14 días de almacenamiento; 14H: Ensayados después de 14 días de humedecimiento y 14 días de almacenamiento.

Figura 3.19. Resumen de los valores de deformación permanente en el ciclo 20 000

4. Proyecto 2

4.1. Material en estudio y características

El material utilizado en el estudio fue una arena proveniente del estado de Veracruz. En el proyecto solo se utilizó material que pasó la malla No. 4.

Después de secar el suelo y cuartearlo, se determinaron sus propiedades índice, las cuales se resumen en la Tabla 4.1; la Figura 4.1 muestra la curva de granulométrica del suelo. De ésta se observa que el material es una arena muy fina que está constituida por tamaños de partícula entre 0.1 y 1 mm.

Con las propiedades obtenidas, el suelo se clasificó como una arena limosa mal graduada (SP-SM) de acuerdo con el sistema de clasificación SUCS.

Tabla 4.1. Resumen de las propiedades del suelo en estudio

Característica	**Valor**
Clasificación de acuerdo con el SUCS	SP-SM
Límite líquido (%)	NP
Límite plástico (%)	NP
Índice de plasticidad (%)	NP
Gravedad específica	2.75
Pasa malla No. 200 (%)	6.9
Arena (%)	93.1

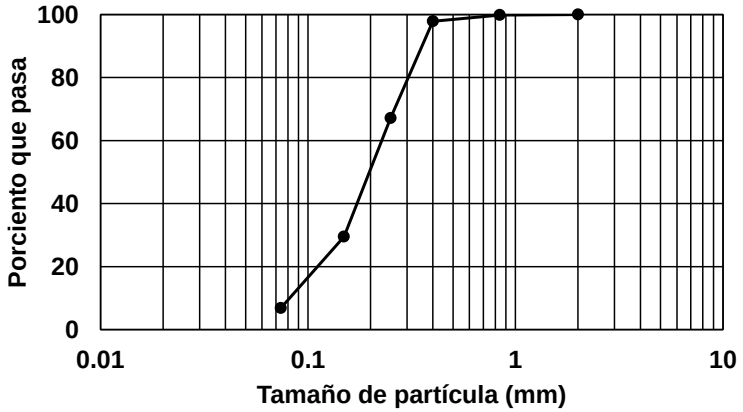


Figura 4.1. Curva granulométrica del suelo natural

4.2. Curva de compactación

La Figura 4.2 muestra la curva de compactación Proctor estándar obtenida siguiendo el procedimiento ASTM D 698-12. De éste se obtuvo un contenido de agua óptimo de 15% y un peso volumétrico seco máximo de 17 kN/m^3.

Los especímenes se compactarían con contenido de agua óptimo y peso volumétrico seco máximo usando compactación dinámica. Sin embargo, al tratar de compactar los primeros especímenes, éstos no mantenían su forma después de desmoldarlos y, por otro lado, se observó que no se alcanzaba el peso volumétrico requerido por más energía que se aplicara. Esto llevó a que se decidiera reducir el peso volumétrico seco a 16.3 kN/m^3, es decir, las muestras se compactaron a un grado de compactación de 96%. El contenido de agua también se redujo a 13%. Asimismo, se decidió que los especímenes se compactarían en equipo giratorio.

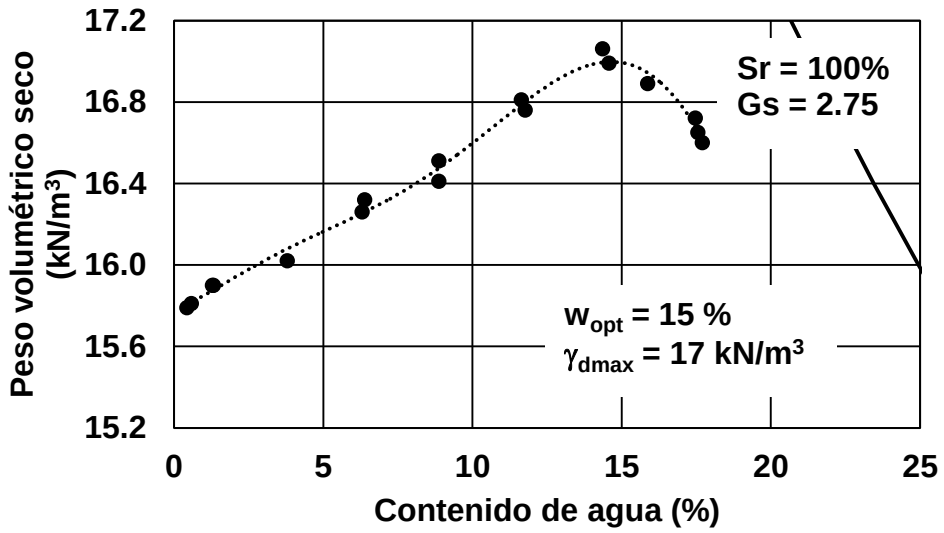


Figura 4.2. Curva de compactación del suelo natural

4.3. Mezclas de prueba

En el desarrollo de la investigación se utilizó sólo una mezcla de suelo-polímero y la mezcla de control con suelo natural. La cantidad de polímero utilizado en este proyecto fue 8%. El 8% de polímero se diluyó en 92% del agua de compactación.

4.4. Resultados de las pruebas

4.4.1. Valor de Soporte California (CBR)

Para esta prueba, el procedimiento ya se presentó previamente. Solo es necesario mencionar que después de compactar los especímenes, estos se secaron durante 7 días, previo a las 96 horas de saturación.

Para este suelo, los resultados son muy erráticos ya que el material no quedó bien compactado por medio de compactación dinámica.
La Figura 4.3 indica que el CBR del suelo natural está entre 2 y 6% mientras que el del suelo-polímero fue 4. Este parámetro no se vio incrementado al utilizar el polímero. Con respecto a expansión, esta arena no presenta expansión, más bien se colapsa ligeramente cuando se pone en contacto con agua.

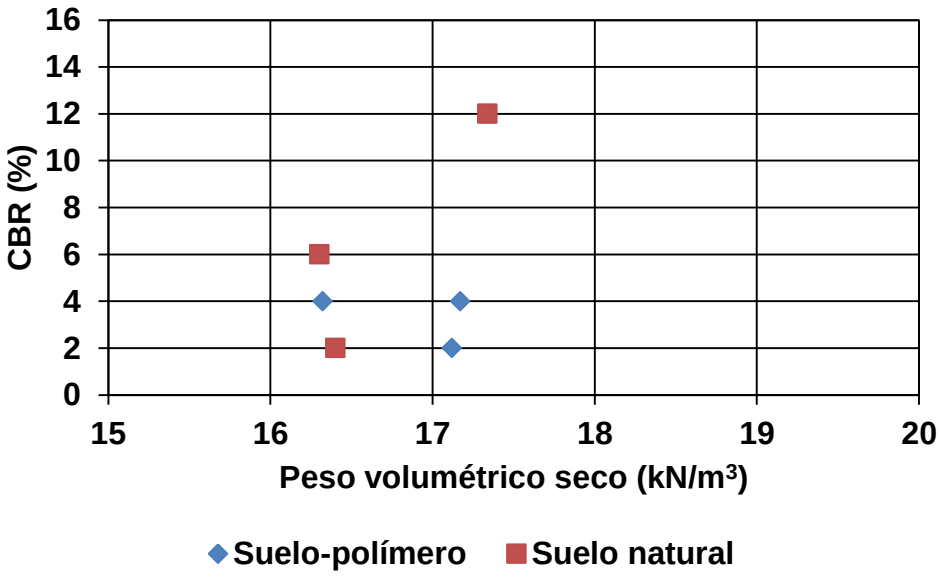


Figura 4.3. CBR del suelo natural y del suelo-polímero

4.4.2. Resistencia en compresión simple

En las Figuras 4.4 se muestran los resultados de la resistencia en compresión simple de especímenes que se secaron a tres tiempos y los que se ensayaron inmediatamente después de compactarse. De tal gráfica se observa que tanto el suelo natural como el suelo-polímero presentan resistencias casi nulas si se ensayan después de compactarse (Figura 4.4). Para la condición de 7, 14 y 28 días de secado, los resultados indican que los especímenes que contienen el polímero tienen una resistencia superior a los especímenes de suelo natural. De hecho, la resistencia se incrementa 16, 20 y 25 veces (para los tres tiempos de secado) con respecto a la resistencia del suelo natural. Por tanto, bajo esta condición el polímero sí constituye una forma de mejorar la resistencia de la arena limosa.

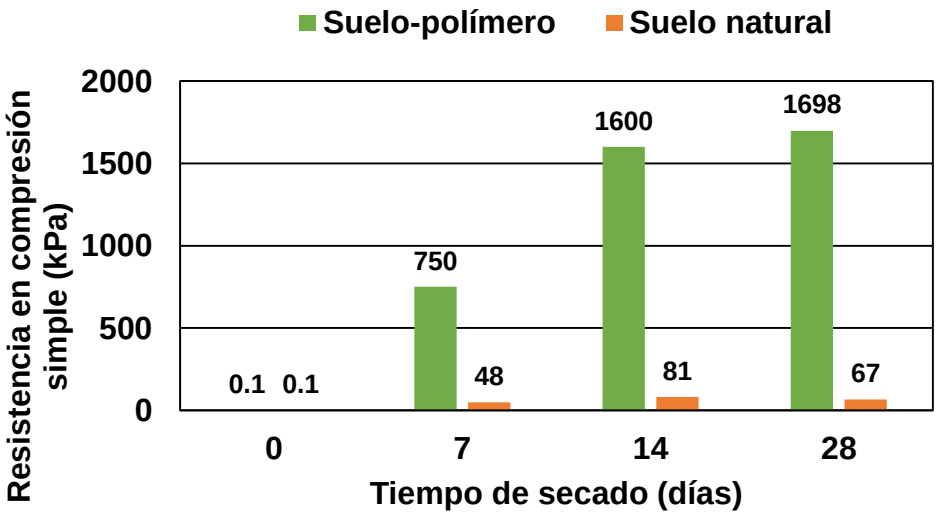


Figura 4.4. Resistencia en compresión simple de especímenes de suelo natural y suelo-polímero

La resistencia a la compresión simple también se obtuvo para especímenes suelo-polímero que después de haber sido compactados se envolvieron en plástico para que no perdieran agua. Los tiempos que se dejaron en almacenamiento fueron 7, 14 y 28 días. La Figura 4.5 muestra que la resistencia del suelo es baja en un rango de 0.1 a 14 kPa. Se observa que, aunque los especímenes se almacenen por varios días, la resistencia se incrementa marginalmente. De esto se puede concluir, que para que el suelo-polímero tenga un buen desempeño, el material mejorado con el producto debe someterse a secado durante un cierto período para que el polímero forme las ligas con el suelo.

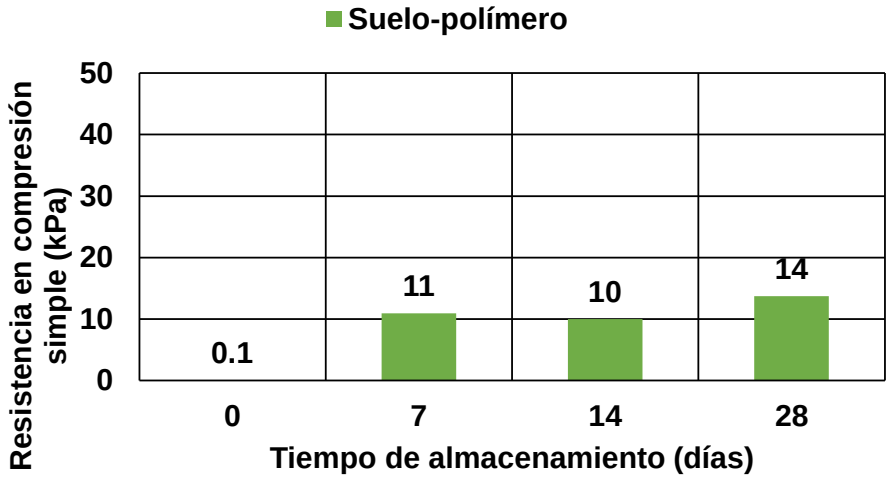


Figura 4.5. Resistencia en compresión de especímenes de suelo estabilizado con polímero. Muestras que se almacenaron después de compactarse

Cuando se llevan a cabo investigaciones de aditivos, es importante verificar las propiedades mecánicas del suelo estabilizado si éste incrementa su contenido de agua por alguna circunstancia. Para evaluar este efecto, en el estudio se

compactaron varios especímenes que se sometieron a 7, 14 o 28 días de secado y posteriormente se sometieron a 14 días de humedecimiento mediante capilaridad. Posterior al humedecimiento, se almacenaron durante 14 días para que el agua se distribuyera mejor en todo el cuerpo de los especímenes. Después, se ensayaron en la prueba de resistencia en compresión.

Los resultados indican que los especímenes pierden resistencia en porcentajes de 53, 58 y 71, para los tres tiempos de secado, respectivamente. De hecho, a medida que se incrementa el tiempo de secado, la pérdida de resistencia también es mayor (Figura 4.6).

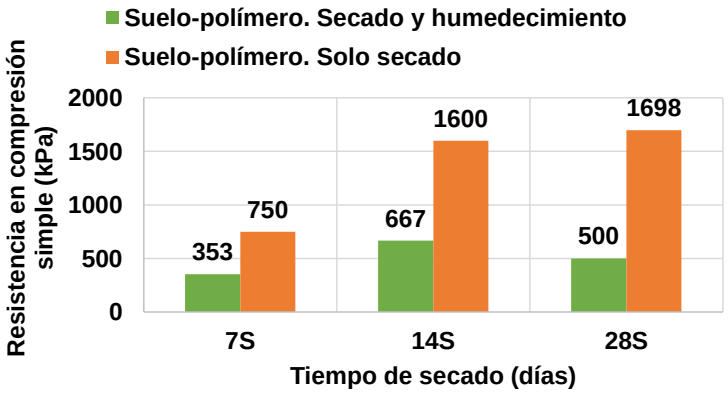


Figura 4.6. Resistencia en compresión simple de muestras secadas o secadas y humedecidas

Aunado a lo anterior, es conveniente señalar que el suelo natural absorbe agua rápidamente, y que, además, una vez que la muestra está completamente humedecida, el suelo pierde toda su resistencia y el espécimen colapsa por peso propio, por esto, no se pudieron llevar a cabo pruebas con especímenes de suelo natural con la condición de humedecimiento; por otro lado, el suelo-polímero absorbe poca agua, lo que indica que el polímero impermeabilizó el suelo (Figura 4.7).

Figura 4.7. Absorción de agua de especímenes con polímero y un espécimen de suelo natural

Otro punto importante a señalar para los especímenes que se humedecieron fue que durante los 14 días que estos estuvieron almacenados para que el agua se redistribuyera, no sucedió tal efecto ya que los especímenes solo estaban húmedos por la parte en la que estuvieron en contacto con agua. Esto provocó que, durante las pruebas de compresión simple, los especímenes fallaran primeramente por la parte más húmeda (Figura 4.8).

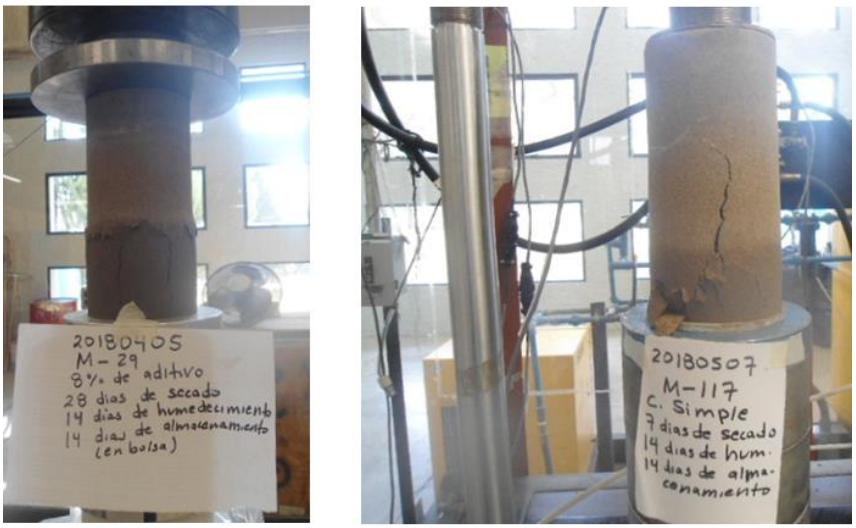


Figura 4.8. Falla de los especímenes humedecidos

4.4.3. Módulo de resiliencia

Las Figuras 4.9 y 4.10 muestran las gráficas de módulos de resiliencia del suelo natural y suelo-polímero para los tres tiempos de secado. La Figura 4.9 indica que los módulos de resiliencia del suelo natural se encuentran en un rango de 50 a 400 MPa, pero su dependencia del estado de esfuerzos es muy baja ya que la tendencia de los puntos no presenta una pendiente importante. Por otro lado, en el caso del suelo estabilizado con el polímero, los módulos de resiliencia casi se duplican variando entre 100 y 800 MPa. Además, en este caso, el módulo de resiliencia sí se incrementa con el estado de esfuerzos (Figura 4.10).

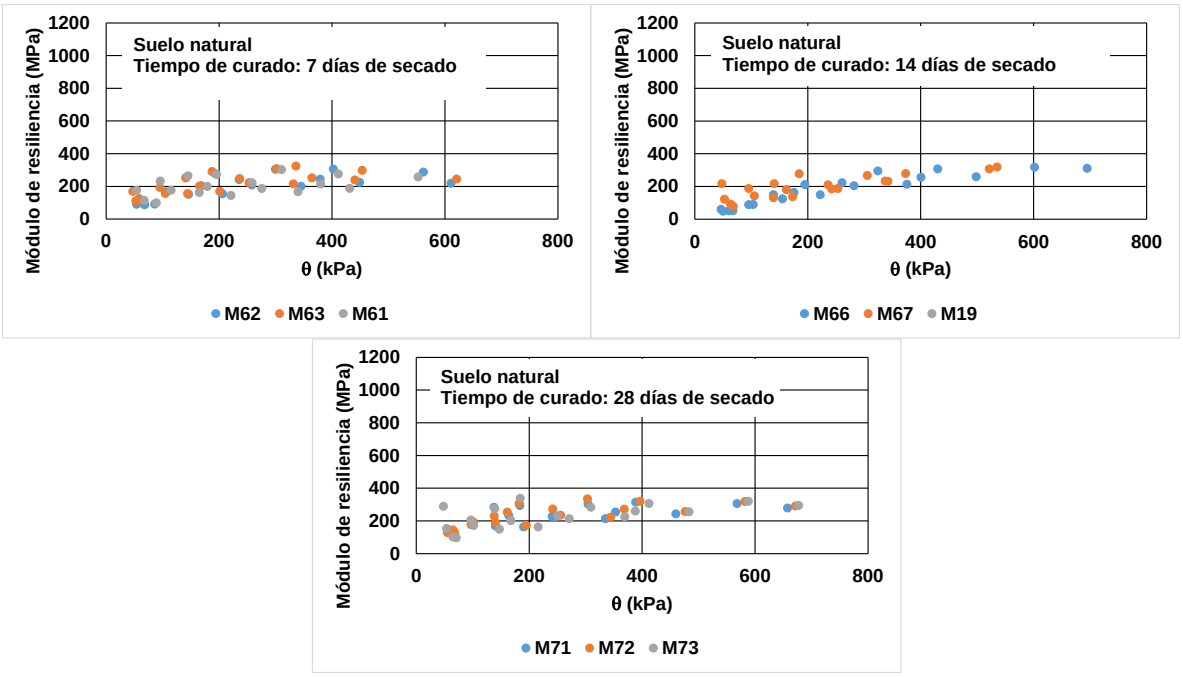


Figura 4.9. Módulos de resiliencia de suelo natural

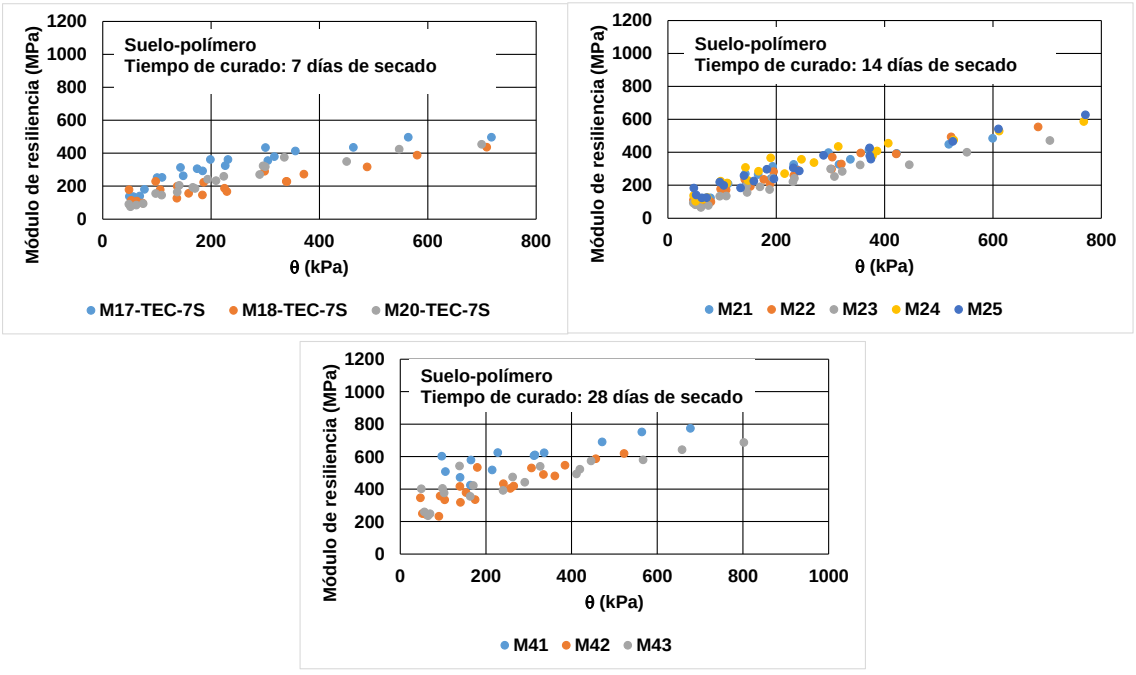


Figura 4.10. Módulos de resiliencia de suelo-polímero

Con respecto a los módulos de resiliencia medidos en especímenes suelo-polímero que solo se almacenaron, éstos están en valores inferiores a 200 MPa (Figura 4.11); valores bajos con respecto a los medidos en las muestras que se secaron.
De estos resultados, nuevamente se observa la importancia de permitir el secado de la mezcla suelo-polímero.

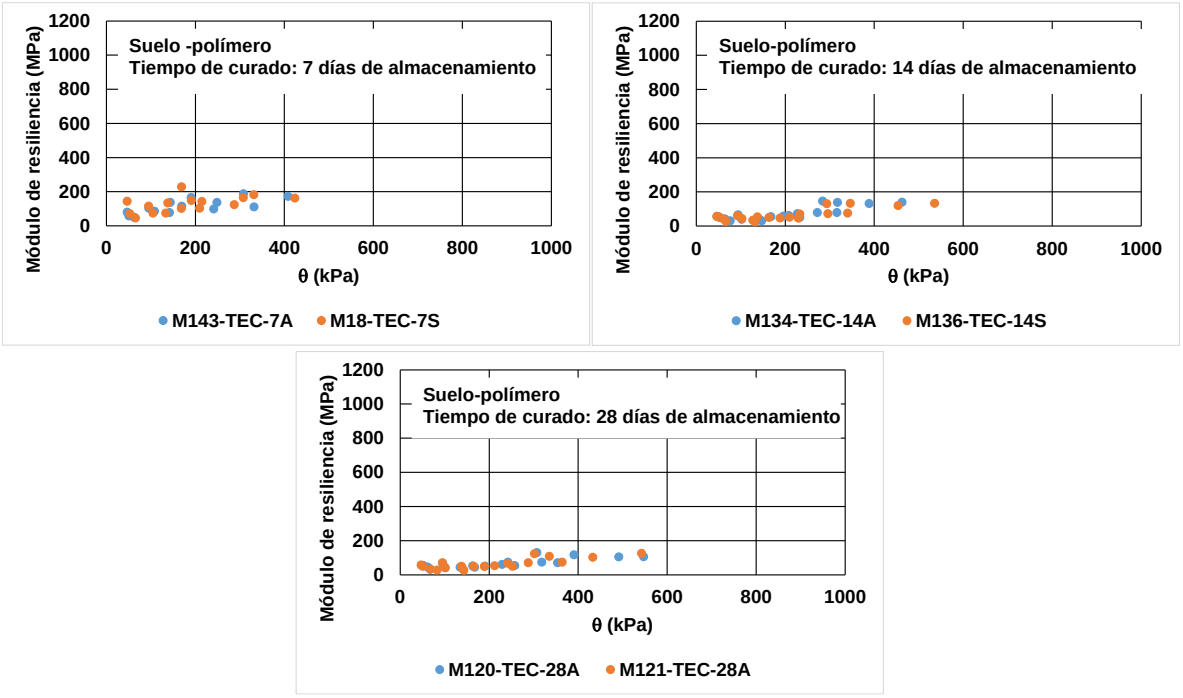


Figura 4.11. Módulos de resiliencia de suelo-polímero. Muestras almacenadas a diferentes tiempos

En cuanto a los resultados de los especímenes que se secaron y humedecieron, nuevamente se observa la pérdida de rigidez de los especímenes. En estos casos los valores de módulo de resiliencia se mantienen en valores inferiores a 400 MPa, independientemente del tiempo de secado que se haya dado a las muestras (Figura 4.12). Pero, es importante señalar que el suelo natural no se puede ensayar después de haberse humedecido porque colapsa.

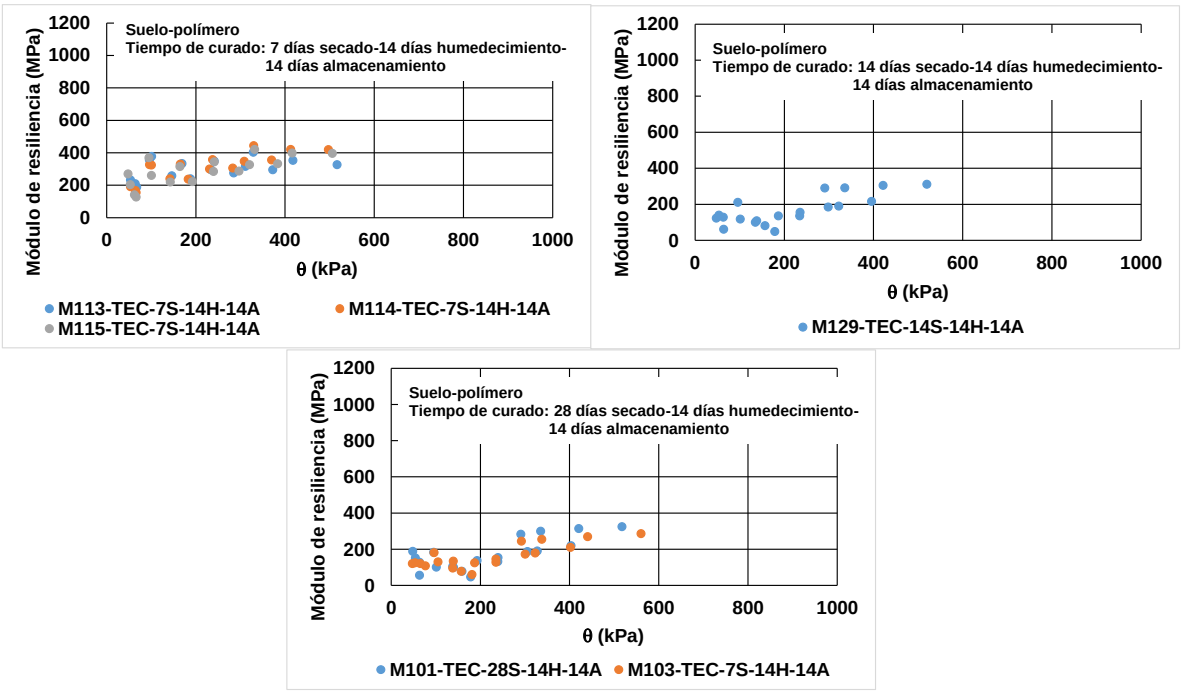


Figura 4.12. Módulos de resiliencia de suelo-polímero. Muestras secadas y posteriormente humedecidas

4.4.4. Deformación permanente

En las pruebas de deformación permanente de este material se aplicaron 20000 ciclos de carga con un esfuerzo desviador de 132.5 kPa y 14 kPa de confinamiento. Las Figuras 4.13, 4.14 y 4.15 presentan las curvas de número de ciclos contra deformación.

De la Figura 4.13 y 4.14 se observa que, para un tiempo de secado de 7 y 14 días, la deformación permanente se reduce aproximadamente 67% y 88%, respectivamente, cuando el suelo contiene el polímero. De esto se concluye entonces, que adicionar polímero a la arena reduce en forma importante la deformación permanente. Por otro lado, para los especímenes secados y humedecidos, la deformación permanente promedio fue de 0.29% (Figura 4.14), sin embargo, cabe señalar, que el suelo natural no se ensayó en humedecimiento puesto que las muestras que se pusieron a humedecer colapsaron por peso propio. En la Figura 4.16 se observa de forma más clara las diferencias en deformación permanente del suelo con y sin polímero.

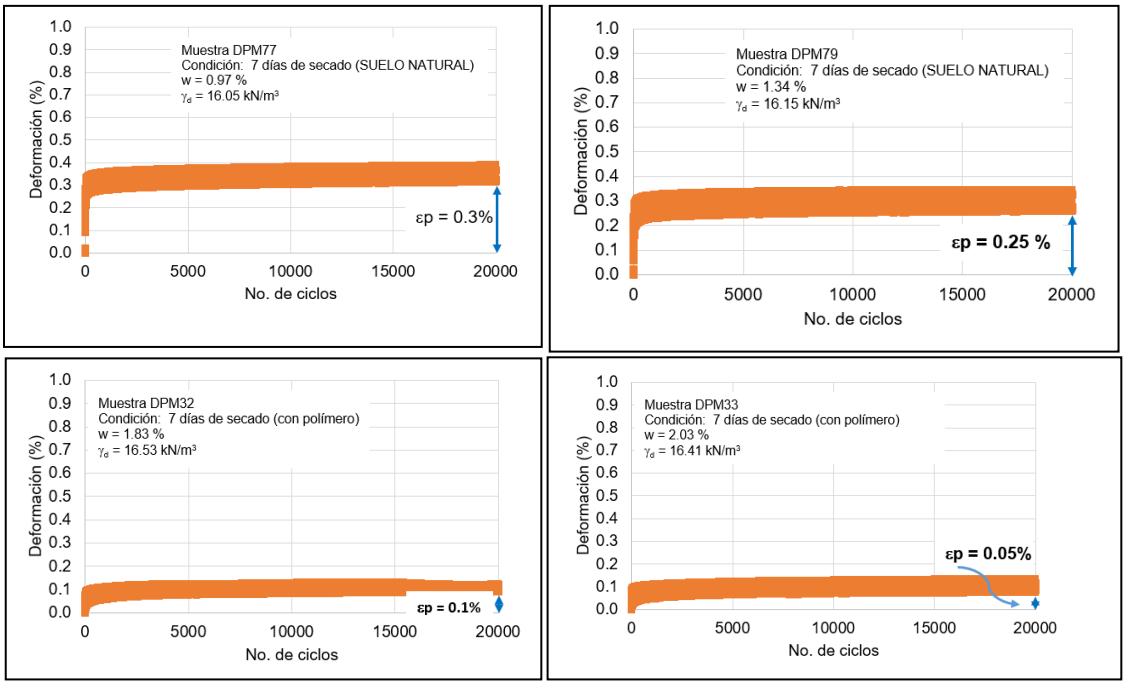


Figura 4.13. Pruebas de deformación a 20000 ciclos de carga para especímenes con y sin polímero

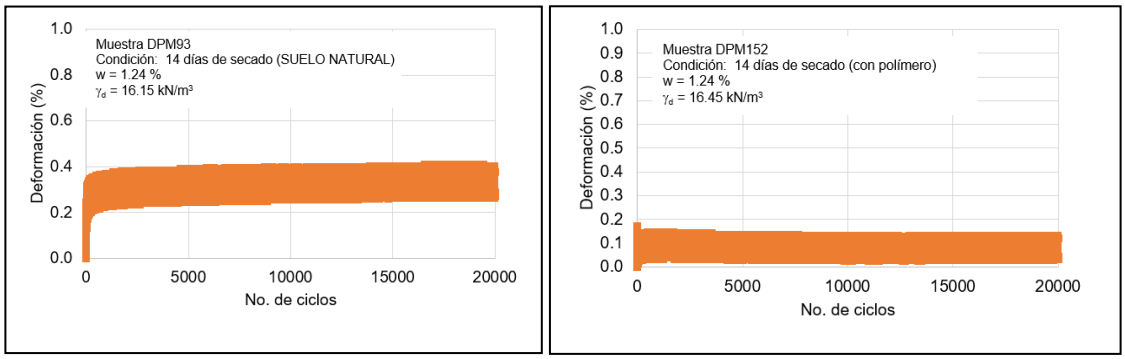


Figura 4.14. Pruebas de deformación a 20000 ciclos de carga para especímenes con y sin polímero. 14 días de secado

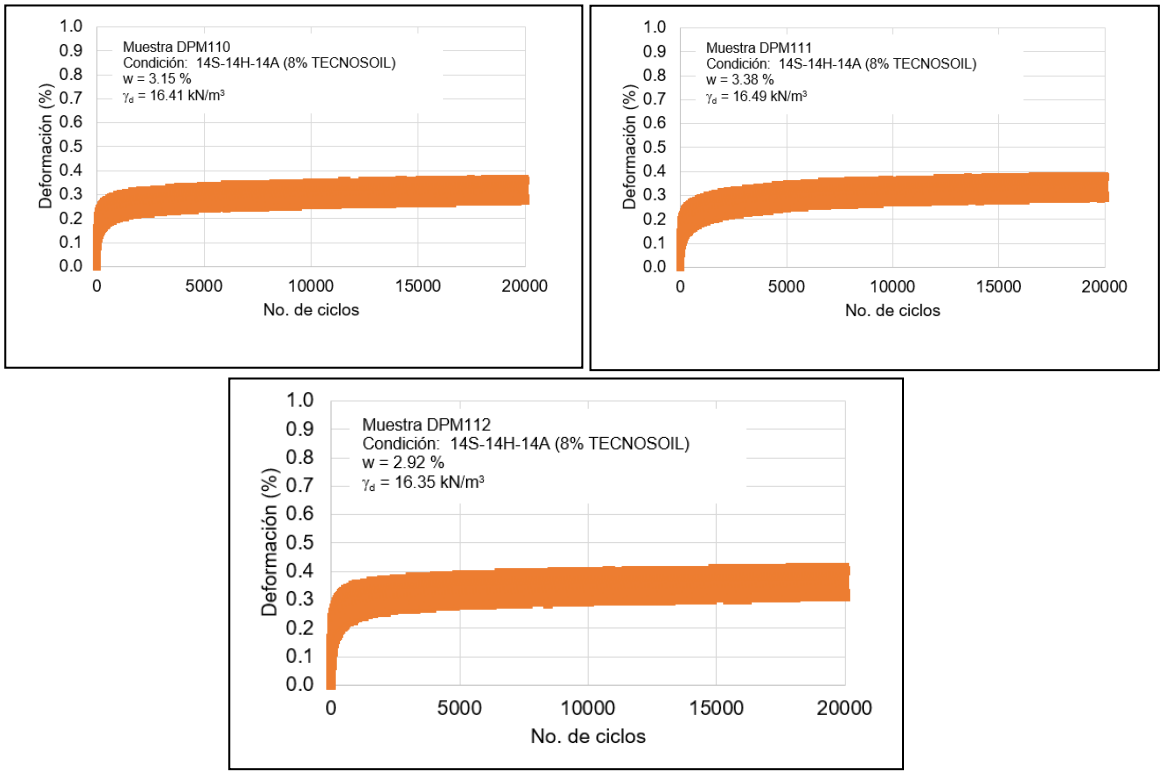


Figura 4.15. Pruebas de deformación a 20000 ciclos de carga para muestras con polímero. 14 días de secado-14 días de humedecimiento-14 días de almacenamiento

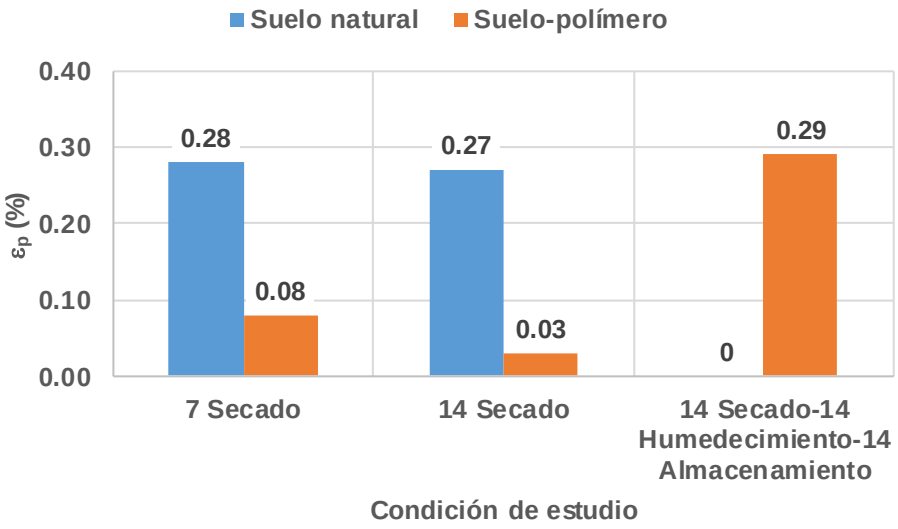


Figura 4.16. Resumen de las pruebas de deformación permanente de las tres condiciones estudiadas

4.4.5. Permeabilidad

En este proyecto también se incluyó la medición de la permeabilidad para muestras ensayadas después de compactar y muestras secadas durante 7 días con y sin polímero (Tabla 4.2).

Tabla 4.2. Valores de permeabilidad

Muestra	Tiempo de secado, días	w_o (%)	γ_{do} (kN/m^3)	w_f (%)	k (cm/s)	k (m/s)
Suelo natural	0	13.55	16.98	18.06	3.1×10^{-4}	3.1×10^{-6}
Suelo-polímero	0	13.75	16.60	19.77	3.7×10^{-5}	3.7×10^{-7}
Suelo-polímero	7	13.79	16.76	17.75	4.7×10^{-4}	4.7×10^{-6}

Nomenclatura: w_o = Contenido de agua inicial de la muestra; γ_{do} = Peso volumétrico seco inicial; w_f = Contenido de agua final; k = Coeficiente de permeabilidad

Head (1994), en su manual de pruebas de laboratorio, volumen 2, muestra los valores de Tabla 4.3 para calificar el coeficiente de permeabilidad. De acuerdo con esto, tanto el suelo natural como el suelo polímero (para muestras después de compactar y la de suelo-polímero con 7 días de secado) tienen una permeabilidad baja, pero el suelo-polímero tiene permeabilidad ligeramente más baja que la del suelo natural (para muestras ensayadas después de compactar).

Tabla 4.3. Clasificación de los suelos de acuerdo a la permeabilidad (Head, 1994)

Grado de permeabilidad	Rango del coeficiente de permeabilidad, (m/s)
Alto	Mayor que 10^{-3}
Medio	10^{-3}-10^{-5}
Bajo	10^{-5}-10^{-7}
Muy bajo	10^{-7}-10^{-9}
Prácticamente impermeable	Menor que 10^{-9}

Es importante señalar que el agua que fluyó durante la prueba de permeabilidad en el espécimen de suelo-polímero y ensayada inmediatamente después de compactar, tiene un color blanco, lo que indica que el polímero aún no se había adherido a las partículas de suelo por lo cual fluyó en conjunto con el agua (Figura 4.17). Para la muestra que se ensayó a 7 días de secado, el agua que fluyó era transparente, lo que indica que el polímero ya estaba adherido a las partículas de suelo.

(a) (b)

Figura 4.17. Agua que fluye durante la prueba de permeabilidad. (a) Espécimen de suelo-polímero ensayado inmediatamente; (b) Espécimen de suelo-polímero ensayado después de 7 días de secado

5. Proyecto 3

5.1. Introducción

En dos proyectos anteriores solo se estudió un porcentaje de polímero, dos o tres condiciones de secado, una condición de humedecimiento, una condición secado y humedecimiento, etc, sin embargo, es claro que un aditivo debe evaluarse para abordar otros aspectos como ¿cuál es la cantidad óptima de aditivo que maximiza las propiedades?, ¿cuáles son las cantidades de aditivo dependiendo del tipo de suelo?, ¿qué tipos de suelos potencializan sus propiedades al estabilizarlos con el aditivo?, etc.

En la tercera etapa del estudio del polímero, se estudiaron dos suelos y en cada uno se evaluaron tres porcentajes del polímero (6, 8 y 10%). Con respecto a las pruebas, solo se llevaron a cabo pruebas de resistencia en compresión simple y CBR. En los siguientes incisos se muestran los resultados obtenidos en la investigación.

5.2. Suelo 1

5.2.1. Propiedades índice y características de compactación

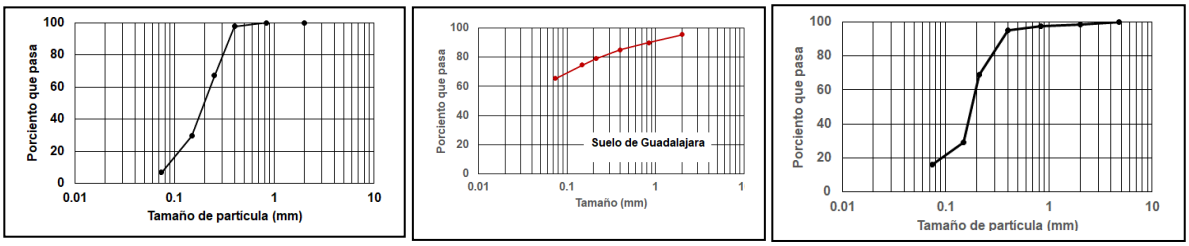
En el proyecto anterior se estudió una arena limosa mal graduada estabilizada con 8 % de polímero. Los resultados del proyecto indicaron que al adicionarle polímero varias propiedades se vieron mejoradas.

En este proyecto, se decidió que el primer suelo en estudio fuera una combinación de la arena utilizada en el proyecto anterior (80%) y otro suelo que fue muestreado en Guadalajara (20%).

La Tabla 5.1 muestra las propiedades de los materiales por separado y las propiedades de la mezcla arena-suelo. La Figura 5.1 muestra las curvas granulométricas.

Tabla 5.1. Propiedades de los suelos individuales y la mezcla arena-suelo

Característica	Arena	Suelo de Guadalajara	Mezcla arena-suelo
Clasificación SUCS	SP-SM	MH	SM
Límite líquido (%)	NP	64	NP
Límite plástico (%)	NP	30	NP
Índice de plasticidad (%)	NP	34	NP
Gravedad específica	2.75	2.4	2.71
Pasa malla No. 200 (%)	6.9	63.7	16.31
Arena (%)	93.1	36.3	83.69



(a) Arena **(b) Limo** **(c) Mezcla arena-suelo**

Figura 5.1. Curvas granulométricas de los materiales por separado y la mezcla arena-suelo

En la Figura 5.2 se observa la curva de compactación Proctor estándar. Ésta indica un contenido de agua óptimo de 17.3 % y un peso volumétrico seco máximo de 16.86 kN/m^3. Las condiciones óptimas de compactación se usaron para la fabricación de los especímenes. El contenido de agua de las probetas se permitió que variara en ±0.5%; al peso volumétrico seco se le permitió una variación de ±1%.

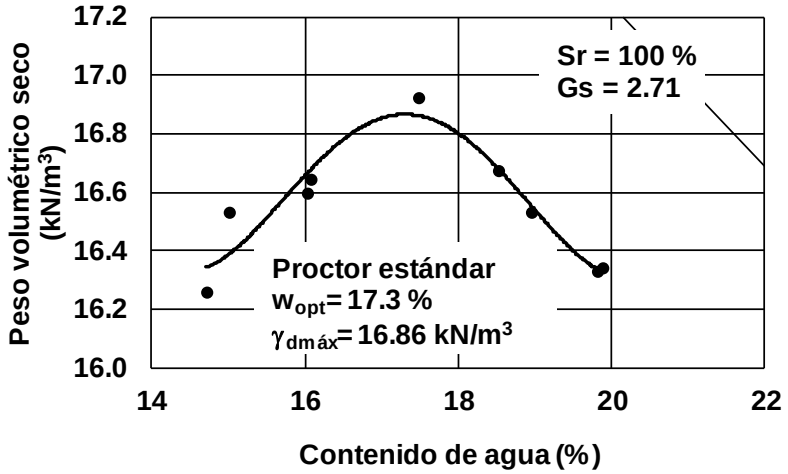


Figura 5.2. Curva de compactación Proctor estándar de la mezcla arena-suelo

5.2.2. Evaluación de la resistencia en compresión simple

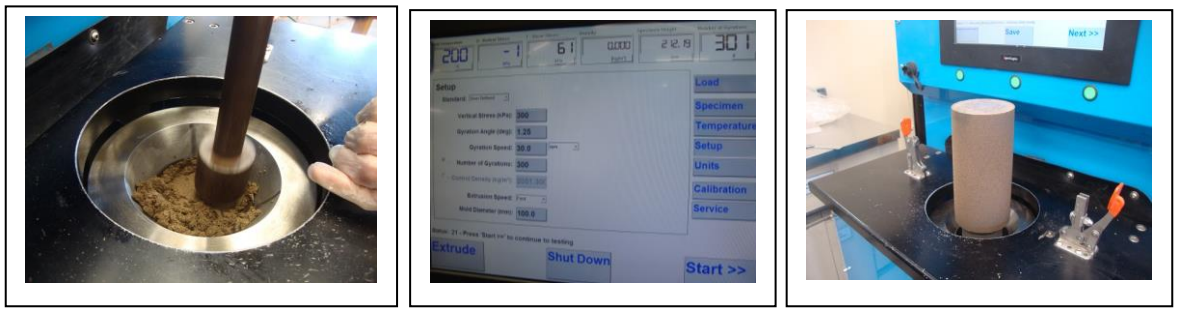
5.2.2.1. Procedimiento de preparación de los especímenes

El procedimiento fue el siguiente:

- Se preparó la mezcla suelo-agua-polímero (Figura 5.3).

Figura 5.3. Preparación de la mezcla suelo-agua-polímero (6, 8 y 10% de polímero)

- Después del mezclado, las muestras se fabricaron en el compactador giratorio en un molde de 10 cm de diámetro (Figura 5.4). Las variables de control en el giratorio fueron:
    5. Velocidad de giro: 30 giros/minuto
    6. Presión vertical: 700 kPa
    7. Número de giros: 300
    8. Ángulo de giro: 1.25º



(a) **(b)** **c)**

Figura 5.4. Fabricación de los especímenes en el compactador giratorio

- Posterior a la compactación de los especímenes, estos fueron medidos y pesados (Figura 5.5).

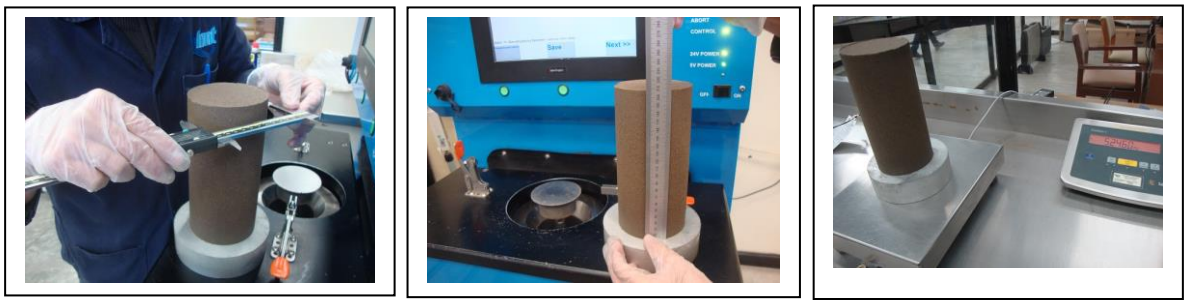


Figura 5.5. Registro de peso y dimensiones de los especímenes

- Los especímenes se ensayaron después de cumplir alguna de las siguientes condiciones: almacenamiento, secado, humedecimiento, o humedecimiento y secado. La Figura 5.6 indica cómo se llevó a cabo el humedecimiento o secado.
  Cabe hacer notar que los especímenes que se humedecieron o que se secaron, se almacenaron 14 días después del humedecimiento o secado. Esto para que el agua en el espécimen se redistribuyera nuevamente.

(a) **(b)**

Figura 5.6. Secado o humedecimiento de los especímenes

5.2.2.2. Resultados de resistencia en compresión simple de muestras que se secan

Como se observó en los dos proyectos anteriores, el material al que se le aplica el polímero requiere secarse posterior a la compactación para que se generen las ligas en el suelo. Para seguir observando el efecto del secado con más tiempos, se estudiaron cuatro (3, 7, 14 y 28 días); la finalidad fue determinar si existe un tiempo mínimo de secado para el cual la resistencia se maximiza. Por otro lado, en este estudio también se evaluó el efecto del porcentaje de polímero, para lo cual se estudiaron 6, 8 y 10%.

La Figura 5.7 muestra el comportamiento de la resistencia en compresión simple tomando en cuenta las variables de tiempo de secado y porcentaje de polímero. De acuerdo con esta figura, para tres días de secado, el suelo no incrementa su resistencia al aumentar la cantidad de polímero, al contrario, es más baja. La probable explicación a este fenómeno podría ser que, para este tiempo, el suelo aún tiene cantidades importantes de agua, ya que sólo ha perdido un 44% en el caso de suelo natural y un 56% en el caso del suelo-polímero (Tabla 5.2 y Figura 5.8).

Tabla 5.2. Resumen de los contenidos de agua iniciales y finales de los especímenes que se secaron

Muestra	Polímero	Condiciones iniciales		Condiciones finales						
No.	Si/No	wi (%)	γ_d (kN/m³)	w_f (%)	γ_d (kN/m³)	Tiempo de curado	% polímero	Pérdida w (%)	Prom pérdida w(%)	Prom pérdida w(%)
22N	No	17.01	16.57	9.22	16.35	3S-14A	0	46		
23N	No	17.14	16.31	9.75	16.28	3S-14A	0	43	3S-14A	44
13	Si	16.97	16.51	7.90	16.55	3S-14A	6	53		
14	Si	17.59	16.39	7.55	16.27	3S-14A	6	57	3S-14A	55
37	Si	17.25	16.74	7.27	16.57	3S-14A	8	58		
38	Si	17.31	16.59	7.50	16.48	3S-14A	8	57		
39	Si	17.29	16.62	7.34	16.44	3S-14A	8	58	3S-14A	57
70	Si	17.29	16.40	7.29	16.12	3S-14A	10	58		
71	Si	17.26	16.67	7.57	16.34	3S-14A	10	56		
72	Si	17.15	16.52	7.21	16.24	3S-14A	10	58	3S-14A	57
19N	No	17.21	16.52	5.21	16.32	7S-14A	0	70		
20N	No	17.14	16.76	5.29	16.73	7S-14A	0	69		
21N	No	17.11	16.80	4.91	16.74	7S-14A	0	71	7S-14A	70
19	Si	17.22	16.37	5.20	16.32	7S-14A	6	70		
20	Si	17.16	16.49	5.17	16.46	7S-14A	6	70		
21	Si	17.17	16.37	5.10	16.42	7S-14A	6	70	7S-14A	70
46	Si	16.89	16.33	5.54	16.15	7S-14A	8	67		
47	Si	17.35	16.21	5.53	16.00	7S-14A	8	68		
48	Si	17.34	16.29	5.46	16.05	7S-14A	8	69	7S-14A	68
67	Si	17.57	16.18	5.50	16.21	7S-14A	10	69		
68	Si	17.14	16.76	5.25	16.72	7S-14A	10	69	7S-14A	69
16N	No	17.09	16.72	3.10	16.68	14S-14A	0	82		
17N	No	17.34	16.50	3.24	16.54	14S-14A	0	81		
18N	No	17.27	16.52	3.04	16.37	14S-14A	0	82	14S-14A	82
17	Si	16.93	16.37	3.10	16.40	14S-14A	6	82		
18	Si	17.13	16.66	3.14	16.62	14S-14A	6	82	14S-14A	82
43	Si	17.20	16.58	3.53	16.72	14S-14A	8	79		
44	Si	17.20	16.58	3.59	16.47	14S-14A	8	79		
45	Si	16.92	16.46	3.20	16.41	14S-14A	8	81	14S-14A	80
64	Si	17.46	16.26	3.56	16.47	14S-14A	10	80		
65	Si	17.23	16.89	3.22	16.72	14S-14A	10	81		
66	Si	17.69	16.26	3.67	16.29	14S-14A	10	79	14S-14A	80
10N	No	17.49	16.34	2.56	16.39	28S-14A	0	85		
11N	No	17.19	16.68	2.89	16.48	28S-14A	0	83	28S-14A	84
4	Si	17.11	16.15	2.84	16.24	28S-14A	6	83		
5	Si	17.55	16.12	2.61	16.22	28S-14A	6	85		
6	Si	17.11	16.23	3.01	16.30	28S-14A	6	82	28S-14A	84
34	Si	16.81	16.80	2.18	16.74	28S-14A	8	87		
36	Si	17.29	16.44	2.50	16.39	28S-14A	8	86	28S-14A	86
61	Si	17.44	16.25	2.45	16.03	28S-14A	10	86		
62	Si	17.40	16.30	2.41	16.18	28S-14A	10	86		
63	Si	17.32	16.41	2.43	16.22	28S-14A	10	86	28S-14A	86

A medida que el tiempo de secado se incrementó, los especímenes que contienen el polímero sí incrementan su resistencia de forma importante. Por ejemplo, si se analiza la condición de 28 días de secado, se observa que el suelo con polímero incrementa su resistencia en 90%, 167% y 195% para 6, 8 y 10 % de polímero. Entonces, hasta el porcentaje de polímero estudiado, el óptimo parece no estar entre estos valores, ya que la resistencia se sigue incrementando al aumentar la cantidad de polímero (Figura 5.7). Sin embargo, al incrementar el polímero de 6 a 8%, la resistencia se incrementa en un 77%, y al incrementar el polímero de 8 a 10%, la resistencia ya solo se incrementa en un 28%.

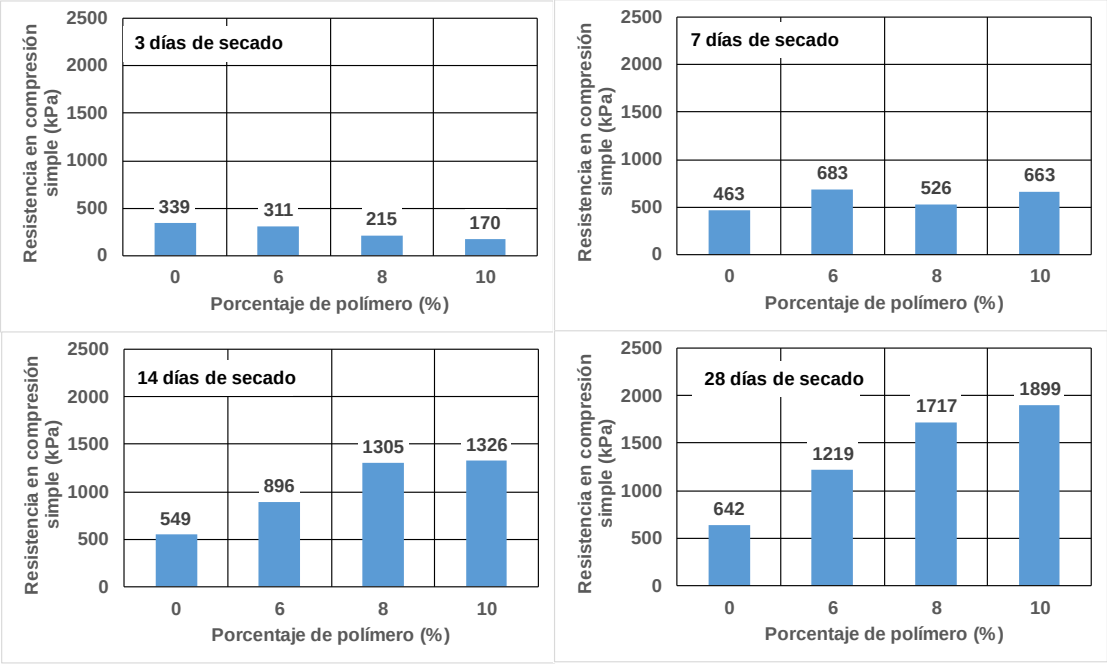


Figura 5.7. Resultados de resistencia en compresión simple de muestras que se secan

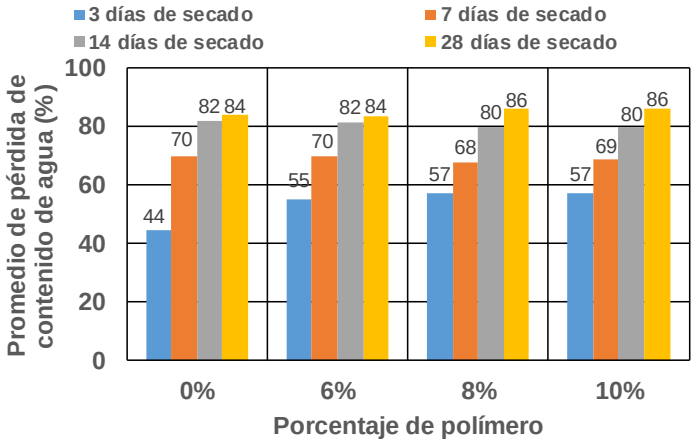


Figura 5.8. Porcentajes de pérdida de agua para los diferentes tiempos de secado y cantidades de polímero estudiadas

Por otro lado, es importante observar que la diferencia en pérdida de agua entre 14 y 28 días de secado parece ser muy cercana, sin embargo, el incremento en resistencia si es importante (Figura 5.7 y 5.8).

Los resultados de la Figura 5.7 también se pueden graficarse por tiempo de secado. La Figura 5.9 muestra que la resistencia se maximiza para 28 días de secado. Esto nuevamente indica que el tiempo de secado posterior a la compactación es importante para poder observar los beneficios del polímero.

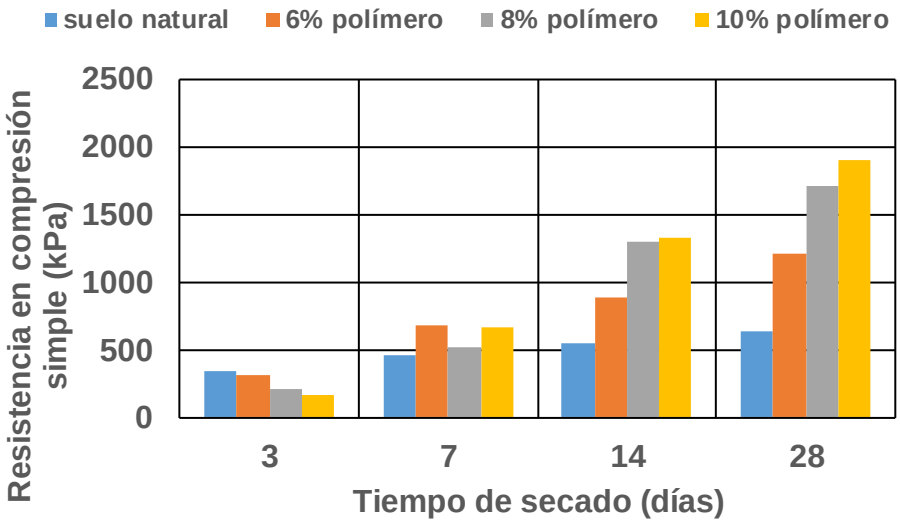


Figura 5.9. Resistencia en compresión simple de especímenes que se secan. Graficados por tiempo de secado

5.2.2.3. Resultados de resistencia en compresión simple de muestras que se humedecen

Al evaluar un aditivo, la condición de humedecimiento se hace importante toda vez que los suelos que forman una carretera o camino tienen una probabilidad alta de estar expuestos al humedecimiento durante los ciclos de lluvia. Por esto, en este estudio, posterior a la compactación de los especímenes, algunos de ellos se secaron durante 7 y 14 días y después se humedecieron durante 14 días (7 días por una cara y 7 días por la otra). Después del humedecimiento, se almacenaron durante 14 días y finalmente se ensayaron en la prueba de resistencia en compresión simple.

Los resultados de la Figura 5.10 indican de forma contundente que cuando los especímenes se humedecen, ya sea que ellos tengan o no polímero, pierden la mayor parte de su resistencia. Esta condición de estudio sería bajo la hipótesis que el suelo mantiene su contenido de agua después de haberla ganado. Sin embargo, en condiciones de campo es posible que el suelo sí gane agua, pero que la vuelva a perder, debido a temporadas de sequía. Para estudiar esta condición, se prepararon muestras que se secaron durante 14 y 28 días, después se humedecieron durante 14 días y posteriormente nuevamente se secaron durante 14

y 28 días. La Figura 5.11 indica que el suelo que no contiene polímero o que contiene entre 8 o 10%, y si se seca después de haberse humedecido, presenta resistencias por encima de las que se observaron en puro secado. Lo que al parecer indica que más de un ciclo de humedecimiento y secado parece no afectar la resistencia en compresión simple, más bien, parece mejorarla. Esto asumiendo que entre ciclos de humedecimiento y secado el material no está sujeto a carga.

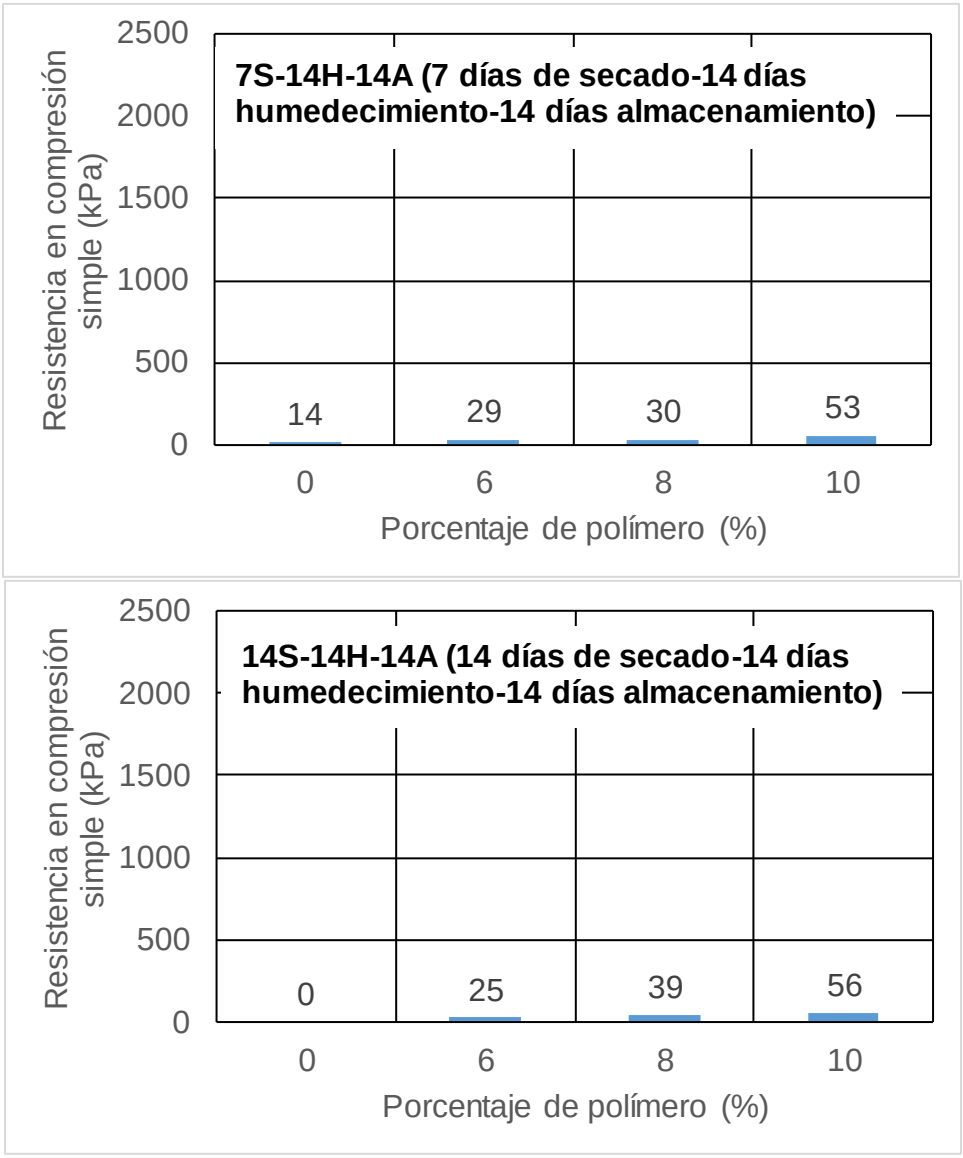
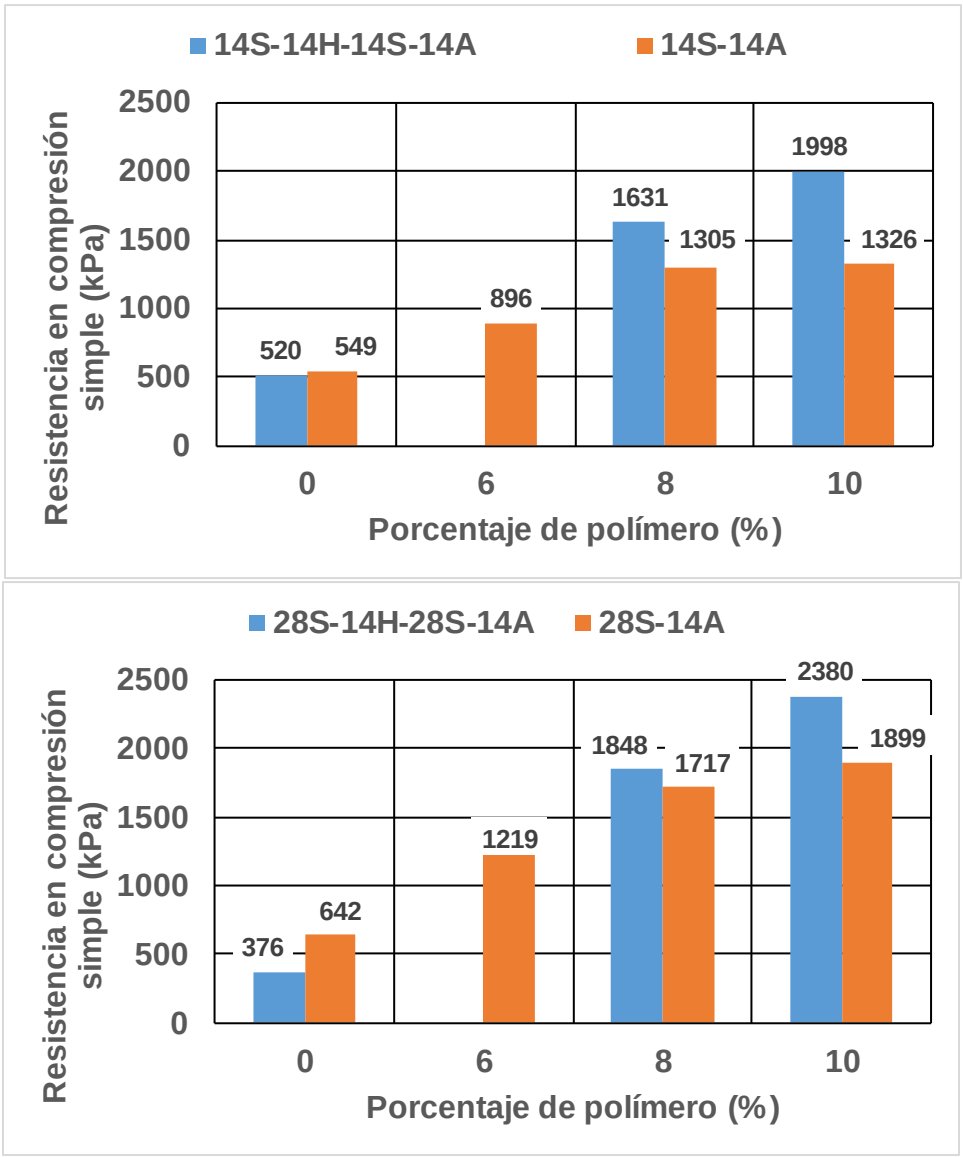


Figura 5.10. Resultados de resistencia en compresión simple de especímenes cuyo ciclo fue secado-humedecimiento-almacenamiento



Nomenclatura:

14S-14H-14S-14A: 14 días de secado, 14 días de humedecimiento, 14 días de secado y 14 días de almacenamiento,

28S-14H-28S-14A: 28 días de secado, 14 días de humedecimiento, 28 días de secado y 14 días de almacenamiento,

14S-14A: 14 días de secado, 14 días de almacenamiento

28S-14A: 28 días de secado, 14 días de almacenamiento

Figura 5.11. Resultados de resistencia en compresión de especímenes que se secan, humedecen y secan nuevamente

5.2.2.4. Resultados de CBR

La prueba de CBR consiste en compactar una serie de tres probetas con contenido de agua óptimo y tres densidades diferentes. Posterior a la compactación, las probetas se sumergen en agua durante cuatro días para simular las peores condiciones a las que puede estar sujeto el suelo. Sin embargo, al realizar esta prueba debería tomarse en cuenta que en un país existen áreas en donde el suelo quizá sí se sature durante la vida útil de la obra y otras en las que el suelo estará expuesto a ciclos de humedecimiento y secado durante ciertos periodos del año. Asimismo, habrá zonas en las que el suelo nunca esté expuesto a la ganancia de agua –como son las zonas desérticas.

Por esto, las pruebas de CBR llevadas a cabo en esta investigación se realizaron como lo indica la norma ASTM D1883. Es decir, con un periodo de saturación de cuatro días, pero también se determinó el CBR en muestras con diferentes periodos de secado, puesto que es la condición bajo la cual se ve el efecto del polímero en estudio.

Con respecto a las pruebas con saturación, el suelo natural presenta un valor de CBR entre 14 y 18% para los cuatro tiempos de secado; el tiempo de secado tiene poco efecto. Por otro lado, el suelo con polímero en proporciones de 6, 8 y 10%, indica valores entre 6 y 15%, con lo cual, se podría decir que el material no incrementa su CBR al adicionarle el polímero, para estas condiciones de prueba (Figura 5.12). Cabe señalar que como la mayor parte del material es arena, la compactación dinámica no produjo un espécimen bien compactado por más energía que se aplicara. Esto con seguridad se traduce en valores de CBR bajos.

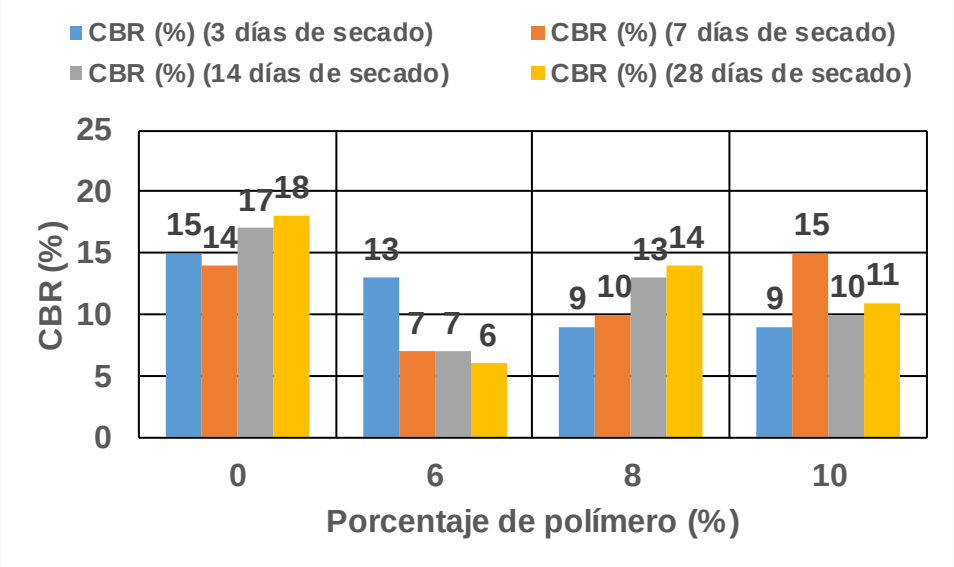


Figura 5.12. Resultados de CBR para las diferentes condiciones de ensaye

Los resultados de la prueba en seco, muestran que, para un tiempo de secado de tres días, el CBR del suelo en estado natural es mayor al del suelo que tiene 8% de polímero. Pero, a medida que el tiempo de secado se incrementa, el CBR del suelo que tiene polímero es aproximadamente el doble del que presenta el suelo natural. Nuevamente en esta gráfica se ve el papel clave del tiempo de secado de la mezcla suelo-polímero (Figura 5.13).

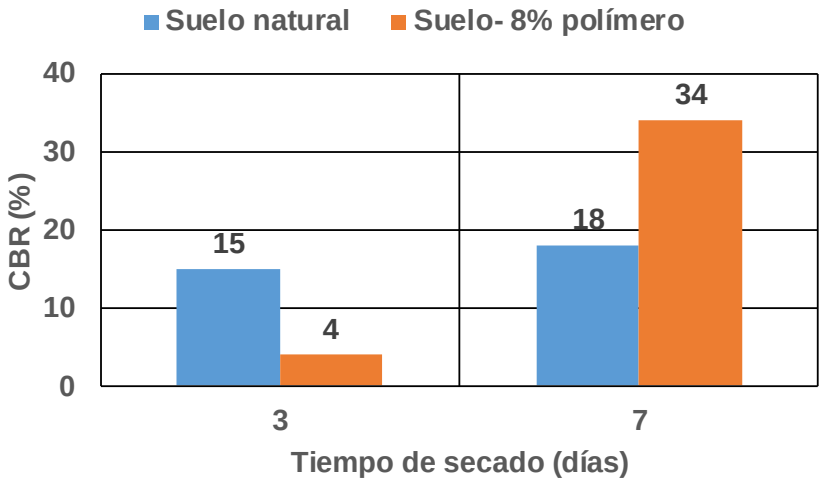


Figura 5.13. CBR del suelo con y sin polímero. Ensayes sin saturación

5.3. Suelo 2

5.3.1. Descripción del suelo y granulometría

En el Instituto Mexicano del Transporte se llevó a cabo una investigación para la cual se construyó una sección de pavimento de concreto con y sin fibras. La estructura de este pavimento estuvo formada por una subrasante (Figura 5.14a), una base y la losa de concreto. De estos materiales se muestreó la base para el estudio que se muestra a continuación (Figura 5.14b).

(a) Material de subrasante **(b) Material de base**

Figura 5.14. Materiales colocados en la sección de pavimento de concreto

La Figura 5.15 muestra la curva de granulometría del material.

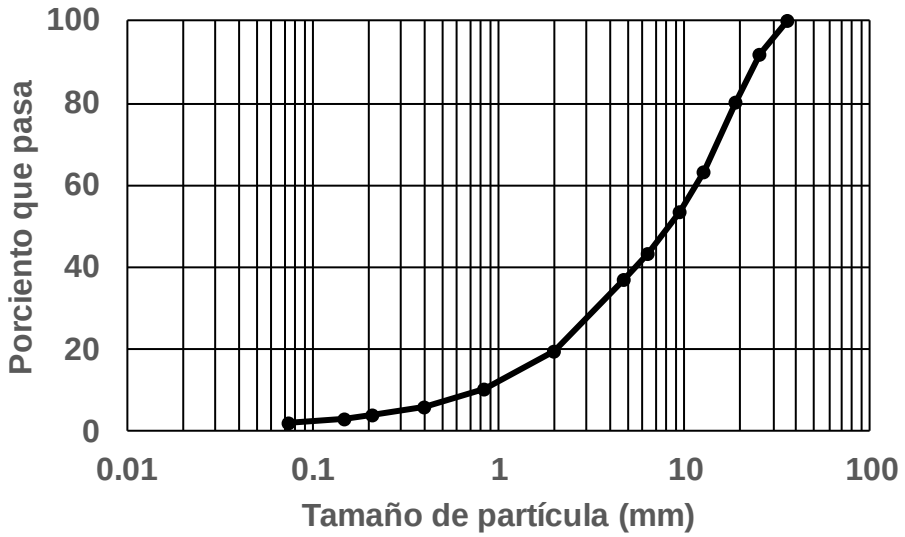


Figura 5.15. Granulometría de la base utilizada en la sección de pavimento

5.3.2. Curva de compactación

Para determinar la curva de compactación, se utilizó el procedimiento ASTM D1557 (Proctor modificada). La Figura 5.16 muestra la curva de compactación obtenida; en ésta se observa un contenido de agua óptimo de 7.3% y un peso volumétrico seco máximo de 21.67 kN/m^3. Las condiciones óptimas fueron los requisitos para controlar la compactación de los especímenes de prueba para la prueba de resistencia en compresión simple. Cabe señalar que se permitieron variaciones de ±0.5% y ±1% para el contenido de agua y para el peso volumétrico seco, respectivamente.

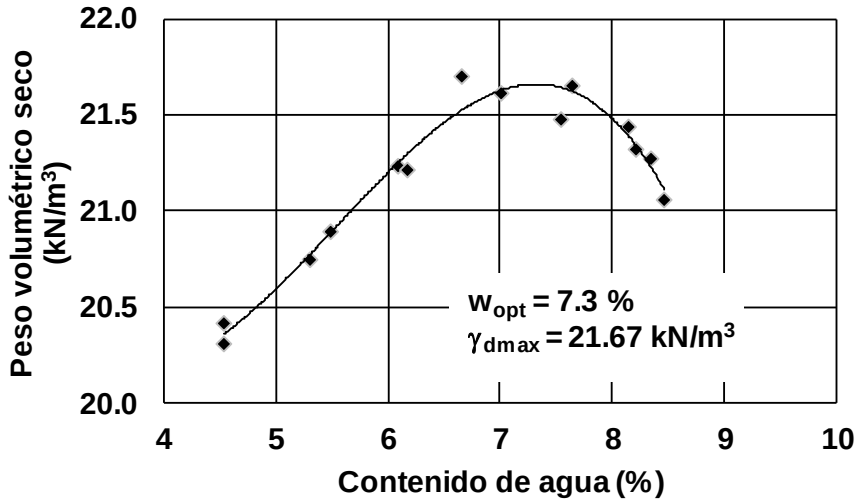


Figura 5.16. Curva de compactación de la base

5.3.3. Evaluación de la resistencia en compresión simple

5.3.3.1. Elaboración de especímenes de prueba

- Se preparó la mezcla suelo-polímero (Figura 5.17). Para las muestras sin polímero, solo se adicionó el agua de compactación.

Figura 5.17. Preparación de la mezcla suelo-polímero para alcanzar el contenido de agua óptimo

- Después del mezclado, las muestras se compactaron en un molde de 15 cm de diámetro por 30 cm de altura (sin collarín). El espécimen se compactó en seis capas y en cada capa se aplicaron 120 impactos con un pisón de 4.5 kg de masa y 45.7 cm de altura de caída (Figura 5.18a, b, y c).

(a) (b) (c)

Figura 5.18. Compactación de los especímenes de prueba

- Los especímenes se ensayaron después de que se cumplió alguna de las siguientes condiciones:

  - Después de 7, 14 o 28 días de secado y 14 días de almacenamiento,
  - Después de 7, 14 días de secado-14 días de humedecimiento y 14 días de almacenamiento.
  - Después de 14 días de secado-14 días de humedecimiento-14 días de secado y 14 días de almacenamiento (14S-14H-14S-14A)

y después de 28 días de secado-14 días de humedecimiento-28 días de secado y 14 días de almacenamiento (28S-14H-28S-14A).

5.3.3.2. Ensaye de especímenes

La prueba de compresión simple se llevó a cabo aplicando carga a una velocidad de 1.2%/min; la prueba se terminó cuando se observó la falla del espécimen (Figura 5.19).

Figura 5.19. Ensaye de compresión simple

5.3.3.3. Resultados de resistencia en compresión simple

La resistencia en compresión simple del material de base con y sin polímero se incrementa con el tiempo de secado (Figura 5.20). Nuevamente se observa que el secado del material posterior a la compactación es importante. La Tabla 5.3 muestra los incrementos de resistencia de la base-polímero para los cuatro tiempos de secado. De esta tabla se observa que los mayores incrementos de resistencia de la base-polímero se presentan a los 28 días de secado.

Tabla 5.3. Incrementos en resistencia dependiendo del tiempo de secado y cantidad de polímero

Tiempo de secado (días)	Incremento en resistencia (%)		
	6% polímero	8% polímero	10% polímero
3	32	16	23
7	12	52	7
14	36	55	45
28	33	57	61

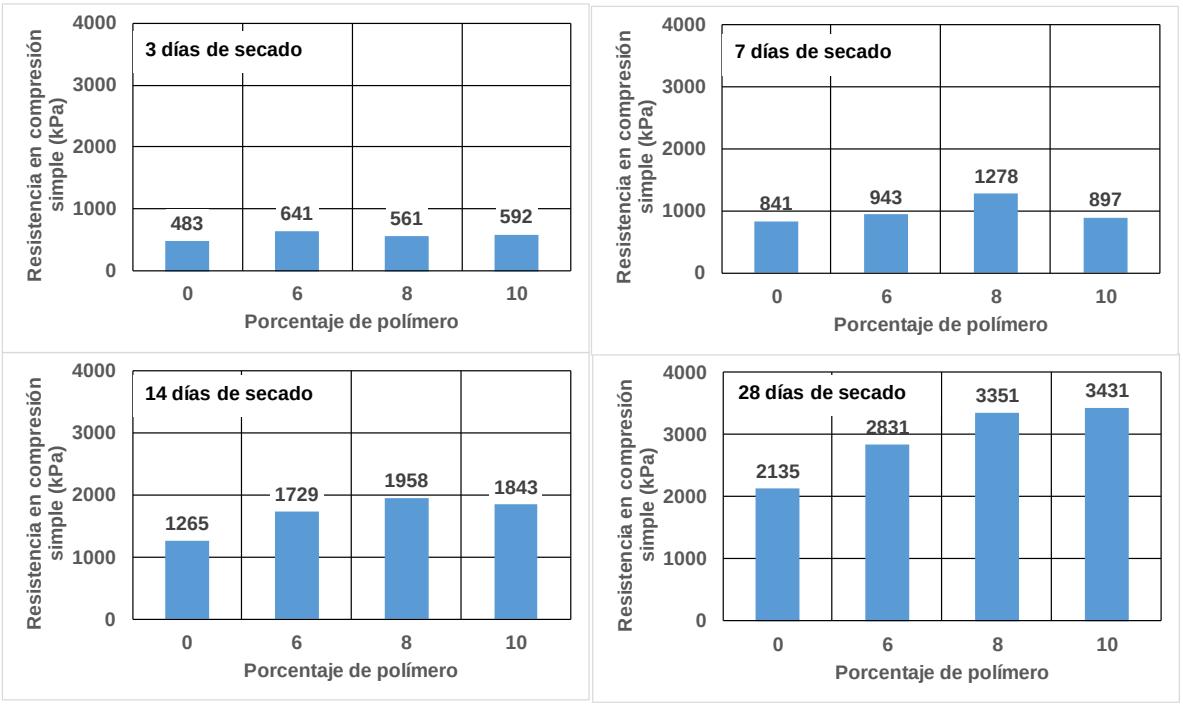


Figura 5.20. Resistencia en compresión simple de la base con y sin polímero y tres tiempos de secado

Para la base con y sin polímero también se estudió qué pasaba con la resistencia si la base adquiría agua. La Figura 5.21 muestra los resultados de especímenes que se secaron durante 7 o 14 días y posteriormente se humedecieron 14 días. Los resultados indican que el material pierde la mayor parte de su resistencia.

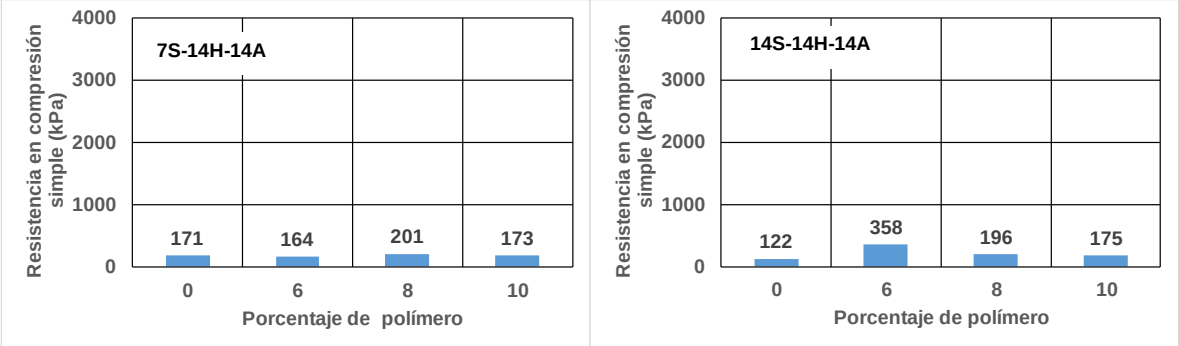


Figura 5.21. Resistencia en compresión simple de la base con y sin polímero. Condición de humedecimiento posterior al secado

Nuevamente es importante mencionar que es probable que después de que el material gane agua, se vuelva a secar. Los resultados de esta condición están indicados en la Figura 5.22, la cual muestra que, si el material se humedece y se seca, la resistencia es ligeramente mayor, como se observa en el caso de las muestras secadas por 14 días. En el caso de las muestras secadas por 7 días, se tienen mayores resistencias después del humedecimiento y secado, sin embargo, en estas muestras, después del humedecimiento, los especímenes se secaron por 14 días y no por 7 días. Quizá por esto se obtuvieron resistencias mucho mayores a las obtenidas con 7 días de secado.

Estos resultados indican que si el material de base-polímero vuelve a perder el agua que absorbió, la resistencia del suelo puede regenerarse.

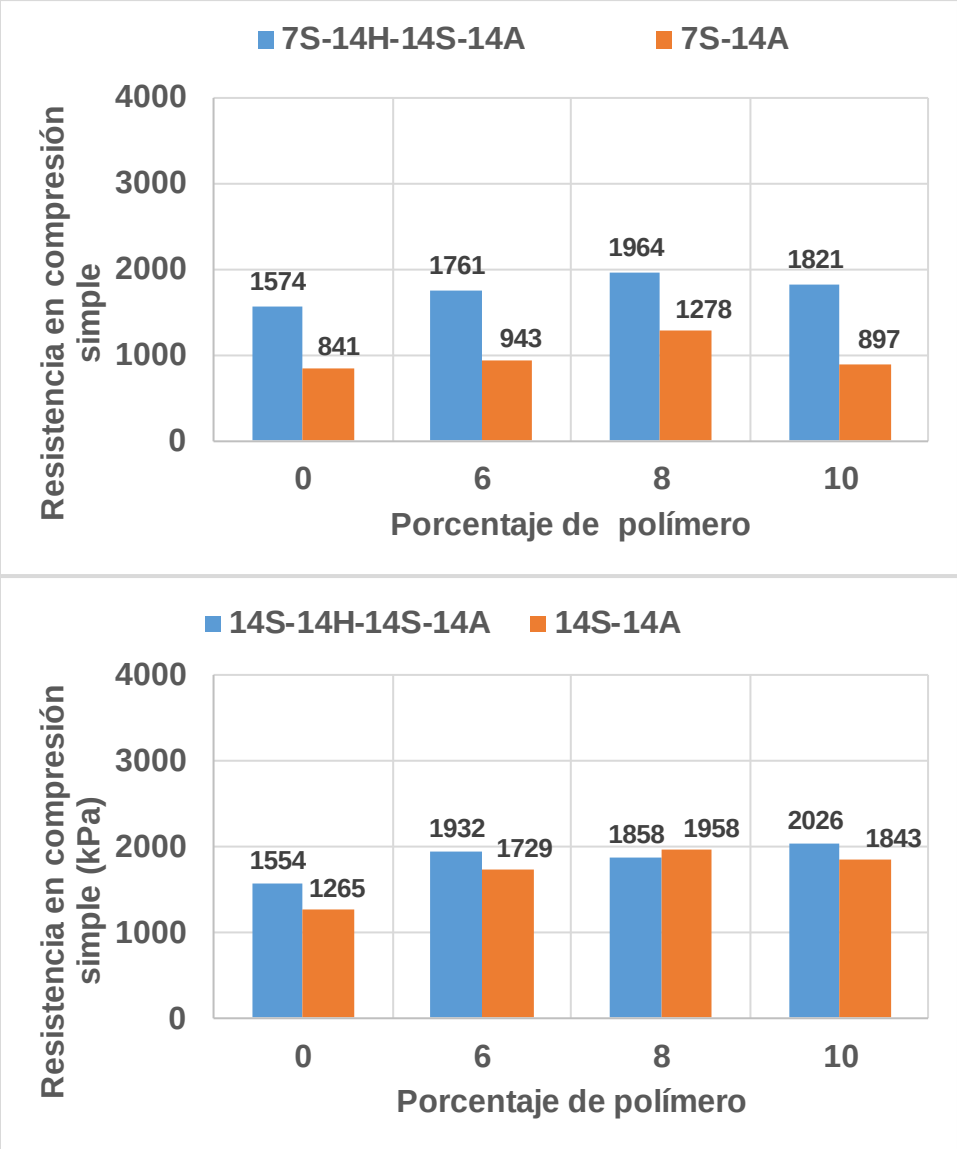


Figura 5.22. Resistencia en compresión simple de la base con y sin polímero. Condición de secado-humedecimiento-secado

5.3.4. Resultados de CBR

En este proyecto se determinaron los valores de CBR de la base natural y estabilizada con 6, 8 y 10 % de polímero. Las condiciones de secado estudiadas fueron 3, 7, 14 y 28 días.

La Figura 5.23 muestra que el valor de CBR promedio de la base natural –para los cuatro tiempos de secado- es de 103%. La base con 6, 8 y 10 % de polímero muestran valores promedio de 99%, 108% y 89%, por lo tanto, son ligeramente inferiores a lo que presenta la base natural.

En el caso de esta propiedad, el adicionar polímero parece no incrementar el CBR. Cabe señalar que estos resultados se obtuvieron con muestras que se saturaron durante 96 horas.

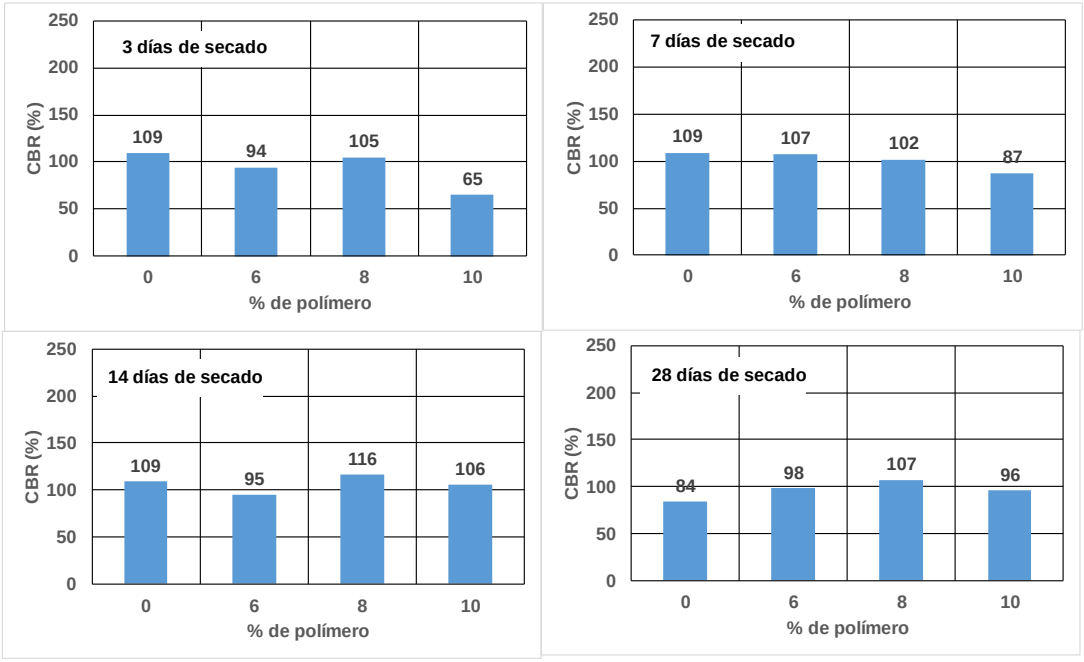


Figura 5.23. Valores de CBR de la base natural y estabilizada con polímero para 4 tiempos de secado

Para este material también se determinó el CBR después de 14 días de secado y sin someter al suelo a saturación. La Figura 5.24 indica que el CBR en seco en todos los casos es mayor al saturado. De hecho, se tienen incrementos de CBR -debidos a que el material se ensaya en seco- de 19, 90, 53 y 30% para 0, 6, 8 y 10% de polímero.

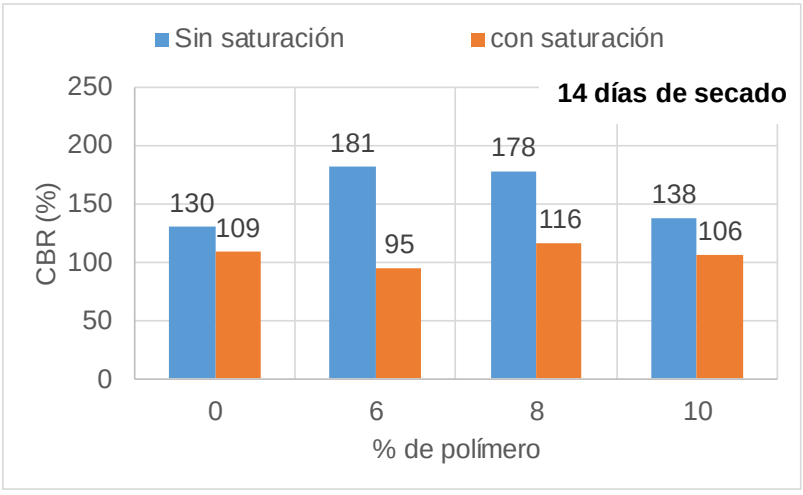


Figura 5.24. CBR con y sin saturación para la base granular

6. Conclusiones

El mejorar las propiedades de los materiales de construcción de caminos o carreteras con aditivos ha sido una operación muy frecuente desde tiempos antiguos. Y por esto, en la actualidad, en los mercados de materiales novedosos se ofrecen una gran cantidad de aditivos que son ofertados como potencializadores de las propiedades de los materiales de construcción de carreteras y caminos. Sin embargo, pocos aditivos cuentan con estudios serios que demuestren su efectividad. Por esto, el Instituto Mexicano del Transporte en conjunto con la Secretaría de Comunicaciones y Transportes han elaborado un protocolo para la evaluación de aditivos y que se ha puesto en uso desde hace algunos años.

Uno de los aditivos presentes en el mercado son los polímeros. En este documento se presentan tres estudios que se han realizado para un polímero que ha sido fabricado por un ingeniero mexicano. Señalamos este punto puesto que la mayor parte de los aditivos ofertados son fabricados en el extranjero.

De los tres estudios llevados a cabo usando el protocolo de pruebas que considera las perores condiciones a las que pueden estar sometidos los materiales, se concluyen los siguientes puntos:

- Para que la mezcla suelo-polímero muestre incremento en propiedades mecánicas, posterior al proceso de compactación se debe dejar secar para que el agua de la mezcla se evapore y se formen las ligas entre polímero-suelo. Esto trae como consecuencia mayores resistencias del material.
- Si a la mezcla suelo-polímero no se le permite secado, las propiedades mecánicas de la mezcla serán similares a las del suelo sin polímero.
- Si la mezcla de suelo-polímero se seca y posteriormente se humedece y después del ciclo de humedecimiento no hay un proceso de secado, el material mejorado con polímero ve reducido sus propiedades (CBR, resistencia en compresión simple, módulo de resiliencia, deformación permanente, etc.). Por lo tanto, el agua sí afecta las propiedades de la mezcla suelo-polímero.
- Por otro lado, en campo no solo se presenta un ciclo de secado-humedecimiento, sino que este proceso puede repetirse varias veces. Por lo tanto, también se llevaron a cabo pruebas con secado-humedecimiento-secado; de estas pruebas se observa que el material sigue manteniendo su resistencia, siempre y cuando pierda agua después de haberla ganado.
- Se observó que materiales como la arena, que en condición natural se encuentra en estado suelto, al adicionarle el polímero en diferentes porcentajes y compactarla, potencializa sus propiedades mecánicas de forma importante.

- Para el caso de la arena con polímero, la altura capilar se ve reducida, mientras que el suelo natural colapsa ante la absorción de agua. Por esto, en la arena con polímero sí se pueden determinar las propiedades mecánicas, no así en la arena natural.
- En el primer proyecto se llevaron a cabo menos pruebas. Sin embargo, a medida que se iba conociendo más el comportamiento del polímero se incrementaron los tipos de ensayes. Esto de tal manera que se verificara de forma más efectiva el comportamiento del polímero.
- Por esto, en el segundo proyecto se llevaron a cabo pruebas de permeabilidad. Sin embargo, esta prueba no mostró resultados con diferencias contundentes entre el suelo natural y el suelo-polímero.
- En el proyecto uno se estudió un suelo mejorado con 6% de polímero; en el segundo a una arena se le agregó 8% de polímero; en el tercer proyecto se estudiaron tres cantidades de polímero: 6, 8 y 10%. Pero al parecer, ninguno de los tres porcentajes es el óptimo, ya que las propiedades mecánicas se fueron incrementado a medida que se incrementó la cantidad de polímero, como se observó en el proyecto 3.
- Por otro lado, en cuanto a tiempo óptimo de secado, entre 14 y 28 días ya se ha presentado la evaporación del agua en su mayor parte. A tres días de secado, el suelo-polímero presenta propiedades similares al suelo natural.
- El material de base incrementa su resistencia en un 61% si tiene 10% de polímero y se permite un tiempo de secado de 28 días.
- El CBR de la base granular parece no mejorarse si el material tiene polímero. Esto, para cuando las muestras son saturadas durante 96 horas.
- Si el CBR de la base granular se ensaya en seco, la base con polímero sí indica valores de CBR mayores (para 14 días de secado, que fue la condición ensayada).

Es importante señalar que para que el polímero sí sea un material que potencializa propiedades, la mezcla suelo-polímero debe secarse. De lo contrario, no se observará ninguna mejora. Por otro lado, al parecer, el polímero es más efectivo en materiales sin cohesión. Aspecto que ya ha sido recalcado en estudios presentados en la literatura.

Finalmente, comentar que en los casos en campo en los cuales la saturación al 100% de los materiales sea poco probable, los beneficios del polímero se verán potencializados.

Bibliografía y Referencias

Santoni, R., Tingle, J., y Nieves, M. (2005). Accelerated strength improvement of silty sand using nontraditional additives. TRB 2003. Annual Meeting CD-ROM. August, 2002.

Swain, K. (2015). Stabilization of soil using geopolymer and biopolymer. Master thesis. Department of Civil Engineering. National Institute of Technology. Rourkela.

Stabilization Selection Guide for Aggregate and native-surfaced low volume roads. U.S. Department of Agriculture. Forest Service, 2009.

Rauch, A.F., J. S. Harmon, L. E. Katz, and H.M. Liljestrand (2002). Measured Effects of Liquid Soil Stabilizers on Engineering Properties of Clay. In Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1787, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 2002. Pp. 33-41.

Santoni, R.L., Tingle, J. S., and Nieves, M. (2005). Accelerated Strength Improvement of Silty Sand with Nontraditional Additives. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1936. 2005, pp. 34-42.

Reza, A. and Shahaboddin, S. (2010). Study of Factors Affecting the Compressive Strength os Sandy Soil Stabilized with Polymer. Geotech Geol. Eng. (2010): 28:139-145. DOI: 10.1007/s10706-009-9287-7.

Kolay, P. K., Pant, A., Puri, V. K., y Kumar, S. (2016). Effect of Liquid Polymer Stabilizer on Geotechnical Properties of Fine-Grained Soil. Indian Geotechnical Conference IGC2016. 15-17 Devember 2016.

Al-Khanbashi, A., and M. El-Gamal (2003). Modification of Sandy soil using waterborne polymer. Journal of Applied Polymer Science, 878, 2484-2491.

Naeini, S.A., Naderinia, B., and Izadi, E. (2012). Unconfined Compressive Strength of Calyey Soils Stabilized with Waterborne Polymer. KSCE Journal of Civil Engineering (2012) 16(6): 943-949.

Azzam, W. R. (2014). Utilization of polymer stabilization for improvement of clay microstructures. Applied Clay Science 93-94(2014). 94-101.

Liu, J., Shi, B., Gu, K., Jiang, H., and Inyang, H. (2012). Effect of polyurethane on the stability of sand-clay mixtures. Bull Eng Geol Environ (2012)71:537-544.

Liu, J., Shi, B., Jiang, H., Bae, S., and Huang, H. (2009). Improvement of water-stability of clay aggregates admixed with aqueous polymer soil stabilizers. Catena 77(2009) 175-179.

Inyang, H.I. and Bae, S. (2005). Polyacrylamide sorption opportunity on interlayer and external pore surfaces of contaminant barrier clays. Chemosphere 58(2005) 19-31.

Hanson, J., Welling, G., and Yesiller, N. (2017). Compaction Characteristics of Polymer Modified Soils. Proceedings of the 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Seoul, 2017. Pp. 2523-2526.

Rajoria, V. and Kaur, S. (2015). Effect of polymer stabilizer on the geotechnical properties of Black Cotton soil. 50th Indian Geotechnical Conference. December 2015.

Moustafa, A.B., Bazara, A.R. and Nour El Din, A.R. (1981). Soil Stabilization by Polymeric Materials. Die Angewandte Makromolekulare Chemie 97 (1981) 1-12/Nr. 13900.

Lopéz, T., Hernández, J.B., Horta, J., Coronado, A., Castaño, V. M. (2010). Polímeros para la estabilización volumétrica de arcillas expansivas. Revista Iberoamericana de Polímeros. Volumen 11(3). Mayo 2010.

Dhakad, R. S. and Trivedi, M. K. (2018). Study of the Enhancement of Strength of Clayey Soil Stabilized with Acrylic Polymer. IJSRD International Journal for Scientific Research and Development. Vol. 6, Issue 02, 2018.

Kolay, P. K., Dhakal, B., Kumar, S., and Puri, V. K. (2016). Effect of Liquid Acrylic Polymer on Geotechnical Properties of Fine-Grained Soils. Int. J. of Geosynth. And Ground Eng. (2016)2:29.

Xing, C., Liu, X., and Anupan, K. (2018). Response of a sandy soil stabilized by polymer additives. Open Access Journal of Environmental and Soil Sciences.

Geiman Christopher M., George M. Filzand y Thomas L.Bradon, (2005): 'Stabilization of Soft clay subgrades in Viginia' Phase - I, Laboratory study, Virginia Polytechnic institute and University of Virginia, USA.

Tingle, J.S., Newman, J.K., Larson, S.L. y Weiss, C. A. (2007). Stabilization Mechanism of Nontraditional Additives. Transportation Research Board Journal of Transportation Research Board.

Tingle, J.S., Newman, J.K., Larson, S. L., Weiss, C. A., y Rushing, J.F. (1989). Stabilization Mechanisms of Nontraditional Additives. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1989, Vol. 2. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2007, pp. 59-67.

Proyecto IE-01/16. Evaluación de un modificador de suelos.

Proyecto IE-15/17. Evaluación del aditivo TECNOSOIL. Segunda fase.

Proyecto IE-15/18. Evaluación del aditivo TECNOSOIL. Tercera fase.

ASTM D854-14. Determinación de la gravedad específica de suelo usando el picnómetro con agua

ASTM D4318-10. Determinación del límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad

ASTM D1140-17. Determinación de la cantidad de suelo más fino que la malla 75 μm (malla no. 200) por medio de lavado.

ASTM C136-14. Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos

ASTM D698-12. Determinación de las características de compactación de un suelo. Prueba Proctor estándar.

NCHRP 1-28A “Recommended standard test method for routine resilient modulus testing of unbound granular base/subase materials and subgrade soils”. Del National Cooperative Highway Research Program. Project 1-28A.

PÁGINAS WEB

[1] http://www.mde.state.md.us/programs/Permits/WaterManagementPermits/WaterDischargePermitApplications/Documents/GDP%20Mineral%20Mine/15MM/EPA%20Guidance%20(15MM)/EPA%20Guidance%20Polymer%20Use.pdf

[2] http://polec.com.mx/portfolio/tecnosoil

COMUNICACIONES
SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

Km 12+000 Carretera Estatal 431 “El Colorado Galindo”
Parque Tecnológico San Fandila, Mpio. Pedro Escobedo,
Querétaro, México. C.P. 76703
Tel: +52 (442) 216 97 77 ext. 2610
Fax: +52 (442) 216 9671

publicaciones@imt.mx

http://www.imt.mx/