



---

---

# **Evaluación del óxido de calcio (estabilical) como estabilizador de suelos**

Natalia Pérez García  
Alfonso Pérez Salazar  
Paul Garnica Anguas

**Publicación Técnica No. 560  
Sanfandila, Qro, 2019**



---

**SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES**  
**INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE**

**Evaluación del óxido de calcio (estabilical) como  
estabilizador de suelos**

**Publicación Técnica No. 560**  
**Sanfandila, Qro, 2019**

---



Este trabajo de investigación fue realizado 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.

Este texto es el producto final del proyecto de investigación externa IE-14/17 "Evaluación de las propiedades mecánicas de suelos tratados con estabilizante". Nuestra gratitud al Ing. Francisco Javier Castañeda y al Ing. Mario Enrique Peña; quienes, en representación del grupo CALIDRA, permitieron la publicación de los resultados del proyecto.

Agradecemos la colaboración de Jocelyn de Los Santos, estudiante de maestría de la Universidad de Chihuahua; de Sarahi Patricia Montiel, estudiante del Tecnológico de Tehuacán; y de David Leyva, estudiante del Instituto Tecnológico de Durango.



# Contenido

---

	Página
Índice de tablas	v
Índice de figuras	vii
Sinopsis	xi
Abstract	xiii
Resumen ejecutivo	xv
Introducción	1
1. La estabilización con cal	3
1.1. ¿Por qué se requiere la estabilización de materiales?	3
1.2. La cal y sus tipos	3
1.3. Mecanismos de estabilización de la cal	4
1.4. Materiales por estabilizar con cal	4
1.5. Diseño de la mezcla	6
1.6. Algunos estudios de estabilización con cal y sus resultados	8
2. Materiales y procedimientos de prueba	15
2.1. Materiales en estudio	15
2.2. Preparación de las muestras	15
2.3. Determinación de las propiedades índice y de compactación de los suelos en estado natural	15
2.4. Determinación de la demanda de cal	16
2.5. Prueba de Valor de Soporte California (CBR)	16
2.6. Resistencia en compresión simple, módulo de resiliencia y deformación permanente.	17
2.6.1. Procedimiento de preparación de muestras	17
2.6.2. Procedimiento de resistencia en compresión simple	21
2.6.3. Prueba de módulo de resiliencia	21
2.6.4. Deformación permanente	23
2.7. Permeabilidad	23
3. Resultados y discusión	27
3.1. Propiedades índice de los materiales naturales	27
3.2. Características de compactación de los suelos naturales	28
3.3. Valor de Soporte California (CBR)	28
3.4. Resistencia en compresión simple	29
3.4.1. Suelo de Monterrey	29
3.4.2. Suelo de Guadalajara	34
3.5. Módulo de resiliencia	38
3.5.1. Suelo de Monterrey	38
3.5.2. Suelo de Guadalajara	42
3.6. Deformación permanente	46

3.6.1. Suelo de Monterrey	46
3.6.2. Suelo de Guadalajara	47
3.7. Permeabilidad	49
4. Conclusiones	51
Bibliografía y referencias	55
ANEXO 1. Características de los especímenes ensayados	57

# Índice de tablas

---

	Página
Tabla 1.1. Guía para seleccionar el tipo de estabilizante de acuerdo con plasticidad y granulometría.	5
Tabla 1.2. Límites de materiales deletéreos	5
Tabla 1.3. Reactividad a largo plazo	7
Tabla 1.4. Resumen de la información obtenida en estudios de estabilización con cal; en donde hubo cambio en plasticidad, textura y características de compactación (Little, 1999).	8
Tabla 1.5. Resumen de investigaciones en donde se estudió la variación de la resistencia debido a la adición de cal (Little, 1999)	10
Tabla 2.1. Esfuerzos de confinamiento y desviadores aplicados en la prueba de módulo de resiliencia según el protocolo NCHRP 1-28A. Procedimiento para materiales de subrasante	22
Tabla 2.2. Esfuerzos de confinamiento y desviadores aplicados en la prueba de módulo de resiliencia según el protocolo NCHRP 1-28A. Procedimiento la para materiales de base/subbase	23
Tabla 3.1. Resumen de las propiedades del suelo en estudio	27
Tabla 3.2. Valores de permeabilidad obtenidos en las pruebas	49
Tabla 3.3. Clasificación de los suelos de acuerdo con la permeabilidad	49



# Índice de figuras

---

	Página
Figura 2.1. Suelos en estudio	15
Figura 2.2. (a) Compactación de muestra; (b) secado de muestras al ambiente (7 días) (si se requiere); (c) saturación durante 96 horas; y (d) aplicación de carga para determinar el CBR	17
Figura 2.3 Preparación de la mezcla suelo-5% de estabilical y agua para alcanzar el contenido de agua óptimo	18
Figura 2.4 (a) Compactación en equipo automático; (b) superficie de la muestra después de la compactación; (c) muestra enrasada; y (d) tomando las dimensiones del espécimen.	18
Figura 2.5 (a) Humedecimiento de muestras por capilaridad; (b) secado de muestras en cuarto de temperatura controlada; y (c) almacenamiento de muestras después de humedecerse, secarse o compactarse.	19
Figura 2.6. Preparación de la mezcla suelo-4% de estabilical y agua para alcanzar el contenido de agua óptimo	20
Figura 2.7. Compactación de los especímenes en molde de 7.1 cm de diámetro por 14.4 cm de altura.	20
Figura 2.8 Enrase, toma de dimensiones y peso de la muestra.	20
Figura 2.9 (a) Humedecimiento de muestras por capilaridad; (b) secado de muestras en el interior de un contenedor, la tapa tiene orificios para que las muestras pierdan agua de forma lenta y no se agrieten; y (c) almacenamiento de muestras después de humedecerse, secarse o compactarse.	21
Figura 2.10 (a) Equipo triaxial para determinar el módulo de resiliencia y (b) vista de la aplicación de la carga cíclica en el espécimen	22
Figura 2.11 (a) Papel filtro sobre el disco poroso de la base; (b) papel filtro húmedo sobre la muestra; (c) disco poroso superior; y (d) molde con collarín.	24
Figura 2.12 Sistema para medir la permeabilidad.	25
Figura 3.1. Granulometrías de los suelos ensayados	27
Figura 3.2. Curvas de compactación de los suelos con o sin estabilical.	28
Figura 3.3. Datos de CBR y expansión libre para ambos suelos	29

---

Figura 3.4.	Curvas esfuerzo-deformación del suelo natural en diferentes tiempos de almacenamiento	30
Figura 3.5.	Curvas esfuerzo-deformación del suelo natural con tres tiempos de secado.	30
Figura 3.6.	Resistencia en compresión simple de muestras que se almacenan y posteriormente se humedecen (suelo natural).	31
Figura 3.7.	Curvas esfuerzo-deformación del suelo con estabilical en tres tiempos de almacenamiento.	31
Figura 3.8.	Curvas esfuerzo-deformación del suelo con estabilical en tres tiempos de secado	32
Figura 3.9.	Resistencia en compresión simple de muestras que se almacenan y posteriormente se humedecen (suelo con estabilical).	32
Figura 3.10.	Resumen de los resultados de resistencia a compresión simple.	34
Figura 3.11.	Curvas esfuerzo-deformación del suelo natural en tres tiempos de almacenamiento.	34
Figura 3.12.	Curvas esfuerzo-deformación del suelo natural en tres tiempos de secado	35
Figura 3.13.	Resistencia en compresión simple de muestras que se almacenan y posteriormente se humedecen (suelo natural).	35
Figura 3.14.	Curvas esfuerzo-deformación del suelo natural en tres tiempos de almacenamiento.	36
Figura 3.15.	Curvas esfuerzo-deformación del suelo con estabilical en tres tiempos de secado	36
Figura 3.16.	Resistencia en compresión simple de muestras que se almacenan y posteriormente se humedecen (suelo estabilical).	37
Figura 3.17.	Resumen de los resultados de compresión simple para el suelo de Guadalajara.	38
Figura 3.18.	Módulos de resiliencia del suelo con diferentes tiempos de almacenamiento.	39
Figura 3.19.	Módulos de resiliencia del suelo con dos tiempos de secado.	39
Figura 3.20.	Módulos de resiliencia del suelo en dos tiempos de almacenamiento y humedecimiento.	40
Figura 3.21.	Módulos de resiliencia del suelo con diferentes tiempos de almacenamiento (suelo con estabilical).	40
Figura 3.22.	Módulos de resiliencia del suelo en tres tiempos de secado (suelo con estabilical).	41
Figura 3.23.	Módulos de resiliencia de muestras que se almacenaron y posteriormente se humedecieron (suelo con estabilical).	41
Figura 3.24.	Módulo de resiliencia del suelo natural en diferentes tiempos de almacenamiento.	42

---

Figura 3.25.	Módulo de resiliencia del suelo natural en diferentes tiempos de secado.	43
Figura 3.26.	Módulo de resiliencia del suelo natural con tiempo de almacenamiento y humedecimiento.	43
Figura 3.27.	Módulo de resiliencia del suelo con estabilical en diferentes tiempos de curado.	44
Figura 3.28.	Módulo de resiliencia del suelo con estabilical en diferentes tiempos de secado.	44
Figura 3.29.	Módulo de resiliencia de muestras almacenadas y humedecidas.	45
Figura 3.30.	Resultados de las pruebas de deformación en el suelo natural.	46
Figura 3.31.	Resultados de las pruebas de deformación del suelo con estabilical.	47
Figura 3.32.	Resultados de las pruebas de deformación del suelo natural.	48
Figura 3.33.	Resultados de las pruebas de deformación del suelo con estabilical.	48



# Sinopsis

---

Este documento presenta la evaluación del óxido de calcio (estabilical) como estabilizador de suelos. En él aparecen los resultados obtenidos de propiedades índice y mecánicas obtenidas en dos suelos estabilizados con óxido de calcio (uno clasificado como limo de alta compresibilidad y otro clasificado como arena bien graduada).

Los resultados de las propiedades índice y mecánicas fueron determinados en suelo con y sin óxido de calcio. De los resultados, se puede concluir que el óxido de calcio sí mejora sustancialmente las propiedades mecánicas del suelo natural; además, cuando el material estabilizado absorbe agua, las propiedades no se degradan como sucede con las del suelo natural.



# Abstract

---

This document presents the evaluation of calcium oxide (estabilical) as soil stabilizer. It reports the results obtained from index and mechanical properties obtained in two soils stabilized with calcium oxide (one classified as high-compressibility silt and another classified as well-graded sand). The results of the index and mechanical properties were determined in soil with and without calcium oxide. From the results, it can be concluded that calcium oxide does improve substantially the mechanical properties of natural soil; when the stabilized material absorbs water, the properties do not degrade as they do with natural soil.



# Resumen ejecutivo

---

El mejoramiento de las propiedades de los materiales de construcción de carreteras ha sido un tema tratado desde épocas antiguas; el propósito es construir obras carreteras con mayor vida útil y con menores costos de mantenimiento.

Para mejorar las propiedades de los materiales, en el mercado existen diferentes productos; entre estos podemos mencionar los polímeros, las enzimas, asfalto, etc. Sin embargo, los productos más populares han sido el cemento y la cal, puesto que hay una mayor cantidad de investigaciones realizadas con ellos y su efectividad ha sido comprobada en varias investigaciones. A pesar de esto, aún se requieren estudios que profundicen más en el comportamiento de los materiales estabilizados con pruebas que se utilizan en la actualidad; tanto en el diseño como en el control de la construcción de las obras carreteras.

En este documento se presenta una investigación de dos materiales que fueron estabilizados con óxido de calcio (estabilical). Uno de los materiales es un suelo granular y el otro es un suelo que pasa la malla No. 4, y que fue clasificado como limo de alta compresibilidad (MH).

El documento presenta en el capítulo 1 algunos antecedentes sobre la cal; en donde se resumen los tipos de cal, qué materiales deben ser estabilizados con cal, de acuerdo con lo especificado en algunos países; se mencionan los mecanismos de estabilización de la cal. Además, se toma una tabla publicada por Lytton, en donde resume varios estudios realizados con cal y cuáles fueron los resultados obtenidos. En esta tabla se observan rápidamente cuáles han sido los beneficios de la cal, tanto en estudios de laboratorio como estudios de campo.

En el capítulo 2 se resumen los procedimientos de prueba. Aquí se enfatizan y describen a detalle los procedimientos de CBR, resistencia en compresión simple, módulo de resiliencia, deformación permanente y permeabilidad.

En el último capítulo se resumen los resultados de las pruebas ya mencionadas de especímenes ensayados en diferentes condiciones, esto para probetas preparadas con y sin estabilical.

Finalmente, en el capítulo de conclusiones se indica lo encontrado en el estudio. A manera de resumen, se puede decir que en ambos suelos se observó que la estabilical sí mejora las propiedades mecánicas de los dos materiales. Pero uno de los aspectos más sobresaliente es que las muestras que se prepararon con suelo natural pierden casi toda su resistencia o rigidez cuando se exponen al

agua; sin embargo, cuando los suelos son estabilizados con estabilical, la mayor parte de la resistencia permanece aun cuando el material absorba agua.

Es conveniente comentar que las pruebas fueron determinadas en dos o más probetas para que los resultados fueran confiables. En el anexo, se resumen las condiciones de los especímenes después de haber sido compactados y antes de ser ensayados.

# Introducción

---

La construcción de carreteras asfálticas involucra el uso de diferentes materiales; entre ellos se encuentra la mezcla asfáltica, los materiales granulares y los suelos de granulometría más finas como limos, arenas y arcillas. Los materiales que se utilicen en la construcción deberán de cumplir ciertos requisitos especificados para capas de terraplén, subrasante, subbase, base y carpeta asfáltica.

Sería deseable que la conformación de las capas del pavimento se realizara con materiales que se encuentran a lo largo del proyecto; sin embargo, en muchos casos, dichos materiales no cumplen especificaciones. Por esto, los ingenieros han utilizado desde épocas muy remotas productos que, al adicionarse a materiales que no cumplen especificaciones, mejoran algunas de las propiedades mecánicas; lo que trae como consecuencia, en algunos casos, materiales más durables y por lo tanto mejores para la sustentación del pavimento.

Uno de los productos utilizados desde épocas muy antiguas es la cal. Este producto es uno de los más populares para mejorar propiedades de materiales que no cumplen con especificaciones o cuando se requieren mejores competencias de los materiales para carreteras de altas especificaciones.

Aun cuando la cal ha sido muy estudiada con propiedades mecánicas como la resistencia a compresión, el valor de soporte California (CBR), pruebas de plasticidad, expansión, etc.; poco se ha realizado en cuanto a pruebas de deformación permanente y módulo de resiliencia, que son parámetros de mayor importancia en el área de pavimentos.

Este trabajo muestra una investigación de estabilización de dos suelos con óxido de calcio (en adelante solo se hará referencia como cal o estabilical). Los dos suelos fueron evaluados con y sin estabilical, para poder realizar las comparaciones.



# 1 La estabilización con cal

---

## 1.1. ¿Por qué se requiere de la estabilización de materiales?

La construcción de caminos y carreteras requiere de materiales de calidad que cumplan especificaciones; sin embargo, en muchas ocasiones los materiales cercanos al proyecto no cumplen con los requisitos de calidad. En estas circunstancias, el ingeniero tiene que recurrir al uso de materiales locales modificando sus propiedades utilizando la técnica de estabilización; esta puede mejorar la rigidez de los materiales, reducir el espesor de pavimento, mejorar la durabilidad y resistencia al efecto del agua, reducir el potencial de expansión, etc. (Shivaji, s.f.).

## 1.2. La cal y sus tipos

De acuerdo con la norma N.CMT.4.03.001/02 de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, la cal es el producto de calcinación de rocas calizas; constituidas principalmente por óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ) y otros componentes. Según su composición química, se clasifican en:

**Cal viva:** Producto de la calcinación de la roca caliza, constituido en su mayor parte por óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ), o bien óxido de calcio asociado con óxido de magnesio ( $\text{MgO}$ ); capaces de reaccionar con el agua exotérmicamente, lo que produce su apagado o hidratación.

**La cal apagada:** Polvo seco, obtenido al tratar cal viva con la suficiente agua para satisfacer su afinidad química y provocar su hidratación. Consiste esencialmente en hidróxido de calcio [ $\text{Ca(OH)}_2$ ] o una mezcla de hidróxido de calcio, óxido de magnesio ( $\text{MgO}$ ) e hidróxido de magnesio [ $\text{Mg(OH)}_2$ ].

**Cal hidráulica hidratada:** Producto cementante seco, hidratado, obtenido al calcinar calizas que contienen sílice ( $\text{SiO}_2$ ) y alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) a una temperatura cercana a la de fusión incipiente; de tal forma que se obtiene suficiente óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ) para permitir la hidratación y, al mismo tiempo, dejar suficientes silicatos de calcio ( $\text{CaSiO}_3$ ) sin hidratar; con lo que resulta un polvo seco que cumple con las propiedades hidráulicas requeridas en algunas aplicaciones; destaca la propiedad de fraguar y endurecer, aun bajo el agua.

**Cal hidratada, al alto calcio:** Cal hidratada producto de la calcinación de calizas, contaminadas con menos del cinco por ciento de carbonato de magnesio ( $MgCO_3$ ).

**Cal dolomítica:** Cal obtenida de la calcinación de calizas que contiene del treinta y cinco al cuarenta y seis por ciento de carbonatos de magnesio ( $MgCO_3$ ).

### **1.3. Mecanismo de estabilización de la cal**

Los aditivos como la cal reaccionan químicamente con la fracción de arcilla presente en el suelo, para producir cambios deseables en las propiedades ingenieriles como la plasticidad, trabajabilidad, potencial expansión-contracción, y resistencia de suelos. El grado de mejora depende de factores tales como el tipo de suelo, porcentaje de cal, tiempo de curado, temperatura del suelo y las condiciones de humedad durante el tiempo de curado. El éxito que tenga la estabilización con cal depende de la reacción que se dé entre suelo-cal, lo cual depende en gran medida de la fracción de arcilla que tenga el suelo; en promedio, de 15 a 20% de arcilla es necesaria para asegurar la reacción. En suelos granulares como limos, arenas y gravas, la fracción de arcilla es tan pequeña y la reacción suelo-cal es despreciable; lo cual trae como consecuencia que no se mejoren las propiedades del suelo (IDOT, 2005).

#### *El proceso de estabilización*

Cuando se adiciona cal a un suelo cohesivo, los iones de calcio reemplazan los iones de sodio de la fracción de arcilla hasta que el suelo se satura con calcio y el pH se incrementa a un valor en exceso de 12 (altamente alcalino). La solubilidad del sílice y alumina en el suelo se incrementa dramáticamente cuando el pH es mayor a 12 y su reacción con la cal puede seguir, lo que produce compuestos cementante de silicatos de calcio y aluminatos; estos compuestos cementantes forman un esqueleto que unen a las partículas de suelo. La ganancia de resistencia asociada con la formación de silicatos de calcio y aluminatos ocurre lentamente (Ethiopian Roads Authority, 2002).

Los efectos del tratamiento con cal pueden ser de corto y largo plazo. Los efectos inmediatos (corto plazo) se logran sin que se dé un proceso de curado y son de primordial importancia en la etapa de construcción; este efecto se atribuye al intercambio catiónico y floculación-aglomeración presentado cuando la cal se mezcla al suelo. Por otro lado, los efectos a largo plazo aparecen durante el curado y posteriormente, y son importantes desde el punto de vista de resistencia y durabilidad (Mallela et al., 2004 citado por Amu et al., 2011).

## 1.4. Materiales por estabilizar con cal

Existen varias formas de seleccionar el tipo de suelo en los que se puede aplicar la cal. Por ejemplo, las autoridades de carreteras de Etiopía usan la información de la Tabla 1.1 en la que indican qué suelos pueden ser estabilizados con cal (Ethiopian Roads Authority, 2002):

**Tabla 1.1. Guía para seleccionar el tipo de estabilizante de acuerdo con plasticidad y granulometría.**

Tipo de estabilizante	Propiedades del suelo					
	Más del 25% pasa la malla de 0.075 mm			Menos del 25% pasa la malla de 0.075 mm		
	PI≤10	10<PI≤20	PI>20	PI≤6	PI≤10	PI>10
Cemento	Si	Si	*	Si	Si	Si
Cal	*	Si	Si	No	*	Si
Cal-puzolana	Si	*	No	Si	Si	*

\* Indica que el agente tendrá efectividad marginal; PI es el índice de plasticidad.

Por su parte, el Departamento de Transporte de Queensland indica que los suelos con bajas proporciones de arcilla reactiva no son adecuados para estabilizarse con cal. Estos materiales pueden ser los suelos con alto contenido de limo como ML, MH, OH; otros suelos que no son adecuados son los que tienen un índice de plasticidad menor o igual a 10; además, indican que los materiales que exceden la cantidad de material deletéreo no son adecuados para ser estabilizados con cal. Las pruebas de material deletéreo incluyen la determinación de sulfato, contenido de materia orgánica y contenido de óxido ferroso. Señalan que la materia orgánica interfiere con el proceso de hidratación y compite por el agente estabilizante disponible. Los sulfatos, por su parte, interfieren con las reacciones puzolánicas debido a la formación de hidratos expansivos que se forman posterior a la compactación; lo cual puede producir expansión. Respecto a los óxidos ferrosos, también pueden interferir con la reacción puzolánica.

La Tabla 1.2 muestran los límites permitidos de materiales deletéreos, de acuerdo con el Departamento de Transporte de Queensland.

**Tabla 1.2. Límites de materiales deletéreos**

Propiedad	Límite
Contenido de sulfato (soluble en agua)	<0.3%
Contenido orgánico*	<1.0%
Oxido ferroso (FeO)*	<2.0%

Nota\*: Los límites mostrados son una guía; se requiere consultar otras guías antes de estabilizar los materiales que tienen óxido ferroso mayor a 2.0% o contenido de materia orgánica mayor a 1.0%.

## 1.5. Diseño de la mezcla

De acuerdo con Little y Yusuf (2001), diseñar una mezcla que posea propiedades estructurales y de durabilidad adecuadas requiere de los siguientes pasos:

1. **Clasificación del suelo y evaluación para ser estabilizado con cal:** En este punto, se debe determinar si el suelo tiene al menos 25% de material que pasa la malla No. 200 y que el índice plástico sea al menos 10%. Los suelos con contenido de materia orgánica que exceden 1% en peso son difíciles de estabilizar o pueden requerir cantidades altas de cal, lo que trae como consecuencia una solución antieconómica; también se limitan los sulfatos solubles a menos de 0.3% en peso en una solución agua-suelo de 10:1. Concentraciones altas de sulfatos pueden causar reacciones deletéreas entre la cal, minerales del suelo, iones de sulfato y agua; esto puede llevar a pérdida de estabilidad y expansión.
2. **Prueba de Eades y Grim para determinar la cantidad aproximada de cal:** Se lleva a cabo una prueba de Eades y Grim (ASTM D6276) para determinar la demanda de cal; esta prueba identifica la cantidad de cal requerida para satisfacer inmediatamente las reacciones suelo-cal, y proporciona suficiente calcio residual y un sistema con pH alto (cerca de 12.4 a 25°C). Esto es necesario para tener condiciones apropiadas para que se presenten las reacciones puzolánicas a largo plazo, que son las responsables del desarrollo de la rigidez y la resistencia.
3. **Determinar las curvas de compactación del suelo tratado con cal, la sensibilidad al agua y la ganancia de resistencia mediante curado acelerado:** Determinar la curva de compactación con el protocolo apropiado; para fabricar las muestras, se recomienda un porcentaje con respecto a la prueba Proctor modificada (por ejemplo 95% de la AASHTO T180). Las muestras para medir la resistencia y la susceptibilidad al agua se preparan con contenido de agua óptimo con una tolerancia de  $\pm 1\%$ . Todas las muestras son curadas por siete días a 40°C en bolsas selladas (para que tengan suficiente humedad durante el curado). Después del curado, las muestras deben ser humedecidas por capilaridad durante 24 horas (dependiendo de la plasticidad del suelo) antes de llevar a cabo la prueba de resistencia; el humedecimiento por capilaridad se considera un método efectivo para evaluar el daño potencial debido a la absorción de agua.
4. **Prueba de resistencia a compresión de la mezcla suelo-cal:** La prueba de resistencia a compresión se lleva a cabo de acuerdo con el procedimiento ASTM D 5102.
5. **Determine el módulo de resiliencia:** El módulo de resiliencia se puede determinar con el procedimiento AASHTO T294-94.
6. **Prueba con tubo de succión (por sus siglas en inglés TST) para evaluar la susceptibilidad al agua.** La medición del valor dieléctrico (DV) con el tubo de succión es una medida de cuánta agua absorberá el material por capilaridad y el estado de vinculación del agua absorbida. Un valor bajo

de constante dieléctrica indica la presencia de agua fuertemente adherida y un buen arreglo entre las moléculas de agua.

El Departamento de Queensland usa lo siguiente, en cuanto a determinar la cantidad de cal utilizada:

### **Demanda de cal**

Para medir la cantidad de cal requerida para satisfacer el intercambio catiónico y reacciones de corto plazo, se lleva a cabo la prueba de “demanda de cal (LD, por sus siglas en inglés); la evaluación de la demanda de cal es para obtener la cantidad mínima, pero no es el contenido final para el proceso de diseño. Esta prueba solo es un punto de inicio para determinar la cantidad óptima de cal; sin embargo, no establece si se presentarán las reacciones puzolánicas para que se produzca ganancia de resistencia a largo plazo.

Indica, además, que se use la resistencia en compresión simple para evaluar la reactividad del suelo y seleccionar una cantidad de cal; la cual asegurará durabilidad a largo plazo. Se deben realizar pruebas de compresión no confinada con 0% de cal, con LD-2%, LD, LD+2% y LD+4%.

Las condiciones de compactación de los especímenes será de 97% con respecto al máximo peso volumétrico seco y 100% del contenido de agua óptimo, esto para materiales de subrasante; un 1% de reducción en el grado de compactación puede reducir 5% la resistencia en compresión; pequeñas variaciones pueden enmascarar el efecto de otras variables como contenido de cal y condiciones de curado. Debido a lo anterior, la variación en contenido de agua de compactación debe limitarse. Se sugiere que varíe en  $\pm 0.3$  unidades percentiles. Con respecto al curado, los especímenes se curan en un cuarto húmedo a  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  por un tiempo de 28 días.

Para establecer la reactividad del suelo, se compara la resistencia en compresión con 0% de cal y la obtenida en probetas preparadas con la demanda de cal y se evalúa el siguiente criterio:

**Tabla 1.3. Reactividad a largo plazo**

Condición	Reactivo/no reactivo
Resistencia con LD-Resistencia con 0% cal	$\leq 0.35$ MPa, suelo no reactivo
Resistencia con LD-Resistencia con 0% cal	$\geq 0.35$ MPa, suelo reactivo

Los suelos no reactivos no son adecuados para estabilizarse con cal. Para los suelos reactivos, se grafica la resistencia a compresión contra el contenido de cal y se determina la cantidad de cal correspondiente, a una resistencia de 1.5 MPa ( $15.3 \text{ kg/cm}^2$ ); esta cantidad será el contenido de estabilizante. Si existe un rango de contenidos de cal que tengan una resistencia de 1.5 MPa, entonces se lleva a

cabo una prueba de capilaridad en muestras con contenidos de cal de LD+2 y LD+4 y se usa la cantidad de cal con la menor altura capilar como el contenido de estabilizante.

Otros autores indican que el porcentaje de cal depende del tipo de suelo por estabilizar. El porcentaje de cal por utilizar puede ser determinado haciendo pruebas de límites de consistencia, para determinar en qué medida el índice de plasticidad se ve reducido al utilizar diferentes cantidades de cal; así también se pueden hacer con pruebas de resistencia para ver qué porcentaje maximiza esta propiedad; sin embargo, la mayoría de los suelos finos pueden estabilizarse de forma efectiva con un porcentaje de cal de entre 3 a 10% con respecto al peso seco del suelo (Amu et al., 2011).

## 1.6. Algunos estudios de estabilización con cal y sus resultados

Little (1999) resume algunos de los estudios realizados en cuanto a estabilización con cal; además, menciona cuáles fueron los resultados y cómo deben ser utilizados. Las Tablas 1.4 y 1.5 muestran los resúmenes realizados por este autor.

**Tabla 1.4. Resumen de la información obtenida en estudios de estabilización con cal; en donde hubo cambio en plasticidad, textura y características de compactación (Little, 1999).**

Referencia	Parámetro evaluado	Métodos de prueba	Resultados e impacto en el comportamiento del pavimento	Impacto en el diseño mecanicista
Thompson (1967) Holtz (1969) Little (1995) Eades et al. (1960)	Plasticidad y trabajabilidad	Límites de consistencia	La cal reduce el índice de plasticidad y hace que el suelo sea más trabajable a medida que la cal reacciona con la superficie de la arcilla. La reacción depende de la mineralogía, pero la mayor parte de los suelos plásticos muestran reducción en la plasticidad y la trabajabilidad se mejora. Algunos suelos muy plásticos (IP mayor a 50) pueden transformarse en un suelo no plástico con la cal.	El mejoramiento de las propiedades físicas como la reducción del índice de plasticidad puede reducir la susceptibilidad a la humedad, lo cual puede tomarse en cuenta en los modelos ambientales del método de diseño mecanicista.
Thompson (1969) Goldberg y Klein (1952) Little (1995) Dempsey y Thompson (1968)	Cambio de volumen	Varios métodos, incluyendo el CBR y pruebas de consolidación	Los datos demuestran la reducción del potencial de expansión de 8 y 10% (no tratado) hasta valores menores de 0.1% (tratado). El índice de plasticidad y la expansión se mejoran de forma importante con el tiempo de curado y con la reacción puzolánica.	La reducción en el potencial de expansión puede tomarse en cuenta en los modelos de efectos ambientales.

**Tabla 1.4. Resumen de información obtenida en estudios de estabilización con cal; en donde hubo cambio en plasticidad, textura y características de compactación (Little, 1999) (continuación).**

Referencia	Parámetro evaluado	Métodos de prueba	Resultados e impacto en el comportamiento del pavimento	Impacto en el diseño mecanicista
Neubauer y Thompson (1972) Little (1995)	Características de compactación	AASHTO T-99 y T-180	La reacción entre el suelo y la cal altera la relación contenido de agua-densidad, pero depende del suelo, del tiempo de curado y de la cantidad de cal adicionada. La curva de densidad tiene su valor máximo a mayor contenido de agua y presenta una densidad seca máxima menor.	El mejoramiento de las características de compactación proporciona una subbase con una mejor capacidad de soporte para las capas superiores, particularmente las capas granulares. Esto probablemente se puede tomar en cuenta en el diseño mecanicista mejorando el módulo de resiliencia de la capa superior.
Basma y Tuncer (1991)	Potencial de expansión	Prueba de expansión unidimensional	El potencial de expansión de una arcilla con índice plástico alto con una presión de expansión de 2600 kPa se redujo a 1700 kPa con un 10% de cal hidratada (inmediatamente) y se redujo a 0 kPa para 28 días de curado solo con 4% de cal.	La reducción del potencial de expansión puede tomarse en cuenta en el modelo climático.
Basma y Tuncer (1991)	Cambio en la textura	Clasificación del suelo y porcentaje de suelo menor a 2 micras	Una arcilla CH cambió su clasificación a ML con la adición de 3% de cal hidratada. El porcentaje de material menor a 2 micras se redujo de 56% (suelo no tratado) a 40% (sin curado), a 10% para 7 días de curado y 2% para 28 días de curado.	Los cambios en la textura afectan las características de resiliencia y resistencia del material.
Eades et al. (1963)  Bicysko (1996)	pH  pH	Prueba de pH de acuerdo con la norma ASTM C977 (apéndice)  Prueba de pH de acuerdo con la norma ASTM C977 (apéndice)	El pH del suelo estabilizado con cal se mantiene en valores altos, lo cual es adecuado para que se presente la reacción puzolánica por un período de 3 años.  El material estabilizado mantiene un pH mayor a 10 por un período de 16 años.	Mantener un pH alto indica la capacidad para que se presente la reacción puzolánica para promover modificación de la plasticidad y la continua ganancia de resistencia.

**Tabla 1.5. Resumen de investigaciones en donde se estudió la variación de la resistencia debido a la adición de cal (Little, 1999)**

Referencia	Parámetro de resistencia evaluado	Métodos de prueba	Resultados e impacto en el comportamiento del pavimento	Impacto en el diseño mecanicista
Estado del arte. TRB Reporte-5 (1987).	Resistencia sin curado	Resistencia en compresión no confinada, CBR y otros métodos.	El efecto inmediato de la cal en el suelo puede promover reducción en la plasticidad, reducción en la retención de agua y mejoramiento en las características de compactación dando como resultado ganancia en la resistencia. La plataforma de trabajo proporcionada por el suelo-cal resulta en mejor construcción de la base y carpeta asfáltica.	La plataforma de suelo-cal puede mejorar la calidad de la construcción de base y carpeta asfáltica lo que se puede reflejar en mejores características de esas capas.
Estado del arte. TRB Reporte-5 (1987).	Resistencia con curado	Resistencia UCCS	Muchos suelos de Illinois mostraron incremento de resistencia de 700 kPa o más con respecto al suelo natural después de 28 días de curado con curado a 22°C. Un tiempo mayor de curado incrementó la resistencia en 4375 kPa. Para el suelo de relleno se obtuvo una resistencia de cerca de 11 MPa. Las evidencias de campo indican que algunas mezclas de suelo-cal pueden continuar con el incremento en resistencia aún después de 10 años.	Las propiedades de resistencia del suelo estabilizado con cal debe tomarse en cuenta en el diseño mecanicista.
Thompson (1969)	Resistencia con curado	Thompson reportó fuerte influencia de la compactación en la resistencia. 5% de incremento en compactación podía incrementar la resistencia tanto como 60%.	Los mismo a lo anterior.	Los mismo a lo anterior.
Eades y Grim (1963)	Resistencia con curado	UCCS	Eades y Grim midieron la resistencia de seis suelos con diferentes mineralogías y encontraron que la resistencia última dependía de la mineralogía, del porcentaje de cal adicionado. Su estudio demostró que la resistencia se puede incrementar de 200 a 1000%. Este estudio ilustró la importancia de encontrar el óptimo de cal por adicionar.	Los mismo a lo anterior.

**Tabla 1.5. Resumen de investigaciones en donde se estudió la variación de la resistencia debido a la adición de cal (Little, 1999) (continuación)**

Referencia	Parámetro de resistencia evaluado	Métodos de prueba	Resultados e impacto en el comportamiento del pavimento	Impacto en el diseño mecanicista
Doty y Alexander (1978)	Resistencia con curado	---	En el estudio llevado a cabo en California se evaluó la ganancia en resistencia cuando se estabiliza con cal para 12 suelos y tiempo de curado de 7 días a 38°C equivalente a un curado de 28 días a 23°C. La resistencia se incrementó con el tiempo de curado y aún en suelos con bajo índice plástico se obtuvo un incremento de resistencia importante. Todos los suelos mostraron ganancia en resistencia; algunos mostraron una ganancia en exceso de 10 MPa después de 360 días de curado. Se registraron ganancias importantes de resistencia entre 180 y 360 días.	El incremento de resistencia debido a la reacción puzolánica debe tomarse en cuenta en el diseño mecanicista.
Uddin et al. (1997)	Resistencia con curado	UCCS	Una arcilla de alta plasticidad se estabilizó y se curó durante 180 días. Los contenidos de cal estuvieron entre 2.5% y 15%. Se observaron incrementos de resistencia importantes entre 60 y 180 días. La máxima ganancia en resistencia se obtuvo con 10% de cal y se redujo con 15%. El contenido de cal óptimo produjo un 1.1% más de resistencia (11 050 kPa)	Los mismo que arriba.
Evans (1998)	Resistencia con curado	UCCS	Suelos de dos proyectos de Queensland se estabilizaron con cal. El suelo natural, con un índice de plasticidad de cerca de 40% se trató con 8% de cal y el índice de plasticidad se redujo por debajo de 8%. Se obtuvo un incremento en resistencia de 0.1 MPa a 1.4 MPa a un tiempo de curado de 28 días. La ganancia de resistencia entre 28 días y 26 semanas fue importante.	Lo mismo de arriba.
Uddin et al. (1997)	Resistencia al corte	Prueba triaxial	Se midieron la cohesión y el ángulo de fricción en probetas que tenían entre 2.5 a 15% de cal; los tiempos de curado hasta de dos meses. Se demostró que existen incrementos importantes en ambos parámetros.	La resistencia y propiedades resilientes deben tomarse en cuenta en el diseño empírico-mecanicista.

**Tabla 1.5. Resumen de investigaciones en donde se estudió la variación de la resistencia debido a la adición de cal (Little, 1999) (continuación)**

Referencia	Parámetro de resistencia evaluado	Métodos de prueba	Resultados e impacto en el comportamiento del pavimento	Impacto en el diseño mecanicista
Little (1994) y Little (1995)	Resistencia al corte	Prueba triaxial de Texas	Little (1998) estudió una gran cantidad de agregados marginales de Texas incluyendo caliche, grava, etc. Se adicionó 1 y 3% de cal hidratada y la resistencia se mejoró de forma importante. Incrementos típicos de resistencia fueron de 50 a 150% después de la exposición a agua por medio de capilaridad.	Las propiedades de resistencia deben tomarse en cuenta en el diseño empírico-mecanicista.
Thompson (1966)	Resistencia al corte	Prueba triaxial	El incremento en resistencia es importante aún en mezclas suelo-cal sin curado.	El mejoramiento de la resistencia trae como consecuencia una capa más resistente a la falla por corte y al daño acumulado o deformación permanente.
Miller et al (1970) Moore et al (1971) Thompson (1966) y Tulloch et al. (1970) Thompson (1969)	Resistencia a tensión	Prueba de tensión indirecta y prueba de resistencia a flexión	La resistencia en tensión es cercana a 0.13 de la resistencia en compresión no confinada (Thompson, 1966). Una aproximación razonable de la resistencia en flexión es 0.25 de UCCS (Thompson, 1969). Como la cal incrementa la resistencia en compresión también se mejora la resistencia en tensión.	La resistencia en tensión de las mezclas suelo-cal debe ser tomado en cuenta cuando se evalúa el agrietamiento por contracción a través del modelo climático y también cuando se evalúa el daño por fatiga.
Thompson (1969) Moore et al (1971) Little (1995, 1996, 1997)	CBR	Prueba de CBR en mezclas suelo-cal con y sin curado	Thompson demostró que el tratamiento con cal de suelos finos de Illinois produce un incremento en CBR independientemente del tiempo de curado y la reactividad del suelo. Thompson también demostró un mejoramiento substancial debido al curado a largo plazo en suelos reactivos.	El diseño empírico-mecanicista debería tomar en cuenta el efecto de la ganancia en resistencia.
Eades et al (1963)	Resistencia al corte	CBR	Se evaluaron tres suelos de Virginia (suelo de mica, arcilla plástica y granito intemperizado). Se observó incremento en CBR de 5 a cerca de 100%. De pruebas de difracción de rayos X y de microscopio electrónico verificaron la presencia de material puzolánico responsable de la ganancia de resistencia.	Se debe establecer en los métodos empíricos-mecanicistas la durabilidad de los materiales con respecto al tiempo.

**Tabla 1.5. Resumen de investigaciones en donde se estudió la variación de la resistencia debido a la adición de cal (Little, 1999) (continuación)**

Referencia	Parámetro de resistencia evaluado	Métodos de prueba	Resultados e impacto en el comportamiento del pavimento	Impacto en el diseño mecanicista
Puatti (1998)	Resistencia al corte	Prueba de CBR	La cal es usada en Normandía, la República Checa y Polonia y otros lugares de Francia como una capa sobre la subrasante. El suelo natural de arcilla o limo se modifica a una profundidad de 300 mm o un metro para modificar y secar el suelo. El CBR saturado se incrementa con la adición de 3 a 4% de cal hidratada. Esto es considerado un proceso efectivo y necesario para tener una superficie para construir el pavimento.	
Perry et al. (1996)	Resistencia al corte	Métodos Británicos	Cuando se adiciona 2.5% de cal a suelo húmedos (aproximadamente 35 a 40% de humedad en un limo arcilloso), el suelo se seca y el CBR se incrementa de 1.5% a 30% después de tres días de curado en seco seguido por un curado en húmedo de 25 días.	
Little (1995)	Resistencia al corte	El valor de R en suelos con limo (curados y no curados). Las muestras fueron sujetas a capilaridad antes de ensayarlas.	Little (1995) midió el valor de R en 30 suelos de Estados Unidos (Texas, Arizona, California, Utha, Colorado y Idaho). Encontró mejoras substanciales al usar cal aun en muestras sin curado. Se lograron valores de R en exceso de 90% en todos los suelos ensayados.	
Little (1994)	Resistencia al corte (prueba triaxial)	AASHTO T-274	Little (1994) midió la deformación resiliente y permanente de tres suelos del área de Denver, Colorado. Los suelos tenían índice plástico mayor a 30 e igual a 23%. La estabilización con cal redujo la susceptibilidad al agua, mejoró la resistencia y propiedades resilientes y redujo la deformación permanente acumulada de 0.8% y 4.0% (suelos no tratados) a 0.2 y 0.4% (suelos tratados).	

Como podemos observar del resumen anterior, en varios estudios ha sido demostrada la efectividad de la cal como una forma de mejorar las propiedades de los suelos estudiados. En este documento se presenta el estudio de dos suelos estabilizados con óxido de calcio (cal viva).



## **2 Materiales y procedimientos de prueba**

---

### **2.1. Materiales en estudio**

Los materiales utilizados en el presente estudio fueron muestreados en Monterrey y Guadalajara (Figuras 2.1a y b).



(a) Suelo de Monterrey

(b) Suelo de Guadalajara

**Figura 2.1. Suelos en estudio**

### **2.2. Preparación de las muestras**

El material de Monterrey utilizado fue material cribado por la malla de una pulgada; el material de Guadalajara, por la malla No. 4.

Posterior al cribado, los materiales fueron secados al aire durante varios días y después, guardados en costales.

### **2.3. Determinación de las propiedades índice y de compactación de los suelos en estado natural**

Las normas ASTM para determinar las propiedades índice y de compactación fueron: ASTM D4318-10 (Límites de Atterberg), ASTM D854-10 (peso específico relativo de sólidos), ASTM D 1140-00 (porcentaje de suelo más fino que la malla No. 200), ASTM C136-06 (análisis granulométrico), ASTM D698 (Proctor estándar) y ASTM D1557 (Proctor modificada).

## **2.4. Determinación de la demanda de cal**

Para obtener los porcentajes de cal por agregar a los suelos, se llevaron a cabo las pruebas de pH de acuerdo con la norma ASTM D6276-99a (2006). Para el suelo de Monterrey, se obtuvo 5% de cal, y 4% para el suelo de Guadalajara.

## **2.5. Prueba de Valor de Soporte California (CBR)**

El CBR es una de las propiedades evaluadas en esta investigación; esta prueba consiste en compactar un suelo en un molde, posteriormente saturarlo y después aplicarle carga. A continuación, se detalla el procedimiento:

### **Muestras de suelo con estabilical (Figura 2.2)**

- ✓ A una muestra de 4 kg, se le adiciona el 5% de cal para el suelo de Monterrey, y 4% para el suelo de Guadalajara; y se mezcla completamente.
- ✓ Se adiciona el agua para alcanzar el contenido de agua óptimo.
- ✓ Fueron compactadas 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.

Para compactar los especímenes, se usó el pisón de 4.5 kg y cinco capas para el suelo de Monterrey, y el pisón de 2.5 kg; y tres capas para el suelo de Guadalajara.

- ✓ Los moldes con las muestras compactadas fueron expuestos al ambiente durante 7 días para que se secaran (esto solo si el aditivo en estudio lo requería).
- ✓ Después del tiempo de secado, las muestras fueron puestas a saturar durante 96 horas. Antes de que iniciara la saturación, se colocaron los micrómetros para medir la expansión libre del suelo.
- ✓ Después de los cuatro días de saturación, las muestras fueron colocadas en un marco de carga y se les aplicó carga a una velocidad de 1.27 mm/min.
- ✓ El valor de CBR fue determinado tras obtener los valores de carga soportados por el suelo para desplazamientos especificados en la norma ASTM D1883.



(a)

(b)

(c)

(d)

**Figura 2.2. (a) Compactación de muestra; (b) secado de muestras al ambiente (7 días) (si se requiere); (c) saturación durante 96 horas; y (d) aplicación de carga para determinar el CBR**

- ✓ Para el caso de las muestras de suelo natural, se siguió el mismo procedimiento; excepto que al suelo solo le adicionamos agua.

## 2.6. Resistencia en compresión simple, módulo de resiliencia y deformación permanente

### 2.6.1. Procedimiento de preparación de muestras

La resistencia a compresión no confinada es otro de los parámetros evaluados en esta investigación. Los procedimientos para preparación de especímenes fue el siguiente:

#### PARA EL SUELO DE MONTERREY:

- Se preparó la mezcla suelo-estabilizante-agua (Figura 2.3) y se permitió curado de la mezcla durante 24 horas.
- Para las muestras sin estabilizante, solo se adicionó el agua de compactación; tras mezclarla, se permitió tiempo de curado de 24 horas.



**Figura 2.3. Preparación de la mezcla suelo-5% de estabilizante y agua para alcanzar el contenido de agua óptimo**

- Después del mezclado, el material fue densificado con un compactador automático; se utilizó un molde de 15 cm de diámetro por 30 cm de altura (sin collarín). Las muestras fueron compactadas en 6 capas, aplicando 170 golpes por capa para el suelo natural, y 160 para el suelo con estabilizante (Figura 2.4a).
- Posterior a la compactación, se enrasó la superficie de la muestra, se pesó y se midió (Figura 2.4b, c, y d).



(a)

(b)

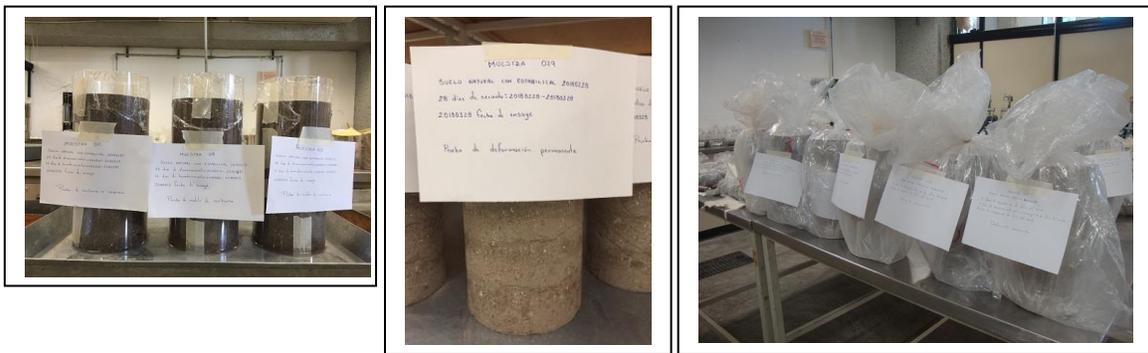
(c)

(d)

**Figura 2.4. (a) Compactación en equipo automático; (b) superficie de la muestra después de la compactación; (c) muestra enrasada; y (d) tomando las dimensiones del espécimen.**

- Después de la compactación de especímenes, estos fueron ensayados después de cumplida alguna de las siguientes condiciones (Figura 2.5):
  - después de compactar
  - después de 7 días de secado a temperatura controlada y 14 días de almacenamiento

- después de 14 días de secado a temperatura controlada y 14 días de almacenamiento
- después de 28 días de secado a temperatura controlada y 14 días de almacenamiento
- después de 7 días de almacenamiento a temperatura controlada
- después de 14 días de almacenamiento a temperatura controlada
- después de 28 días de almacenamiento a temperatura controlada
- después de almacenada durante 7 días, humedecida durante 14 días y almacenada durante 14 días
- después de almacenada durante 14 días, humedecida durante 14 días y almacenada durante 14 días
- después de almacenada durante 28 días, humedecida durante 14 días y almacenada durante 14 días



(a)

(b)

(c)

**Figura 2.5. (a) Humedecimiento de muestras por capilaridad; (b) secado de muestras en cuarto de temperatura controlada; y (c) almacenamiento de muestras después de humedecerse, secarse o compactarse.**

#### **PARA EL SUELO DE GUADALAJARA:**

- Se preparó la mezcla suelo-estabilizante-agua (Figura 2.6) y se permitió el curado de la mezcla durante 24 horas.
- Para las muestras sin estabilizante, solo le adicionó el agua de compactación, se mezcló y se permitió un tiempo de curado de 24 horas.



(a)

(b)

(c)

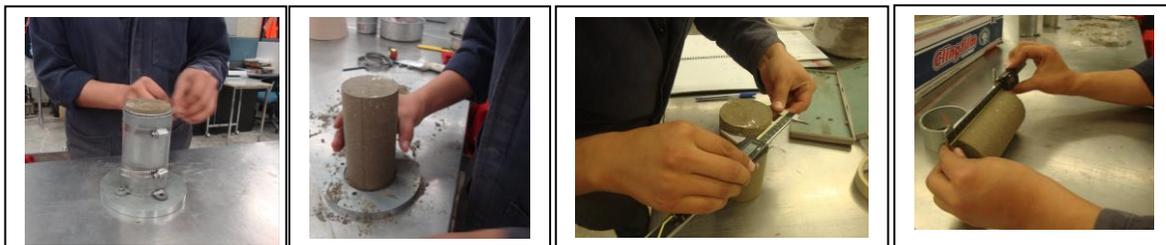
**Figura 2.6. Preparación de la mezcla suelo-4% de estabilizante y agua para alcanzar el contenido de agua óptimo**

- Después del mezclado y 24 horas de curado del material, las muestras fueron compactadas de forma manual. Para esto, se utilizó un molde de 7.1 cm de diámetro y 14.4 cm de altura (sin collarín). Las muestras fueron compactadas en 8 capas, con un pisón de 1 kg de masa. En cada capa se le aplicaron 14 golpes para suelo con y sin estabilizante.



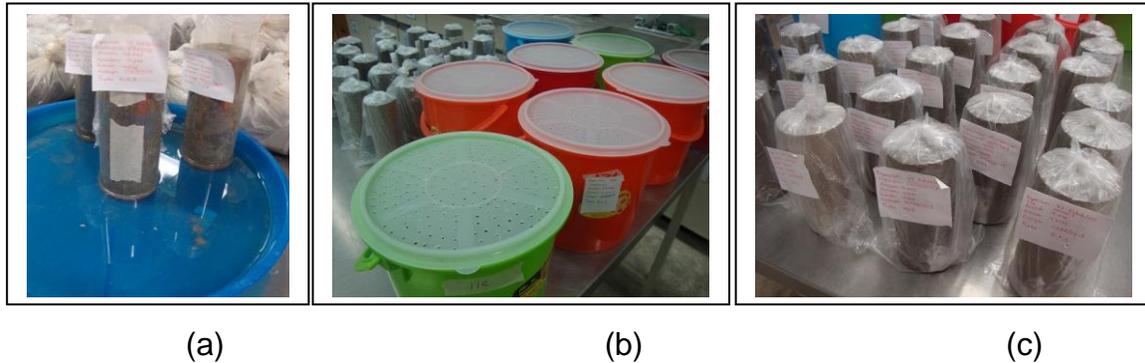
**Figura 2.7. Compactación de los especímenes en molde de 7.1 cm de diámetro por 14.4 cm de altura.**

- Posterior a la compactación; se enrasó la superficie del espécimen, se extrajo del molde y se le tomaron sus dimensiones y su peso (Figura 2.8).



**Figura 2.8. Enrase, toma de dimensiones y peso de la muestra.**

- Se llevaron a cabo los ensayos después de cumplidas las condiciones de almacenamiento, secado o humedecimiento (mismas condiciones mencionadas para el suelo de Monterrey) (Figura 2.9).



**Figura 2.9. (a) Humedecimiento de muestras por capilaridad; (b) secado de muestras en el interior de un contenedor, la tapa tiene orificios para que las muestras pierdan agua de forma lenta y no se agrieten; y (c) almacenamiento de muestras después de humedecerse, secarse o compactarse.**

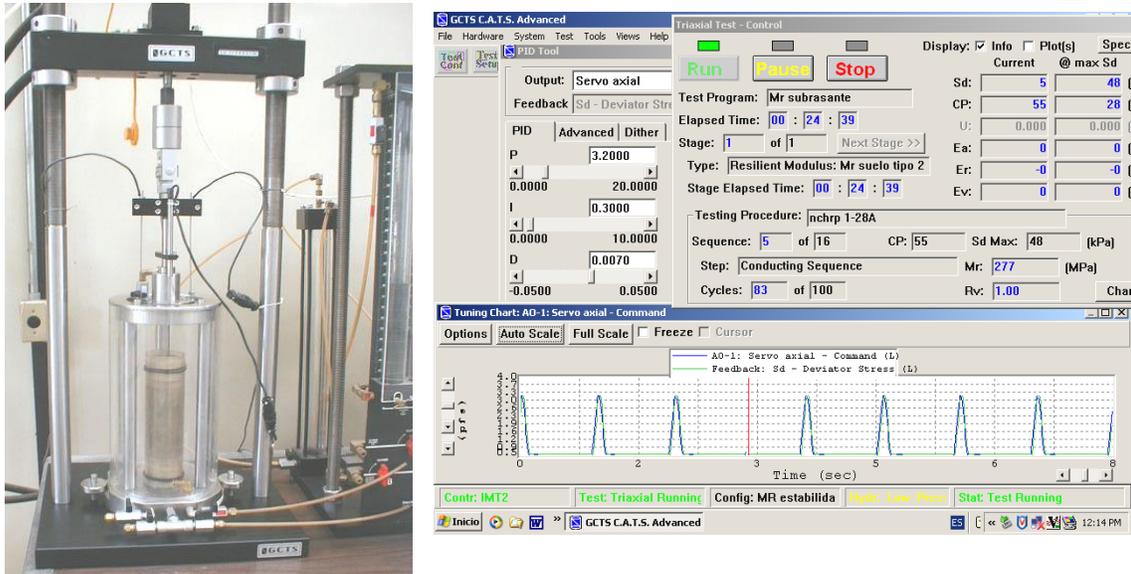
### **2.6.2. Procedimiento de resistencia en compresión simple**

La prueba de compresión simple consiste en colocar el espécimen en un equipo con marco de carga y aplicarle carga, hasta hacerlo fallar. Para el caso de las pruebas realizadas en esta investigación, se aplicó la carga a una velocidad de 1.2%/min; la prueba terminó cuando se observó la falla del espécimen.

### **2.6.3. Prueba de módulo de resiliencia**

El protocolo utilizado para obtener el módulo de resiliencia fue el NCHRP 1-28A. “Determinación del módulo de resiliencia para diseño de pavimentos flexibles”.

Para las pruebas llevadas a cabo en esta investigación, se utilizó el equipo triaxial cíclico que aparece en la Figura 2.10. En la prueba, al espécimen se le aplicaron diferentes cargas y presiones de confinamiento dependiendo del tipo de material ensayado. Las Tablas 2.1 y 2.2 muestran las secuencias de prueba para el material de base y subbase; la secuencia cero es la de acondicionamiento y no se registran datos. En las siguientes secuencias se aplican 100 ciclos de carga y se registran los datos de los últimos cinco ciclos de carga para obtener un módulo de resiliencia promedio. En cada ciclo, la carga fue aplicada durante 0.2 de segundo y después por un período de descarga de 0.8 de segundo, esto para el material de Guadalajara (caso de materiales de subbase); en el caso de materiales de base, la carga fue aplicada durante 0.1 de segundo y el tiempo de reposo es de 0.9 de segundo; esto último fue realizado al material de Monterrey.



(a)

(b)

**Figura 2.10. (a) Equipo triaxial para determinar el módulo de resiliencia y (b) vista de la aplicación de la carga cíclica en el espécimen**

**Tabla 2.1. Esfuerzos de confinamiento y desviadores aplicados en la prueba de módulo de resiliencia según el protocolo NCHRP 1-28A. Procedimiento para materiales de subrasante**

Secuencia No.	Confinamiento, $\sigma_3$ (kPa)	Esfuerzo cíclico (kPa)	No. de repeticiones
0	27.6	48.3	1000
1	55.2	27.6	100
2	41.4	27.6	100
3	27.6	27.6	100
4	13.8	27.6	100
5	55.2	48.3	100
6	41.4	48.3	100
7	27.6	48.3	100
8	13.8	48.3	100
9	55.2	69.0	100
10	41.4	69.0	100
11	27.6	69.0	100
12	13.8	69.0	100
13	55.2	96.6	100
14	41.4	96.6	100
15	27.6	96.6	100
16	13.8	96.6	100

**Tabla 2.2. Esfuerzos de confinamiento y desviadores aplicados en la prueba de módulo de resiliencia según el protocolo NCHRP 1-28A. Procedimiento la para materiales de base/subbase**

Sec. no.	$\sigma_3$ (kPa)	Esfuerzo cíclico (kPa)	No. de repeticiones	Sec. no.	$\sigma_3$ (kPa)	Esfuerzo cíclico (kPa)	No. de repeticiones
0	103.5	207.0	1000	21	20.7	103.5	100
1	20.7	10.4	100	22	41.4	207.0	100
2	41.4	20.7	100	23	69.0	345.0	100
3	69	34.5	100	24	103.5	517.5	100
4	103.5	51.8	100	25	138.0	690.0	100
5	138.0	69.0	100	26	20.7	144.9	100
6	20.7	20.7	100	27	41.4	289.8	100
7	41.4	41.4	100	28	69.0	483.0	100
8	69.0	69.0	100	29	103.5	724.5	100
9	103.5	103.5	100	30	138.0	966.0	100
10	138.0	138.0	100				
11	20.7	41.4	100				
12	41.4	82.8	100				
13	69.0	138.0	100				
14	103.5	207.0	100				
15	138.0	2760	100				
16	20.7	62.1	100				
17	41.4	124.2	100				
18	69.0	207.0	100				
19	103.5	310.5	100				
20	138.0	414.0	100				

#### 2.6.4. Deformación permanente

Para las pruebas de deformación permanente, no existe un procedimiento estándar. Por lo tanto, se decidió llevar a cabo las pruebas de deformación aplicando 20,000 ciclos de carga cíclica con un esfuerzo desviador de 97 kPa y 14 kPa de confinamiento, para el suelo de Guadalajara; y de 497 kPa de esfuerzo desviador y 14 kPa de presión de confinamiento, para el suelo de Monterrey.

#### 2.6.5. Permeabilidad

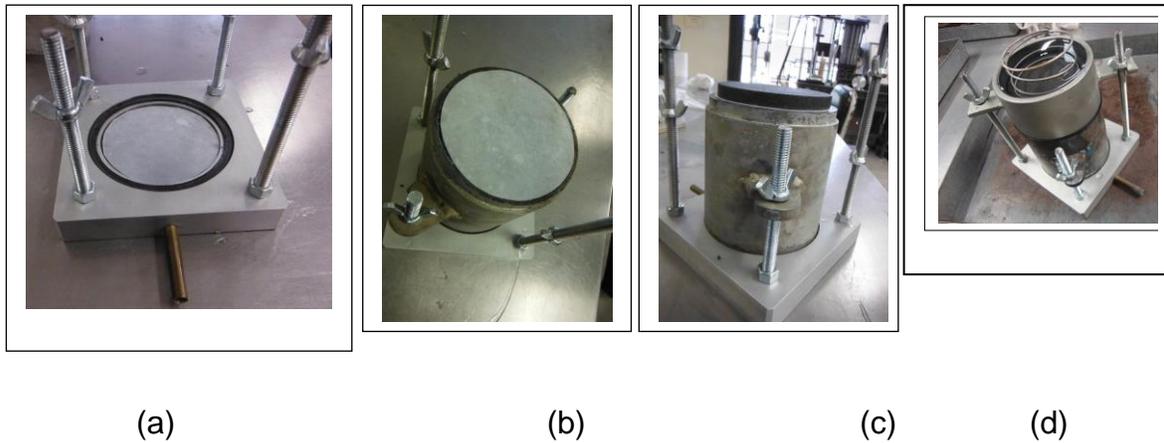
La conductividad hidráulica o coeficiente de permeabilidad ( $k$ ) es la velocidad con la que fluye el agua a través de un suelo bajo un gradiente hidráulico. Para determinar la conductividad hidráulica en el laboratorio, se puede utilizar un permeámetro de carga constante o carga variable; en esta investigación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

##### Compactación del espécimen y prueba de permeabilidad

- Se prepararon las mezclas de suelo natural y suelo con estabilizante, como aparece en incisos anteriores.
- Las muestras fueron compactadas en moldes de 101.6 mm de diámetro y 116.43 mm de altura, para el suelo de Guadalajara; y en un molde de 15 cm de diámetro, para el suelo de Monterrey. Las muestras fueron compactadas

en tres o cinco capas. Para la compactación, utilizamos el pisón de 2.5 kg de peso y 30.5 cm de altura de caída para el suelo de Guadalajara; y para el suelo de Monterrey, un pisón de 4.5 kg de masa y 45.7 cm de altura de caída.

- Una vez que las muestras cumplieron con el tiempo de curado, fueron colocadas sobre la base del permeámetro; la cual cuenta con un disco poroso que es el medio que permite el flujo de agua. Previo a la colocación de la muestra, se saturó el disco poroso y el papel filtro (Figura 2.11a).
- Sobre la superficie de las muestras, se colocó un papel filtro (Figura 2.11b) y sobre el papel filtro, otro disco poroso (Figura 2.11c). Posteriormente se colocó el collarín del molde y un resorte que presiona el disco durante la prueba, para que permanezca en contacto con la superficie de la muestra (Figura 2.1d).



**Figura 2.11. (a) Papel filtro sobre el disco poroso de la base; (b) papel filtro húmedo sobre la muestra; (c) disco poroso superior; y (d) molde con collarín.**

- Después se colocó agua en la superficie del disco poroso superior y se atornilló la placa superior del molde para cerrar el sistema.
- El sistema completo se colocó sobre un pedestal.
- La conexión de la placa superior del molde se conectó a una celda con agua (Figura 2.12).
- Se permitió que el agua fluya por gravedad (Figura 2.12).



**Figura 2.12. Sistema para medir la permeabilidad.**

- Después de haber permitido flujo de agua por gravedad, se aplicó presión al agua para que continuara el flujo. En esta fase se observó cómo van fluyendo las burbujas de aire, lo que indica que la muestra aún no está completamente saturada.
- Cuando se presentó flujo continuo de agua, se llevaron a cabo las mediciones. Es decir, se midió la cantidad de agua que fluye en un cierto periodo.
- Después de obtener los datos, la permeabilidad se calculó como:

$$k = \frac{Q \times L}{A \times h \times t}$$

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

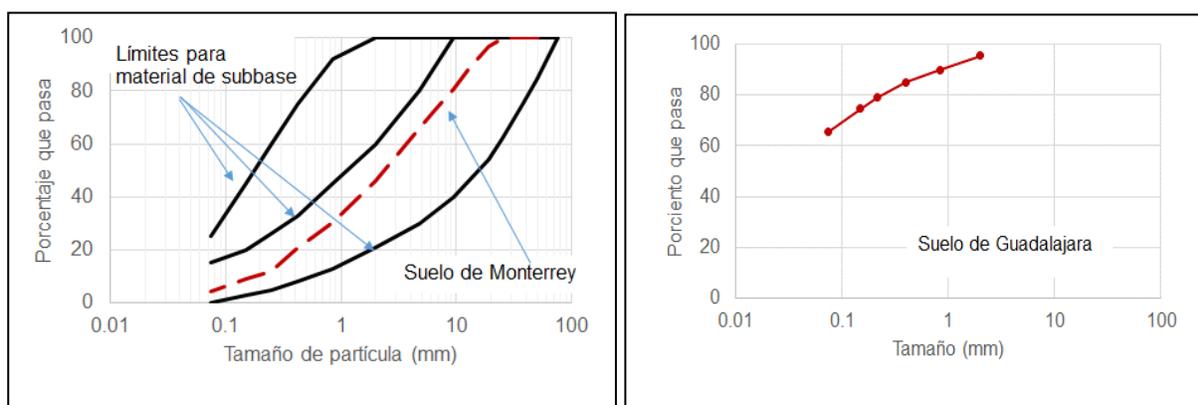
## 3 Resultados y discusión

### 3.1. Propiedades índice de materiales naturales

Las propiedades índice de los suelos naturales son resumidas en la Tabla 3.1. El suelo de Monterrey fue clasificado como una arena bien graduada, SW; y el suelo de Guadalajara, como un limo de alta compresibilidad, MH; esto de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.

**Tabla 3.1. Resumen de las propiedades del suelo en estudio**

Característica	Valor	Valor
	Suelo de Monterrey	Suelo de Guadalajara
Clasificación de acuerdo con el SUCS	SW	MH
Límite líquido (%)	34	64
Índice de plasticidad (%)	16	34
Gravedad específica	***	2.4
Pasa malla No. 200 (%)	4.31	63.7
Arena (%)	61.9	36.3

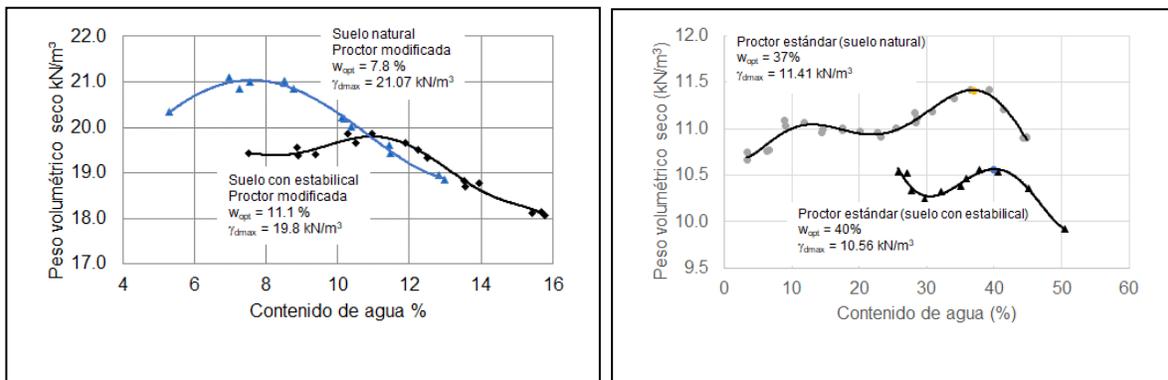


**Figura 3.1. Granulometrías de los suelos ensayados**

De acuerdo con las especificaciones de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, el material de Monterrey cumple con la granulometría para materiales de subbase, pero no con la plasticidad; ya que límite líquido e índice de plasticidad son mayores a los máximos permitidos por la norma N.CMT.4.02.001/11.

## 3.2. Características de compactación de los suelos naturales

Las características de compactación son de las propiedades más importantes por determinar en estudios como el que se presenta en este documento. La Figura 3.2 muestra las curvas de compactación Proctor estándar del suelo de Guadalajara, y la modificada para el suelo de Monterrey; con y sin estabilizante. De esta, se observa un contenido de agua óptimo de 11.1 y 7.8% (para el suelo de Monterrey con y con estabilizante) y pesos volumétricos secos máximos de 19.8 y 21.07 kN/m<sup>3</sup>. En el caso del suelo de Guadalajara, se obtuvieron contenidos de agua óptimos de 37 y 40%, mientras que los pesos volumétricos secos máximos fueron de 11.41 y 10.56 kN/m<sup>3</sup>.



(a) Suelo de Monterrey

(b) Suelo de Guadalajara

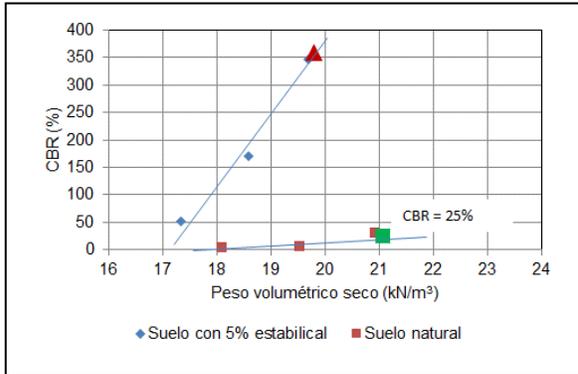
Figura 3.2. Curvas de compactación de los suelos con o sin estabilizante.

## 3.3. Valor de Soporte California (CBR)

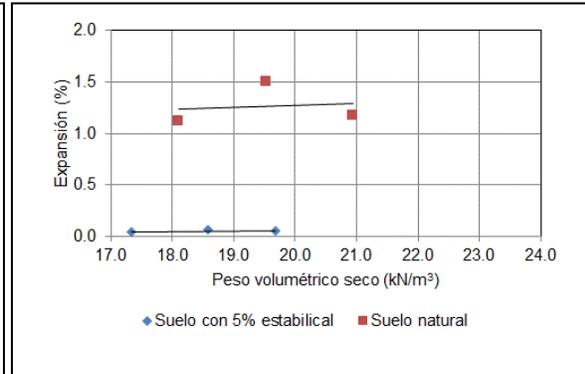
La Figura 3.3 muestra los resultados de las pruebas de CBR y expansión de ambos materiales. Para el suelo de Monterrey, se observa que el CBR tiene un valor de 350%, mientras que el suelo natural presenta un CBR de 25%; lo que indica que, al adicionar estabilizante, el CBR se incrementa 14 veces. Por el lado de la expansión, el suelo en condiciones naturales tiene un valor de expansión 1.2%; mientras que al adicionar 5% de estabilizante, la expansión se reduce a 0.05%.

En el caso del suelo de Guadalajara, el suelo natural tiene un CBR de 16%, mientras que, al adicionar estabilizante, el CBR se incrementa a 30%, aproximadamente el doble. La expansión también se reduce, de un valor de aproximadamente 1% a 0.17%.

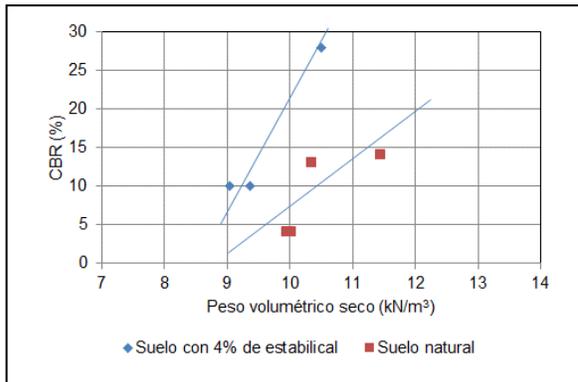
Por lo tanto, con respecto a CBR y expansión se ve de forma clara el beneficio de utilizar estabilizante para mejorar las propiedades de estos dos suelos.



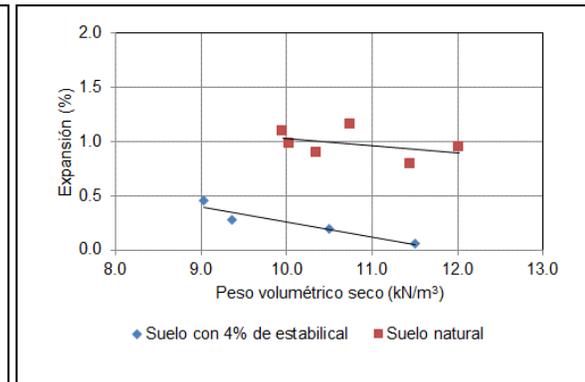
(a) CBR del suelo de Monterrey



(b) Expansión del suelo de Monterrey



(c) CBR del suelo de Guadalajara



(d) Expansión del suelo de Guadalajara

Figura 3.3. Datos de CBR y expansión libre para ambos suelos

## 3.4. Resistencia en compresión simple

### 3.4.1. Suelo de Monterrey

Las Figuras 3.4 a 3.9 muestran las curvas esfuerzo-deformación obtenidas para las diferentes condiciones de curado. Los resultados corresponden a suelo con y sin estabilizante.

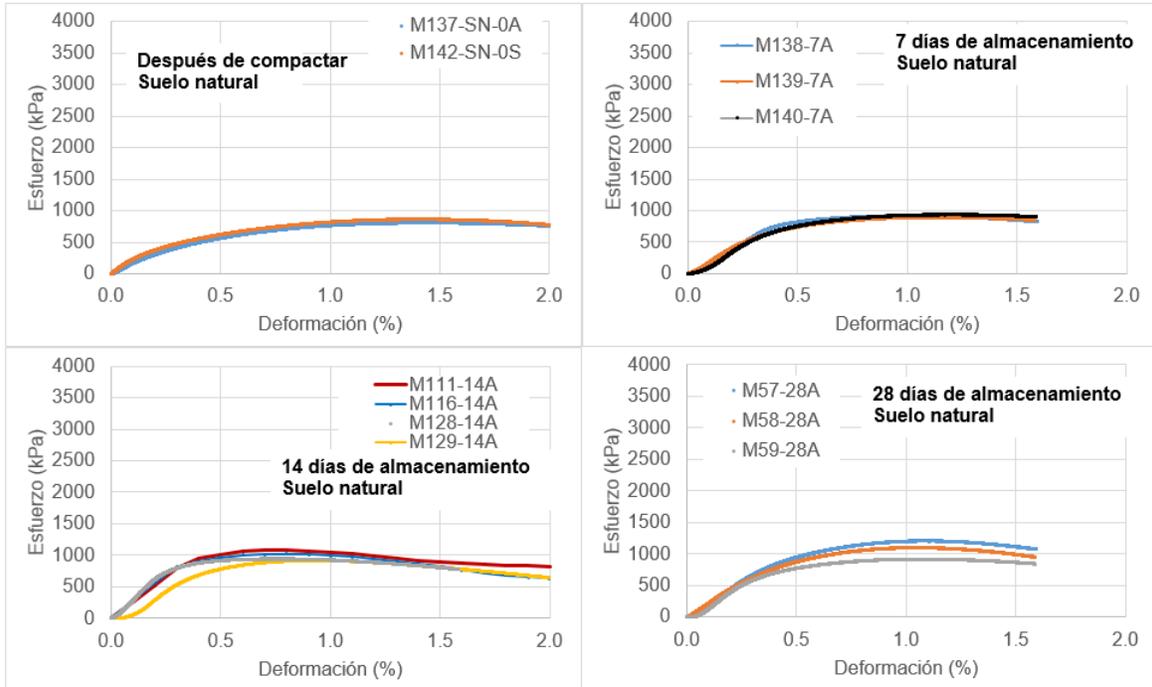


Figura 3.4. Curvas esfuerzo-deformación del suelo natural en diferentes tiempos de almacenamiento.

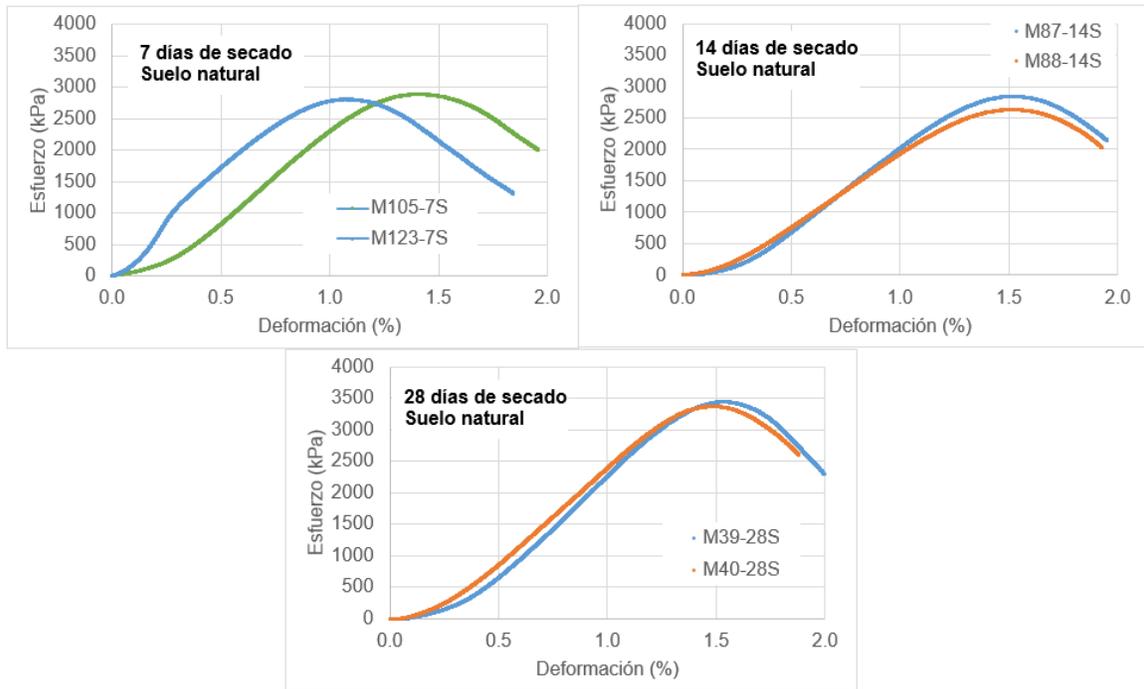


Figura 3.5. Curvas esfuerzo-deformación del suelo natural en tres tiempos de secado.

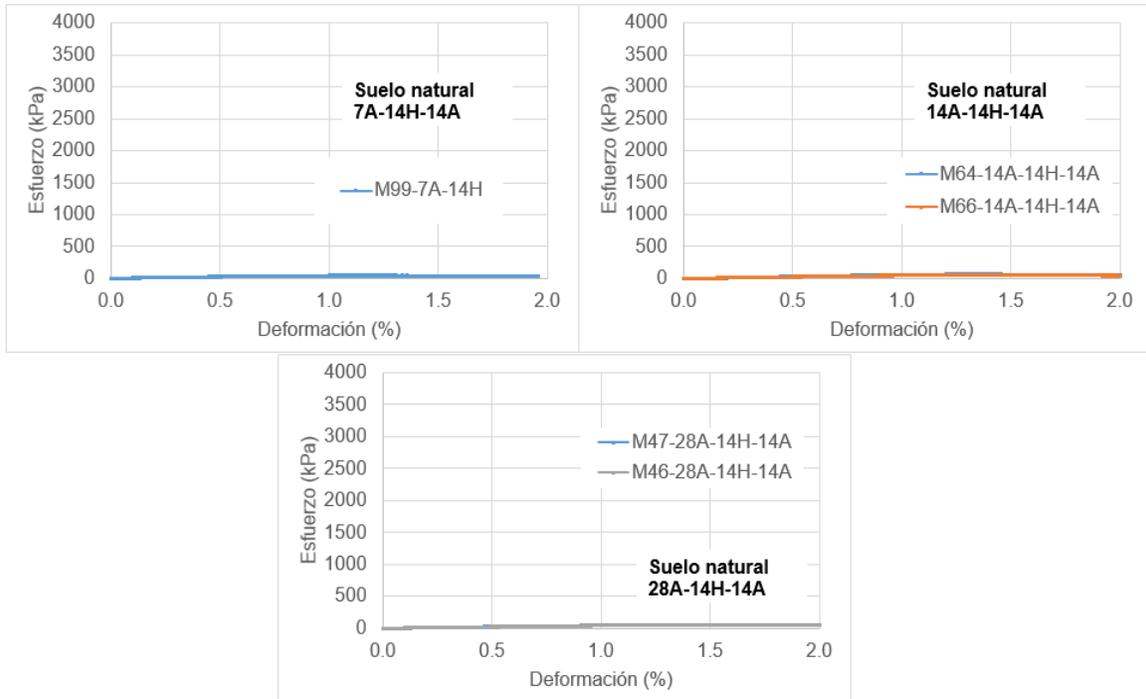


Figura 3.6. Resistencia en compresión simple de muestras que se almacenan y posteriormente se humedecen (suelo natural).

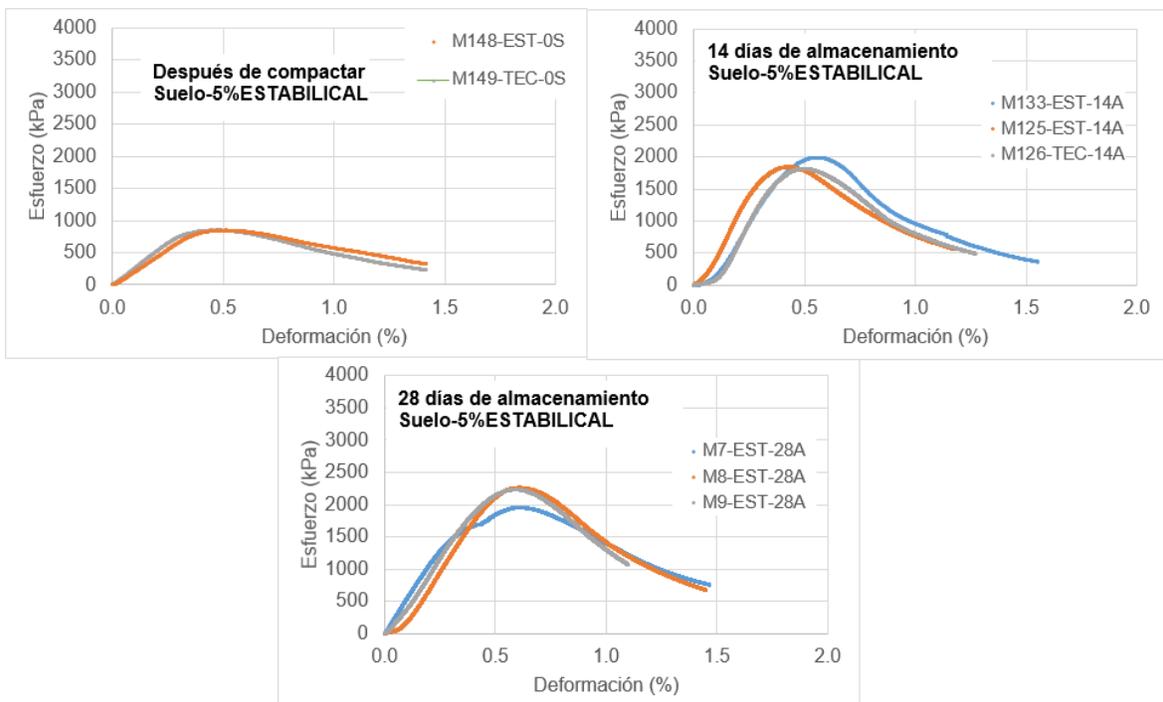


Figura 3.7. Curvas esfuerzo-deformación del suelo con estabilizal en tres tiempos de almacenamiento.

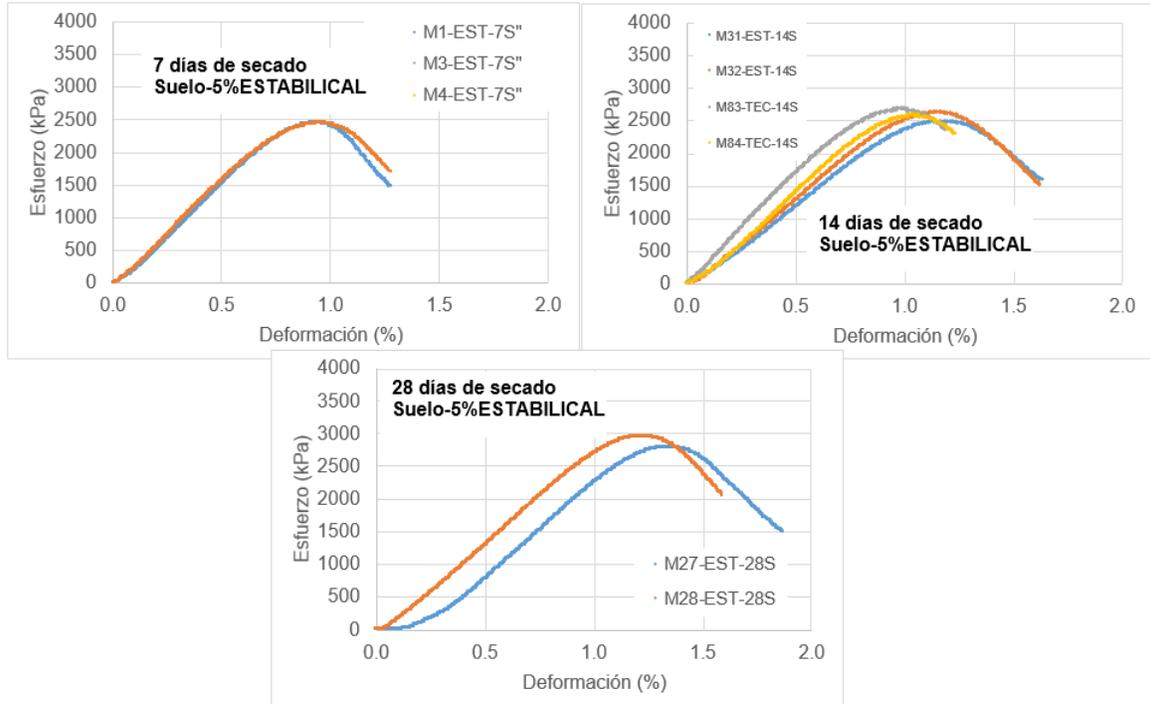


Figura 3.8. Curvas esfuerzo-deformación del suelo con estabilizal en tres tiempos de secado

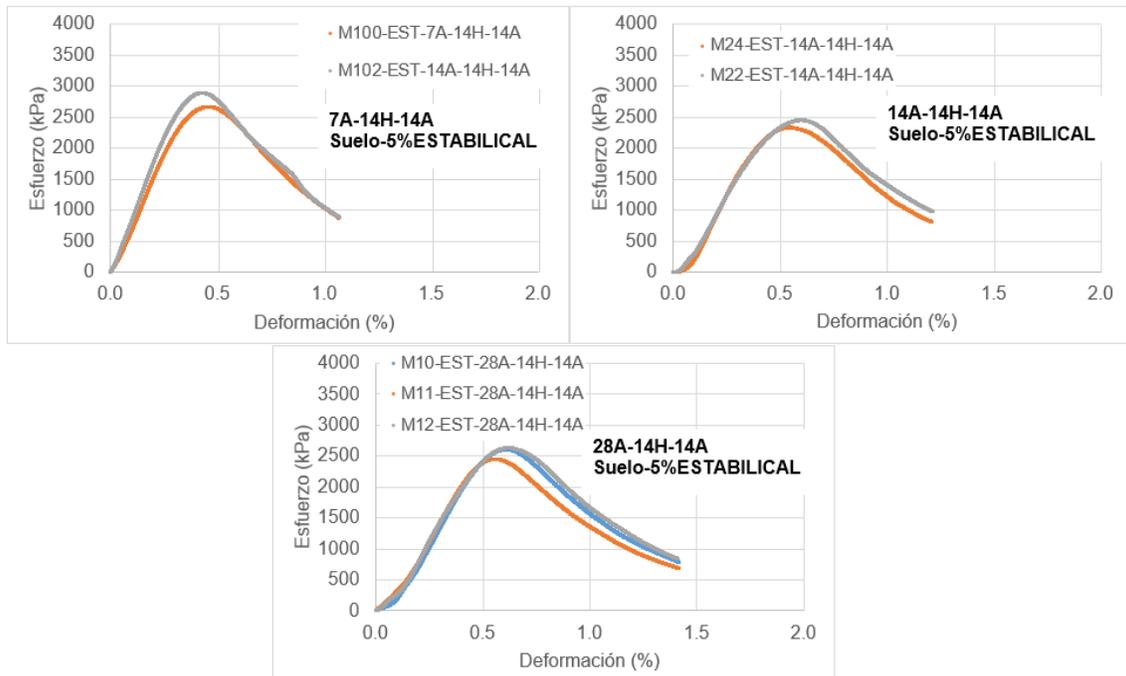


Figura 3.9. Resistencia en compresión simple de muestras que se almacenan y posteriormente se humedecen (suelo con estabilizal).

De los resultados anteriores, se observa lo siguiente:

- La resistencia en compresión simple del suelo natural para muestras ensayadas después de compactar, con 7, 14 o 28 días de almacenamiento, se mantiene en un valor aproximado de 1000 kPa (10.2 kg/cm<sup>2</sup>). Esto indica que el suelo natural no presenta un incremento de resistencia a medida que pasa el tiempo de curado.
- Si permitimos a los especímenes de suelo natural un secado durante 7, 14 o 28 días; la resistencia puede incrementarse tres veces aproximadamente.
- Si el suelo natural es expuesto a absorción de agua, la resistencia se degrada de forma importante.
- La resistencia en compresión simple del suelo-estabilical –después de compactar- es similar a la del suelo natural; sin embargo, la diferencia está en que el suelo natural presenta deformaciones muy altas antes de fallar completamente; mientras que el suelo-estabilical, a 0.5% de deformación presenta la falla; esto indica que el material ya en condiciones iniciales es más rígido que el suelo natural, aun cuando las resistencias son comparables.
- Cuando los especímenes de suelo-estabilical son almacenados durante 14 o 28 días, la resistencia se incrementa a aproximadamente 2000 kPa (20.4 kg/cm<sup>2</sup>); por lo tanto, comparado con las mismas condiciones del suelo natural, la resistencia del suelo-estabilical se duplica.
- Para especímenes suelo-estabilical secados durante 7, 14 y 28 días; la resistencia es aproximadamente 2500 kPa (25.5 kg/cm<sup>2</sup>). Al parecer, el secado del material permite que la resistencia se incremente con respecto a la observada en especímenes que solo son almacenados por los mismos tiempos.
- Cuando permitimos que el suelo-estabilical absorba agua, este no la absorbe tanta agua como lo hace el suelo natural. Esto trae como consecuencia que el suelo no pierda su resistencia y por lo tanto, mantiene unos valores similares a los medidos en especímenes secados durante tres períodos.

Lo comentado en los puntos anteriores aparece resumido en la Figura 3.10.

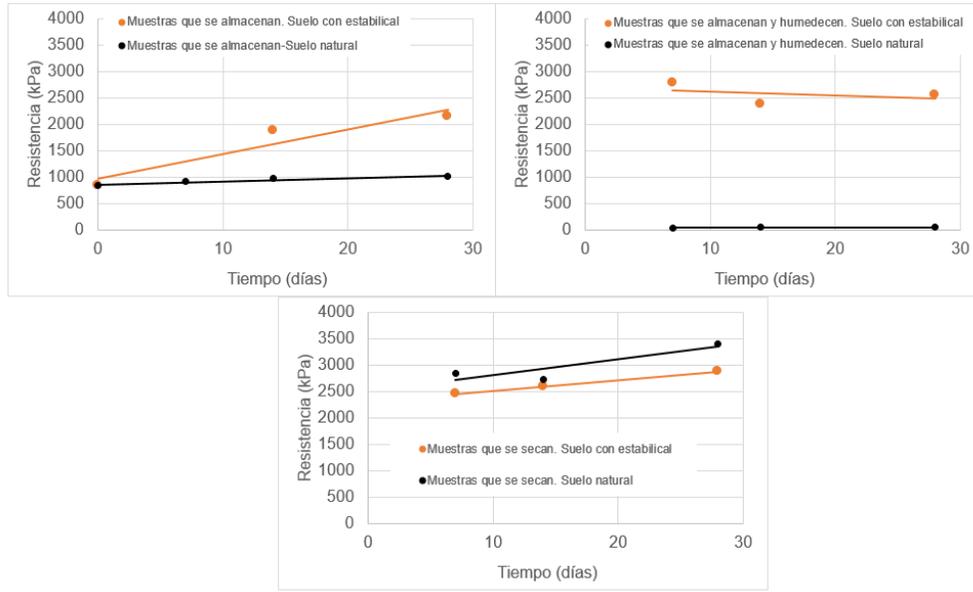


Figura 3.10. Resumen de los resultados de resistencia a compresión simple.

### 3.4.2. Suelo de Guadalajara

Las Figuras 3.11 a 3.16 muestran las curvas esfuerzo-deformación obtenidas para las diferentes condiciones de curado. Los resultados corresponden a suelo con 4% de estabilizal y suelo natural.

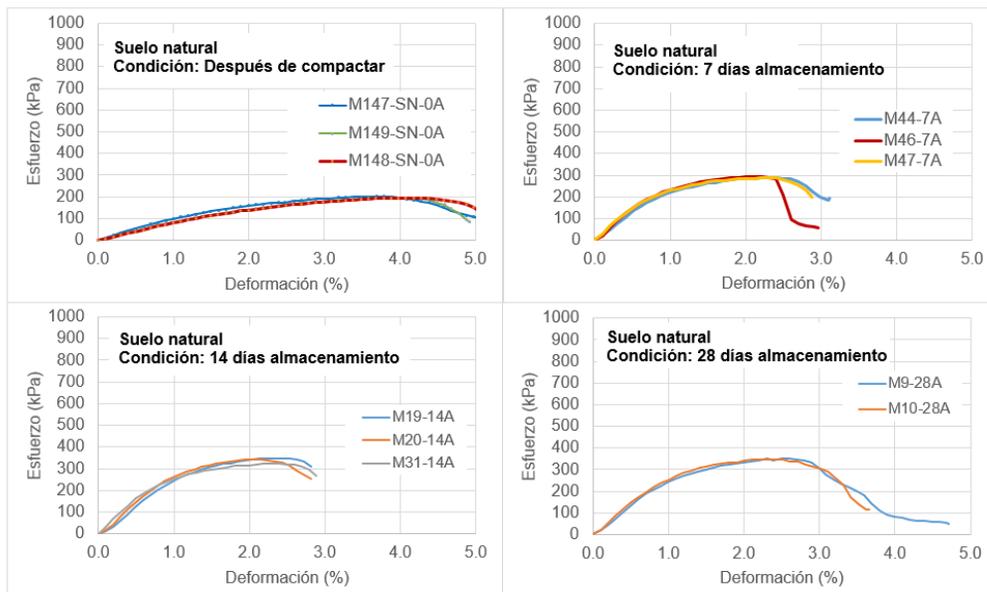
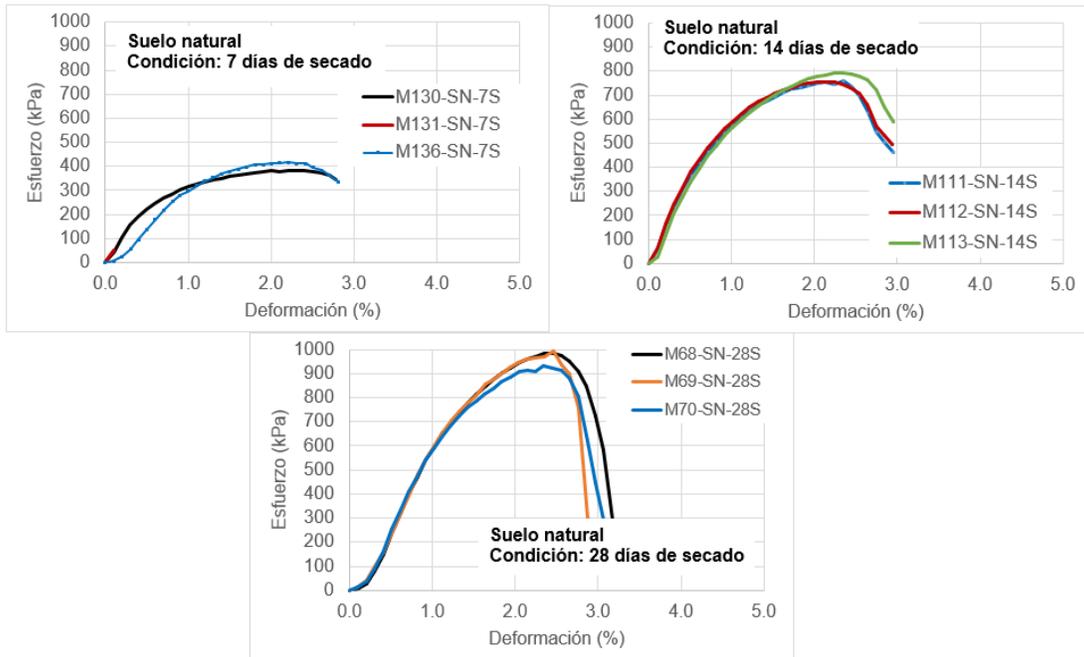
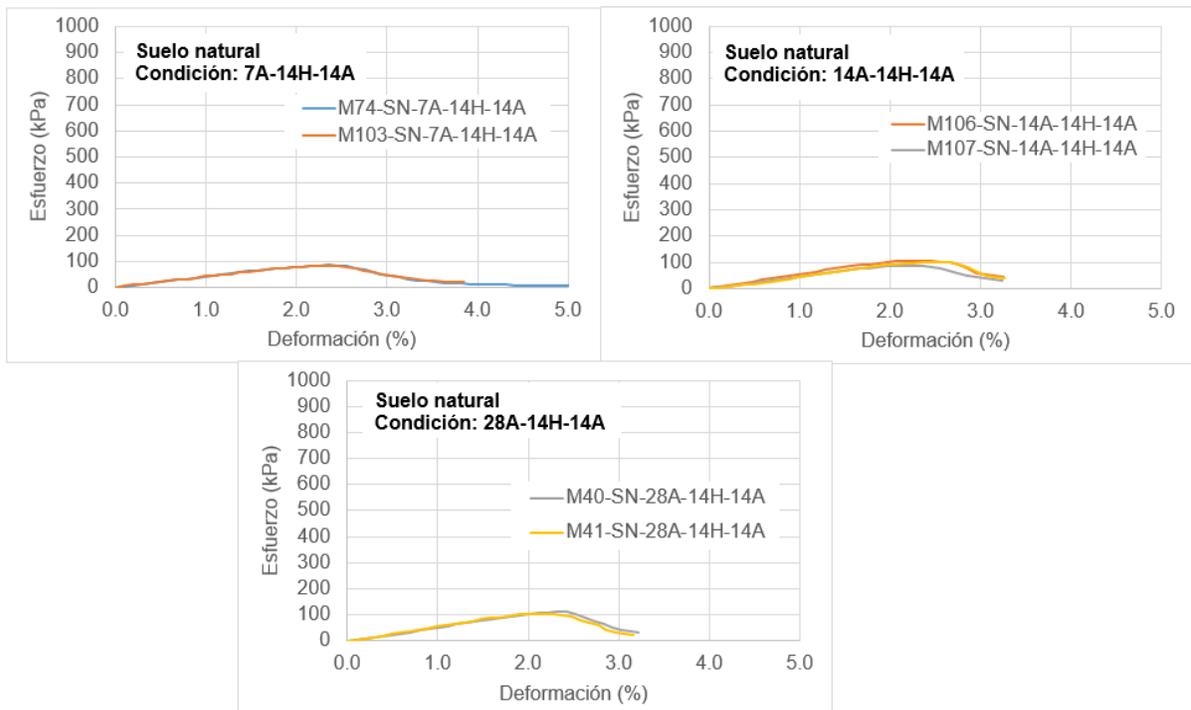


Figura 3.11. Curvas esfuerzo-deformación del suelo natural en tres tiempos de almacenamiento.



**Figura 3.12. Curvas esfuerzo-deformación del suelo natural en tres tiempos de secado**



**Figura 3.13. Resistencia en compresión simple de muestras que se almacenan y posteriormente se humedecen (suelo natural).**

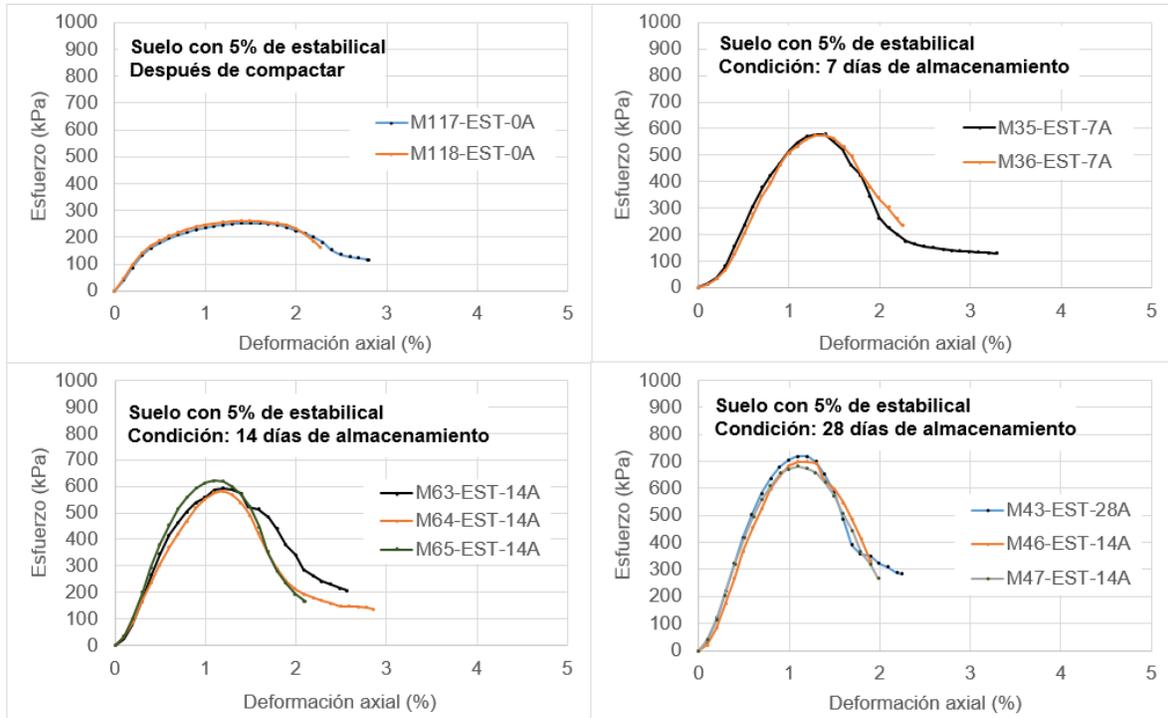


Figura 3.14. Curvas esfuerzo-deformación del suelo natural en tres tiempos de almacenamiento.

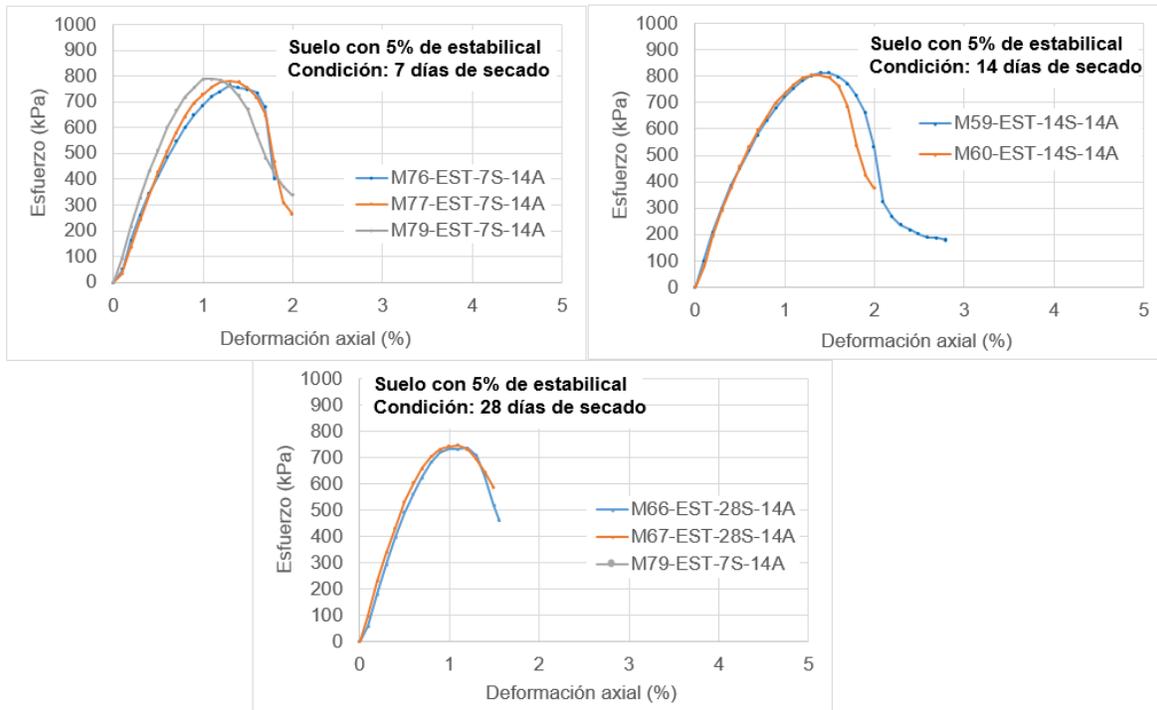
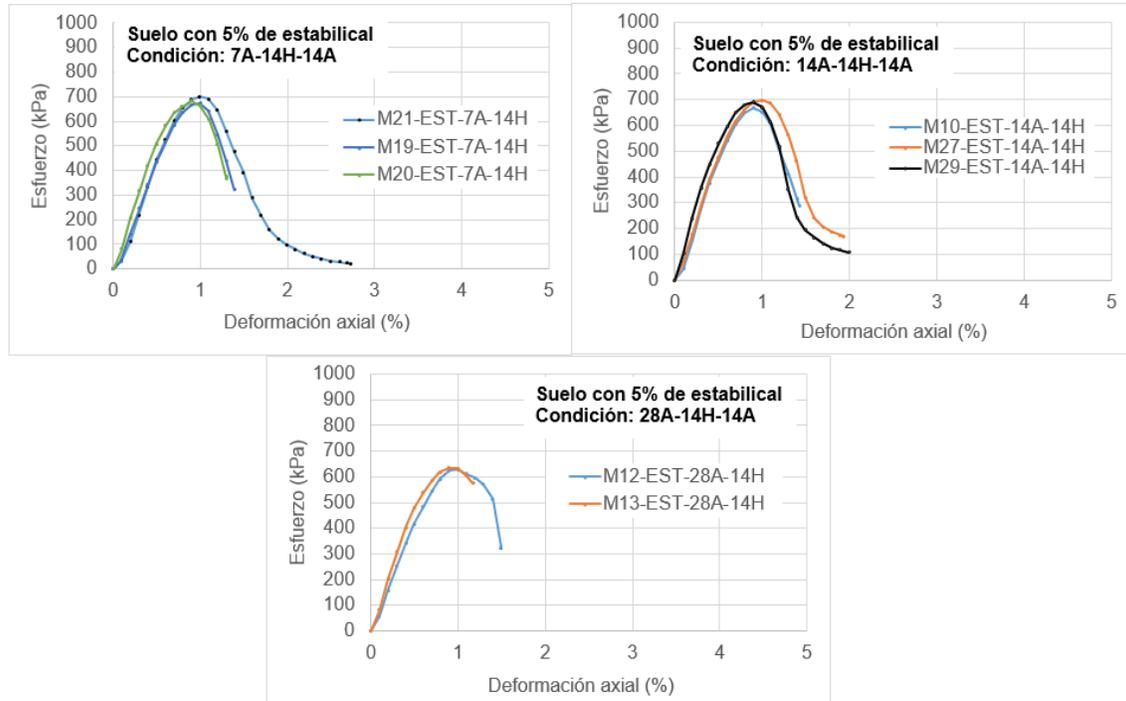


Figura 3.15. Curvas esfuerzo-deformación del suelo con estabilizante en tres tiempos de secado



**Figura 3.16. Resistencia en compresión simple de muestras que se almacenan y posteriormente se humedecen (suelo estabilizal).**

Los resultados de compresión simple del suelo de Guadalajara pueden quedar resumidos como lo muestra la Figura 3.17. En ella se observa que las muestras con y sin estabilizal incrementan su resistencia a compresión con el tiempo de almacenamiento. Es claro también que la velocidad de incremento de resistencia es mayor en el suelo con estabilizal.

Para muestras ensayadas inmediatamente después de compactar, ambas condiciones del suelo presentan resistencias similares; sin embargo, para tiempos de almacenamiento de 14 y 28 días, la resistencia se duplica para el caso del suelo que tiene estabilizal; como ya habíamos observado en el suelo de Monterrey.

La misma figura indica que cuando el suelo natural se seca, su resistencia se va incrementando linealmente; mientras que en el caso de muestras que tienen estabilizal, la resistencia es independiente del tiempo de secado; es decir, no importa el tiempo de secado, la resistencia es similar. Bajo esta condición parecería que es más favorable la condición de suelo natural; sin embargo, una vez que se permite a las muestras de suelo natural absorber agua, la resistencia se degrada a un valor aproximado de 100 kPa ( $1.01 \text{ kg/cm}^2$ ); mientras que en el suelo que tiene estabilizal, la resistencia solo se degrada un 25%.

También es importante mencionar que el suelo con estabilizal parece alcanzar resistencias similares con dos tipos de curado, ya sea que se almacene o se

seque; sin embargo, al no permitir secado al material hace que la resistencia requiera más tiempo para desarrollarse.

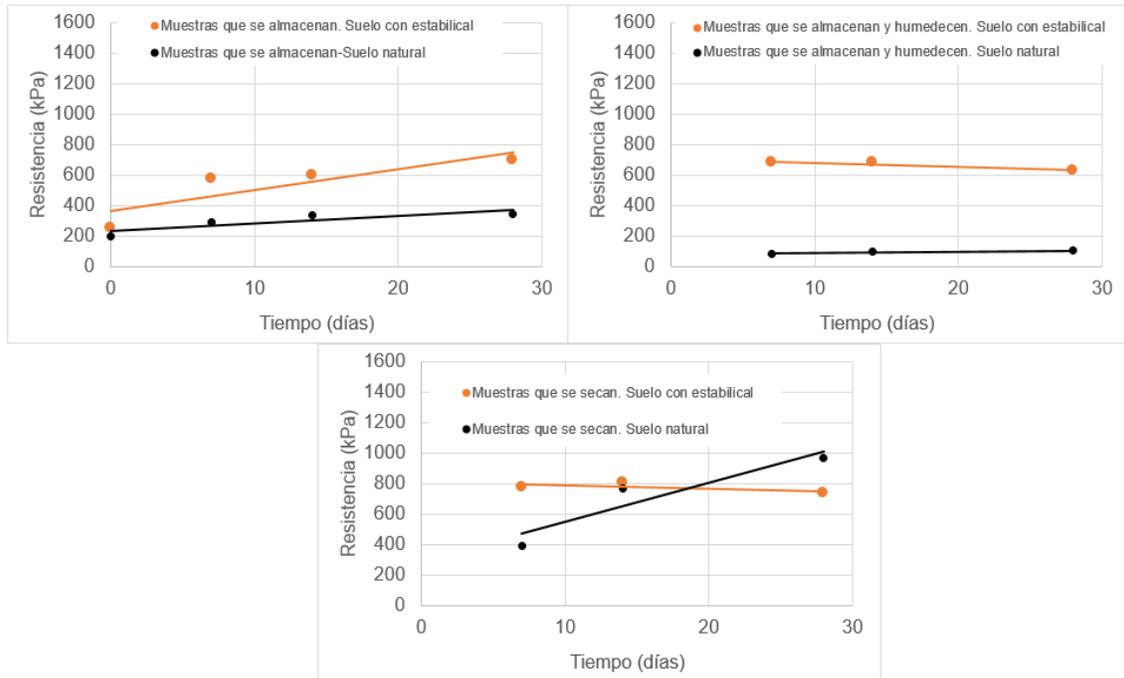
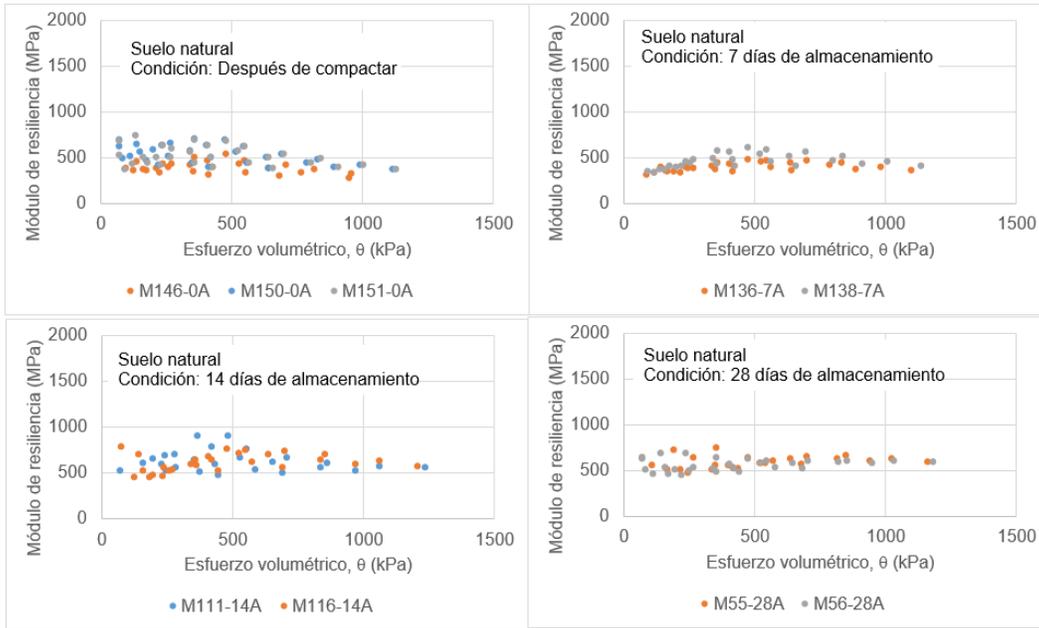


Figura 3.17. Resumen de los resultados de compresión simple para el suelo de Guadalajara.

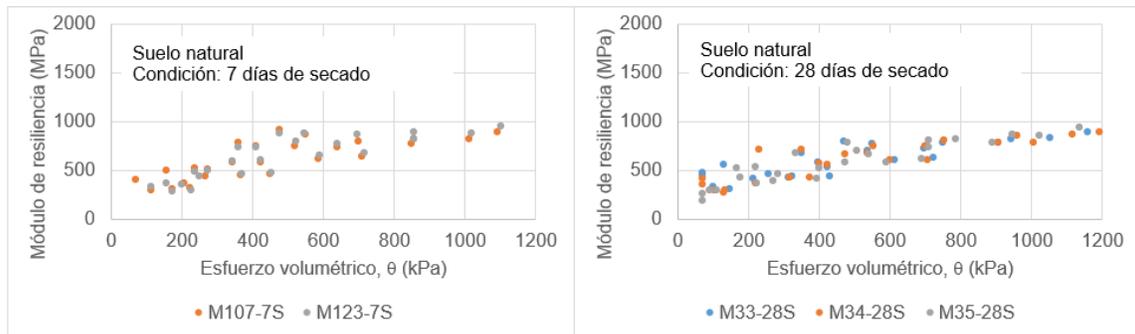
## 3.5. Módulo de resiliencia

### 3.5.1. Suelo de Monterrey

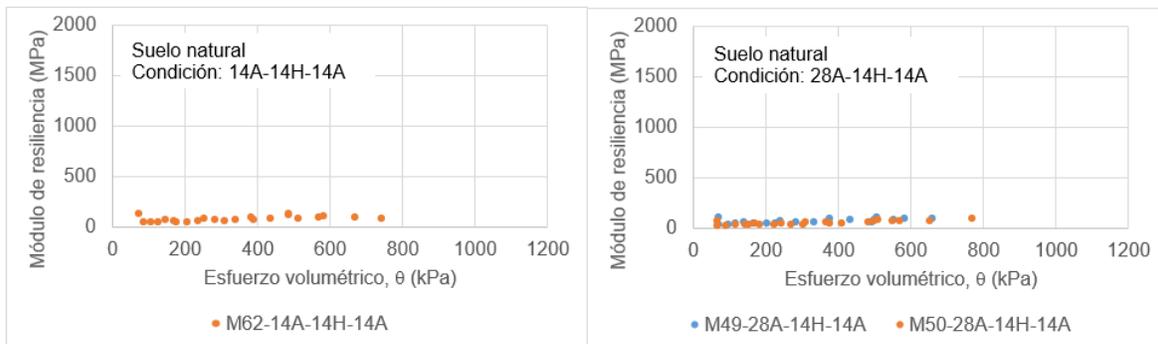
Las Figuras 3.18 a 3.23 muestran las gráficas de módulos de resiliencia del suelo natural y suelo con estabilizante, para las condiciones de curado ensayadas.



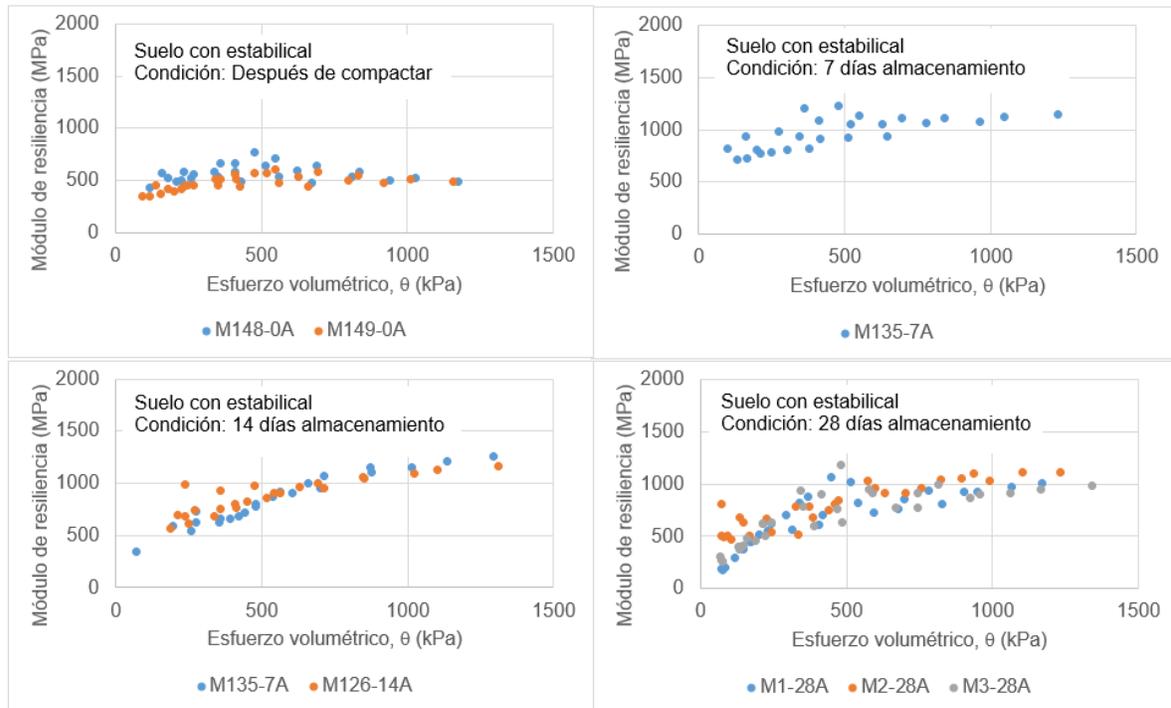
**Figura 3.18. Módulos de resiliencia del suelo en diferentes tiempos de almacenamiento.**



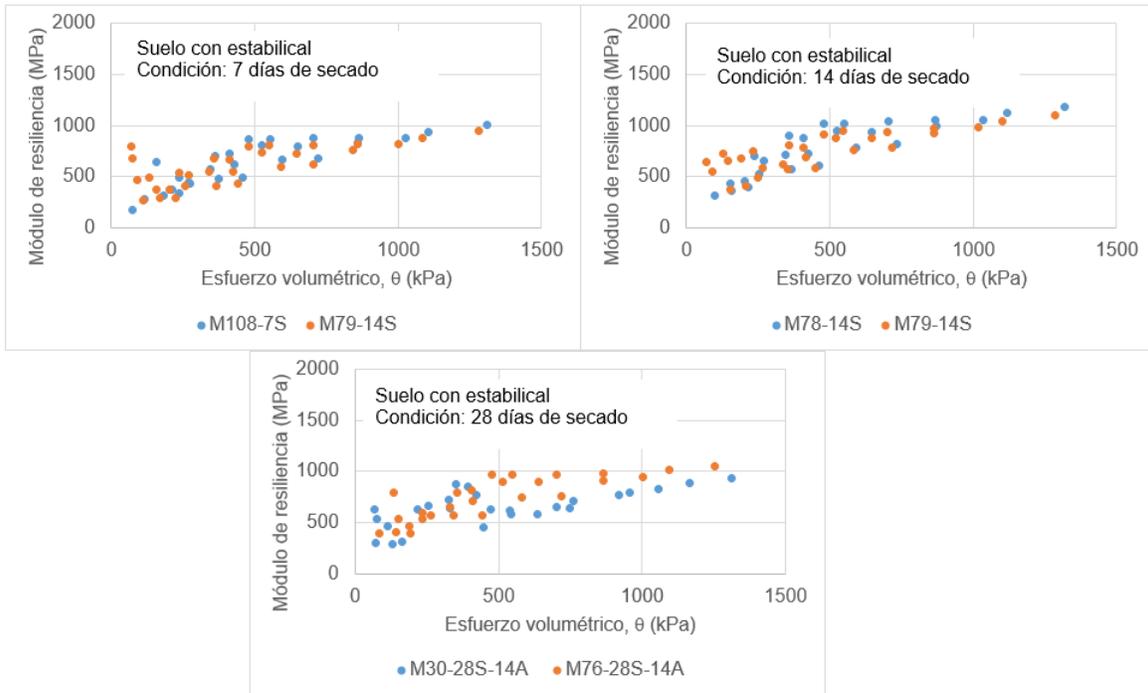
**Figura 3.19. Módulos de resiliencia del suelo en dos tiempos de secado.**



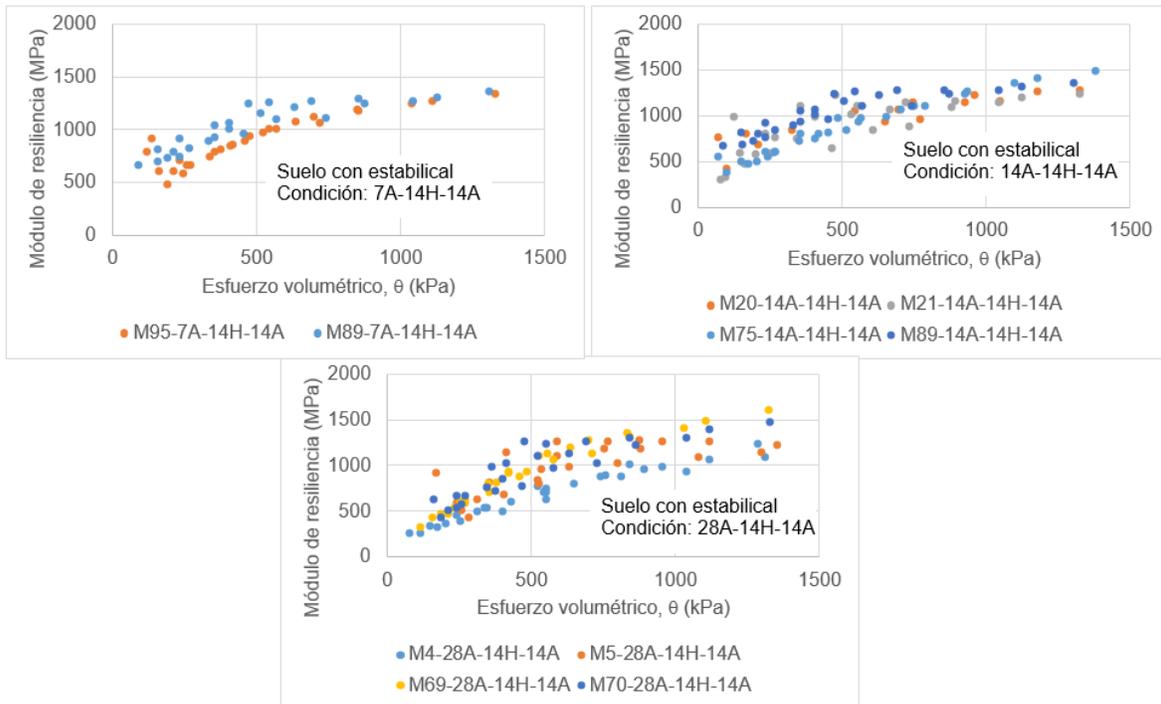
**Figura 3.20. Módulos de resiliencia del suelo en dos tiempos de almacenamiento y humedecimiento.**



**Figura 3.21. Módulos de resiliencia del suelo en diferentes tiempos de almacenamiento (suelo con estabilizante).**



**Figura 3.22. Módulos de resiliencia del suelo en tres tiempos de secado (suelo con estabilizante).**



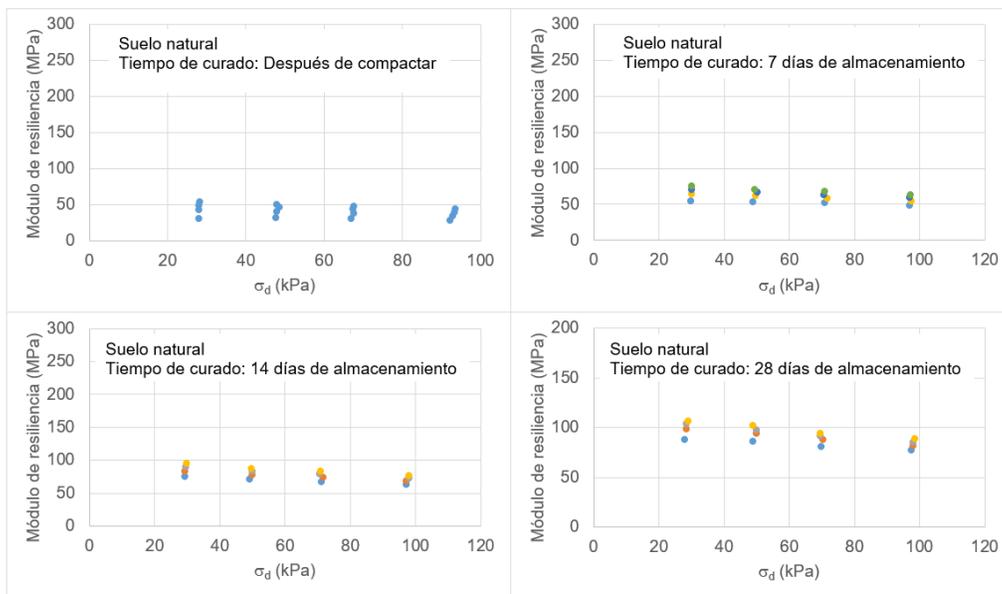
**Figura 3.23. Módulos de resiliencia de muestras que se almacenaron y posteriormente se humedecieron (suelo con estabilizante).**

De los resultados anteriores, observamos lo siguiente:

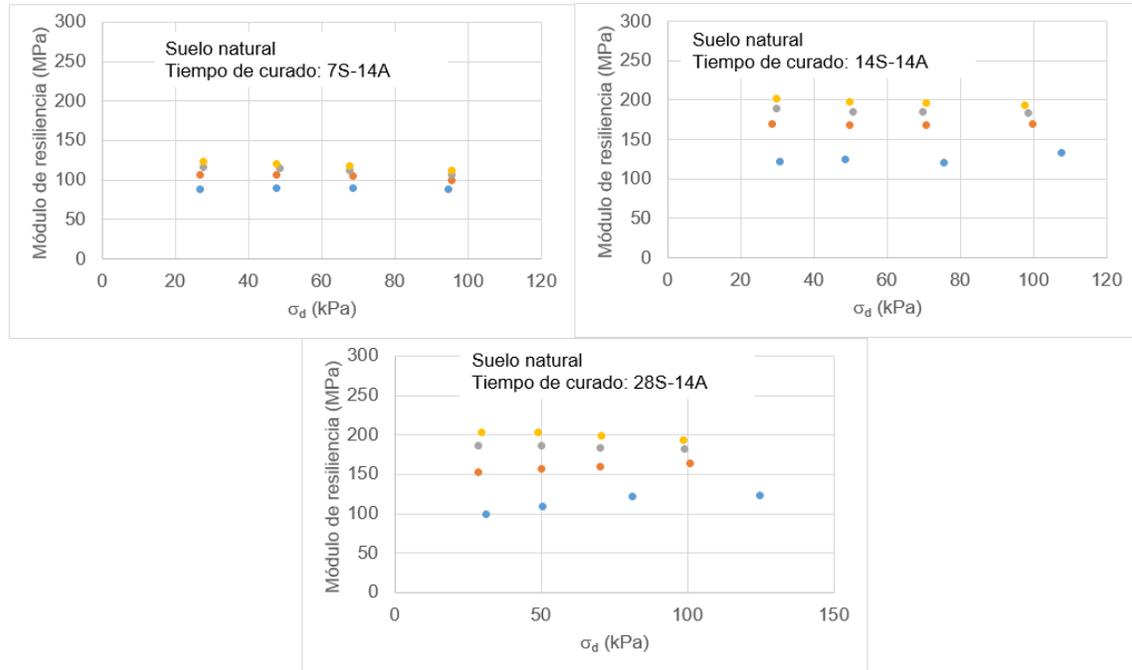
- El módulo de resiliencia del suelo natural para diferentes tiempos de almacenamiento se mantiene en un valor aproximado de 500 MPa.
- Las muestras de suelo natural a las que les permitió secado presentan módulo de resiliencia en un rango de 400 a 1000 MPa.
- Cuando a las muestras de suelo natural se les permite absorber agua, el módulo de resiliencia se degrada a valores inferiores de 100 MPa.
- El módulo de resiliencia del suelo que tiene estabilizante y es ensayado después de la compactación, es similar al del suelo natural.
- Las muestras de suelo con estabilizante almacenadas durante 7, 14 y 28 días presentan módulos que varían entre 400 y 1200 MPa.
- Los valores de módulo de resiliencia de muestras secadas durante 7, 14 o 28 días presentan una variación similar a la anterior (muestras con estabilizante).
- De suma importancia es observar que el módulo de resiliencia de muestras a las que se les permitió humedecimiento y que tienen estabilizante, no se degradó; al contrario, parece incrementarse ligeramente con respecto a los módulos observados en muestras que son secadas o almacenadas durante 7, 14 o 28 días.

### 3.5.2. Suelo de Guadalajara

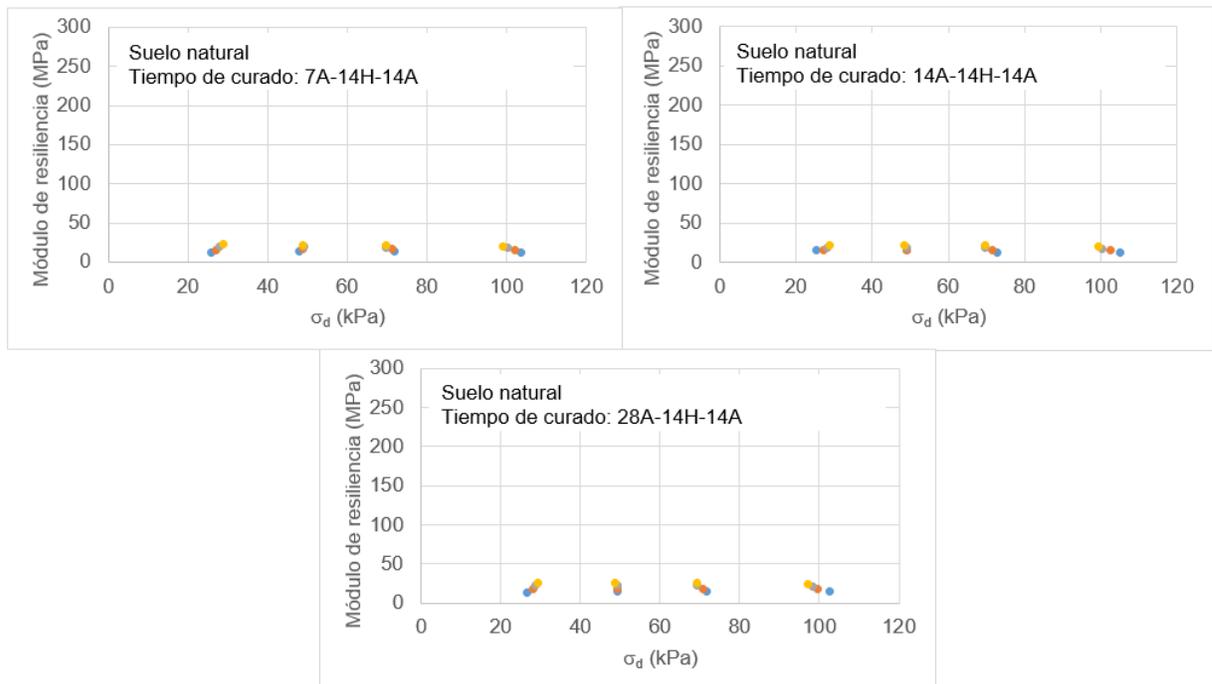
Las Figuras 3.24 a 3.29 muestran las gráficas de módulos de resiliencia del suelo natural y suelo con estabilizante, para las condiciones de curado ensayadas.



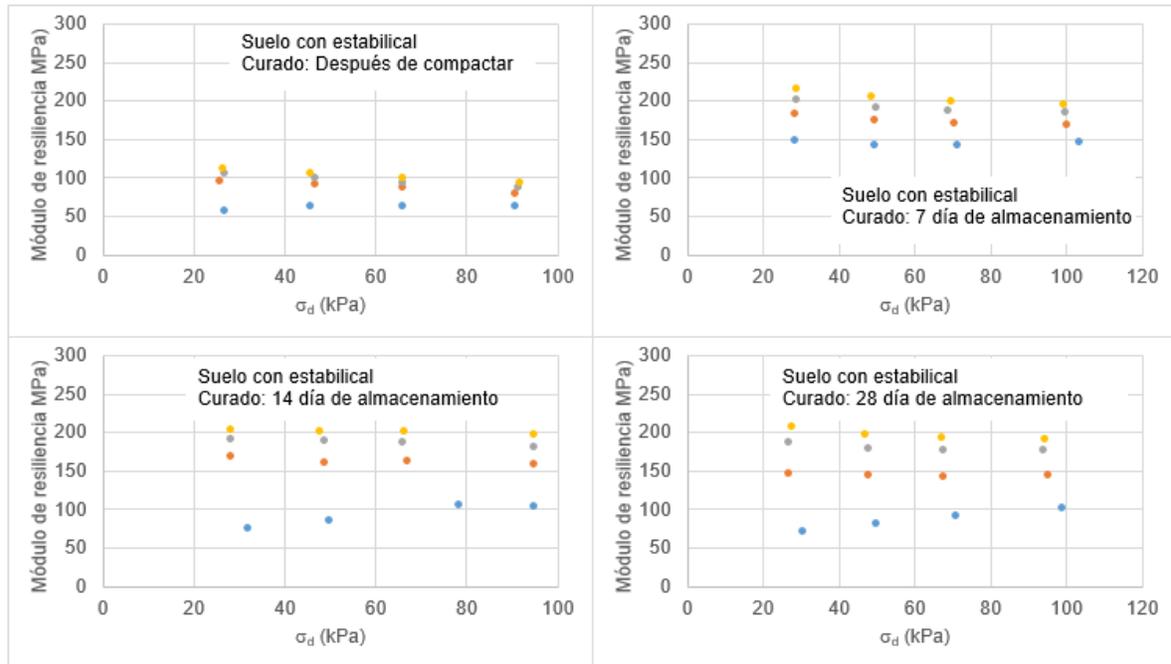
**Figura 3.24. Módulo de resiliencia del suelo natural en diferentes tiempos de almacenamiento.**



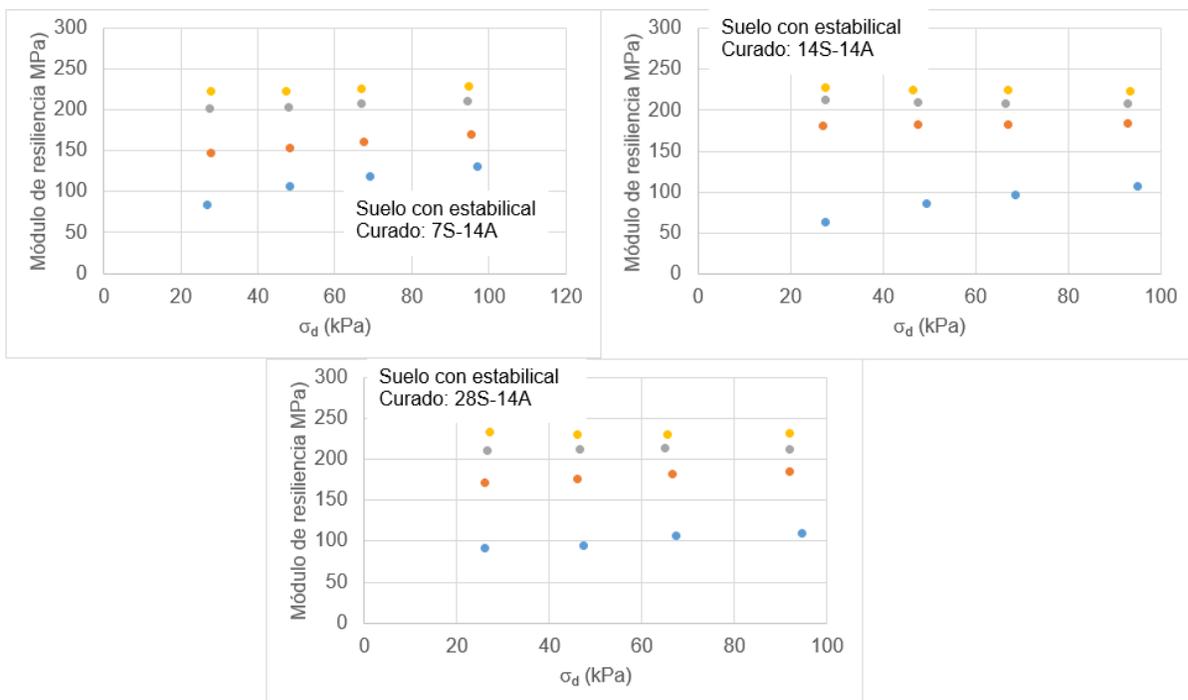
**Figura 3.25. Módulo de resiliencia del suelo natural en diferentes tiempos de secado.**



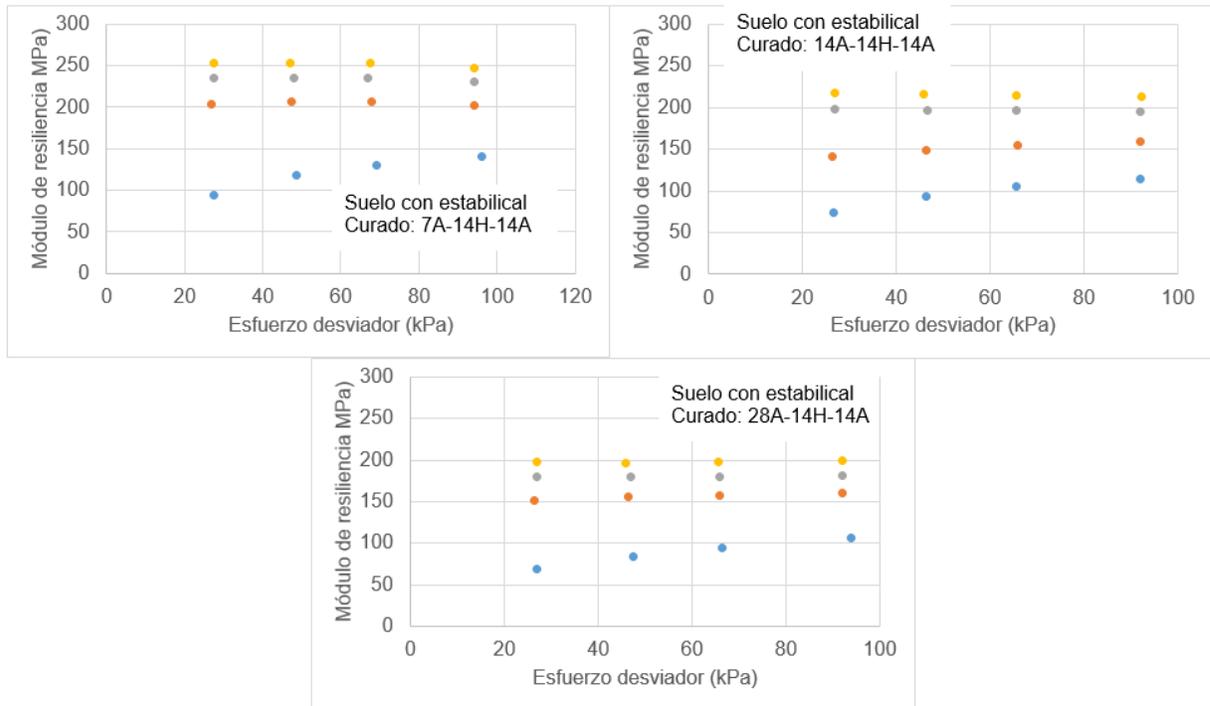
**Figura 3.26. Módulo de resiliencia del suelo natural con tiempo de almacenamiento y humedecimiento.**



**Figura 3.27. Módulo de resiliencia del suelo con estabilizante en diferentes tiempos de curado.**



**Figura 3.28. Módulo de resiliencia del suelo con estabilizante en diferentes tiempos de secado.**



**Figura 3.29. Módulo de resiliencia de muestras almacenadas y humedecidas.**

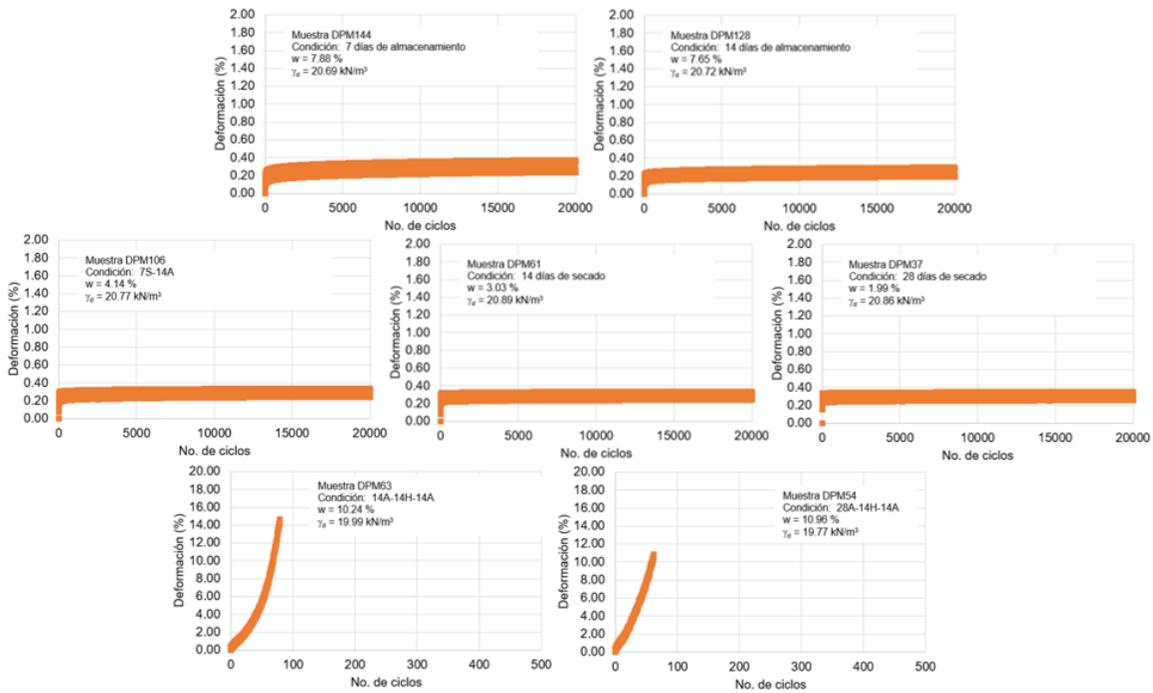
De los resultados de este suelo observamos lo siguiente:

- El módulo de resiliencia del suelo natural se incrementa con el tiempo de almacenamiento.
- El secado de las muestras hace que el módulo de resiliencia del suelo natural se incremente.
- Cuando el suelo natural absorbe agua, el módulo de resiliencia se degrada abruptamente.
- El módulo de resiliencia de muestras con estabilizal se incrementa con el tiempo de almacenamiento; pero a tiempos de 14 y 28 días, este parámetro se mantiene en valores similares. Al parecer hay un tiempo para el cual el módulo de resiliencia se estabiliza.
- Para muestras con tiempo de secado de 7, 14 o 28 días y estabilizadas con estabilizal, obtenemos valores de módulo de resiliencia similares. Esto concuerda con el punto anterior; después de cierto tiempo, ya sea de secado o almacenamiento, el módulo de resiliencia se estabiliza.
- Cuando el suelo tiene estabilizal, el módulo de resiliencia no se degrada; aunque tenga ganancia de agua.

## 3.6. Deformación permanente

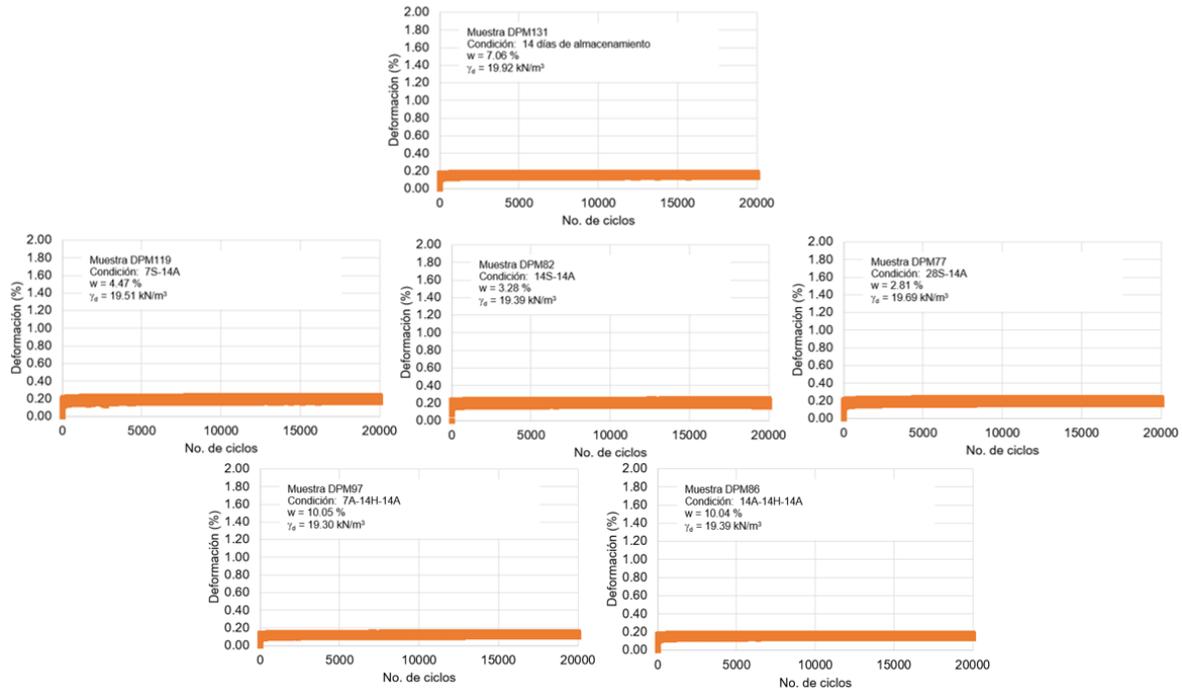
### 3.6.1. Suelo de Monterrey

La Figura 3.30 muestra una prueba de deformación por cada condición estudiada. De esta se observa que el suelo natural, tanto en condiciones de almacenamiento como en condiciones de secado, muestra una deformación de aproximadamente 0.2%. Cuando las muestras son almacenadas durante 14 o 28 días y posteriormente, humedecidas durante 14 días, las muestras se deforman inmediatamente; de hecho, soportan menos de 100 ciclos de carga y presentan una deformación total mayor a 10%.



**Figura 3.30. Resultados de las pruebas de deformación en el suelo natural.**

En el suelo con estabilizal, las gráficas de deformación para la muestra de 14 días de almacenamiento y para los tres tiempos de secado indican una deformación permanente ligeramente por debajo de 0.2%. La diferencia más importante del suelo con estabilizal aparece en muestras que se humedecen; ya que, en este caso, las deformaciones permanentes son muy pequeñas y las muestran soportan los 20000 ciclos de carga cíclica (Figura 3.31).



**Figura 3.31. Resultados de las pruebas de deformación del suelo con estabilizal.**

### 3.6.2. Suelo de Guadalajara

Las Figuras 3.32 y 3.33 muestran una prueba de deformación por cada condición estudiada. En el suelo natural observamos que, a mayor tiempo de almacenamiento, la deformación permanente se va reduciendo; en las muestras secadas observamos una deformación permanente de cerca de 0.1%. Pero en el caso de que las muestras tengan un incremento de agua, la deformación total se incrementa rápidamente; de tal manera que antes de 5000 ciclos, el suelo ya registra una deformación mayor a 10%.

El suelo con estabilizal presenta deformaciones permanentes muy pequeñas, tanto para muestras almacenadas como las que se secan. La deformación permanente de muestras humedecidas se mantiene en los mismos rangos, como si no absorbiera agua.

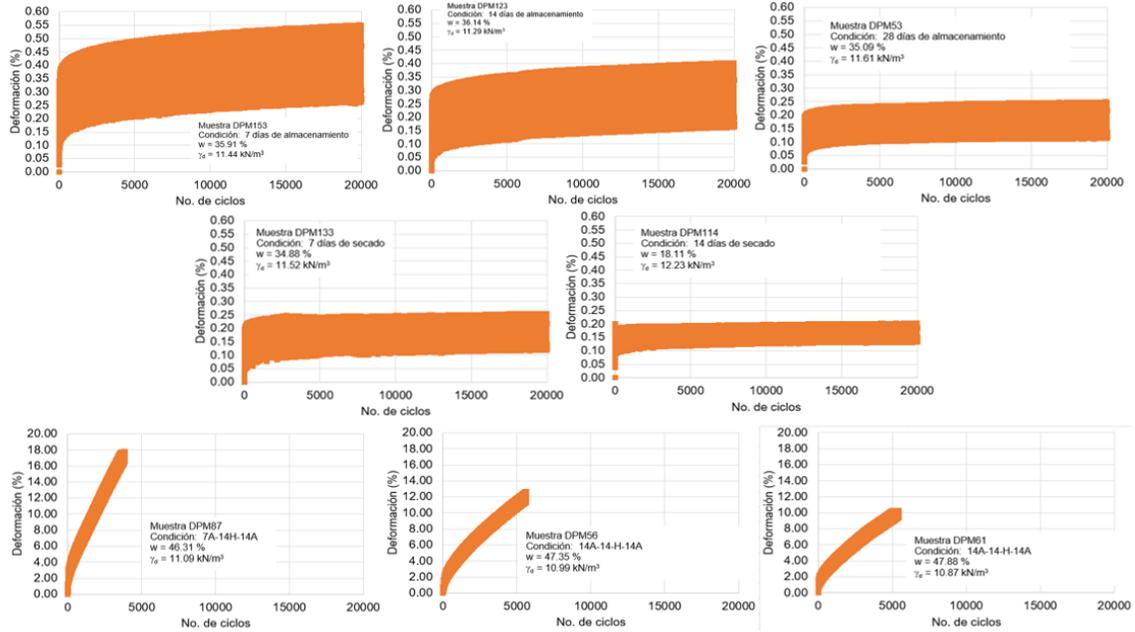


Figura 3.32. Resultados de las pruebas de deformación del suelo natural.

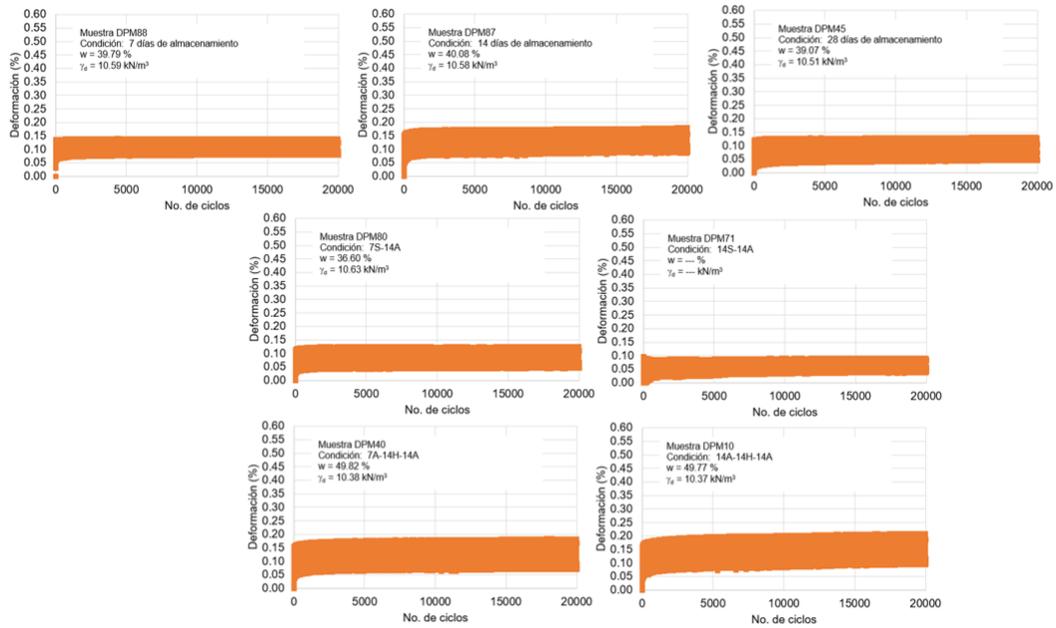


Figura 3.33. Resultados de las pruebas de deformación del suelo con estabilizal.

### 3.7. Permeabilidad

Las mediciones realizadas tanto para el suelo de Guadalajara como para el suelo de Monterrey son las indicadas en la Tabla 3.2. Los resultados corresponden a la permeabilidad en muestras compactadas y ensayadas inmediatamente (con y sin estabilical).

**Tabla 3.2. Valores de permeabilidad obtenidos en las pruebas**

Muestra	Tiempo de secado, días	$w_o$ (%)	$\gamma_{do}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$w_f$ (%)	k (cm/s)	k (m/s)
Suelo natural de Guadalajara	0	36.68	10.29	48.03	$5.0 \times 10^{-6}$	$5.0 \times 10^{-8}$
Suelo de Guadalajara con estabilical	0	40.28	10.76	46.09	$1.6 \times 10^{-6}$	$1.6 \times 10^{-8}$
Suelo natural de Monterrey	0	8.29	20.86	9.96	$3.7 \times 10^{-6}$	$3.7 \times 10^{-8}$
Suelo de Monterrey con estabilical	0	11.02	19.41	11.76	$1.5 \times 10^{-7}$	$1.5 \times 10^{-9}$

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

Head (1994), en el volumen 2 de su manual de pruebas de laboratorio, muestra los valores de la Tabla 3.3 para calificar el coeficiente de permeabilidad. De acuerdo con esto, el suelo de Guadalajara con y sin estabilical se clasifica como suelo de baja permeabilidad; en el suelo de Monterrey con y sin estabilical, la permeabilidad también puede ser clasificada como muy baja.

**Tabla 3.3. Clasificación de los suelos de acuerdo con la permeabilidad**

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 $10^{-9}$



## 4 Conclusiones

---

Las conclusiones derivadas de este trabajo de investigación son las siguientes:

- Se obtuvo 5% y 4% de estabilizante para estabilizar los suelos de Monterrey y de Guadalajara, respectivamente.
- El CBR del suelo de Monterrey se incrementa 14 veces cuando se adiciona 5% de estabilizante (de 25% para el suelo natural a 350% para el suelo estabilizado con estabilizante). La expansión se reduce a aproximadamente cero cuando se le agrega estabilizante.
- El CBR del suelo de Guadalajara se incrementa aproximadamente al doble cuando se adiciona 4% de estabilizante (de 16% para el suelo natural a 30% para el suelo estabilizado con estabilizante). La expansión se reduce aproximadamente 10 veces, de 1.6% a 0.17%.

### **Resistencia en compresión simple para el suelo de Monterrey:**

- La resistencia en compresión simple de especímenes de suelo natural y suelo-estabilizante ensayados inmediatamente después de la compactación, es similar; sin embargo, se observa una mayor rigidez en el suelo-estabilizante, ya que la falla se presenta a menor deformación axial.
- Para especímenes que solo son almacenados, la resistencia del suelo-estabilizante es aproximadamente el doble del que presenta el suelo natural.
- La resistencia de suelo-estabilizante obtenida en especímenes secados durante 7, 14 y 28 días, al parecer es ligeramente inferior al que muestra el suelo natural.
- Cuando el suelo natural es expuesto a absorción de agua pierde la mayor parte de su resistencia; el suelo-estabilizante no absorbe mucha agua, por lo que la resistencia se mantiene.

### **Resistencia en compresión simple para el suelo de Guadalajara:**

- La resistencia de muestras de suelo natural se incrementa a medida que aumenta el tiempo de almacenamiento.
- La resistencia del suelo con y sin estabilizante muestra que esta es similar para muestras ensayadas después de la compactación.
- Para muestras con tiempo de almacenamiento de 7 y 28 días, la resistencia del suelo con estabilizante es aproximadamente el doble de la que tiene el suelo natural.

- El tiempo de secado parece no ser una variable que modifique la resistencia del suelo con estabilical, ya que a 7, 14 y 28 días de secado parecen obtenerse resistencias en compresión similares. Sin embargo, en el suelo natural, el tiempo de secado hace que la resistencia se incremente de forma lineal.
- Para 28 días de secado, el suelo natural tiene una resistencia mayor que la del suelo con estabilical.
- Cuando se permite absorción de agua en las muestras de suelo natural, la resistencia se degrada en un 50% (después de la compactación tenía 200 kPa y con humedecimiento la resistencia se reduce a 100 kPa). En el suelo que tiene estabilical, la resistencia se degrada en un 25%.

#### **Módulo de resiliencia en suelo de Monterrey:**

- El módulo de resiliencia del suelo natural para diferentes tiempos de almacenamiento se mantiene en un valor aproximado de 500 MPa.
- Las muestras de suelo natural a las que les permitimos secado presentan módulo de resiliencia en un rango de 400 a 1000 MPa.
- Cuando a las muestras de suelo natural se les permite absorber agua, el módulo de resiliencia se degrada a valores inferiores de 100 MPa.
- El módulo de resiliencia del suelo que tiene estabilical y es ensayado después de la compactación es similar al del suelo natural.
- Las muestras de suelo con estabilical almacenadas durante 7, 14 y 28 días presentan módulos que varían entre 400 y 1200 MPa.
- Los valores de módulo de resiliencia de muestras secadas durante 7, 14 o 28 días presentan una variación similar a la anterior.
- De suma importancia es observar que el módulo de resiliencia de muestras a las que se les permite humedecimiento no se degrada; al contrario, parece incrementarse ligeramente con respecto a los módulos observados en muestras que se secan o se almacenan durante 7, 14 o 28 días.

#### **Módulo de resiliencia en suelo de Guadalajara:**

- Los módulos de resiliencia del suelo que tiene estabilical sí son más altos con respecto a los que se obtienen en el suelo natural. Esto para las condiciones estudiadas: almacenamiento, secado o con almacenamiento y humedecimiento.
- Los módulos de resiliencia del suelo natural se incrementan cuando las muestras son almacenadas o secadas durante 7, 14 o 28 días.
- Los módulos de resiliencia del suelo que tiene estabilical se incrementan con el tiempo de almacenamiento; sin embargo, para 14 y 28 días, los módulos de resiliencia son similares. Los resultados parecen indicar que un

mayor tiempo de almacenamiento no hace que se incrementen los módulos.

- El tiempo de secado no incrementa los módulos de resiliencia en suelo que tiene estabilical; ya que se obtuvieron valores similares a 7, 14 y 28 días de secado.
- Los módulos de resiliencia del suelo que tiene estabilical no se degradan al absorber agua, como lo hace el suelo natural.

#### **Deformación permanente en el suelo de Monterrey:**

- La deformación permanente de suelo con estabilical es ligeramente inferior a la medida en suelo natural, esto para muestras almacenadas o secadas.
- Las muestras de suelo natural que son humedecidas soportan menos de 100 ciclos de carga en la prueba de deformación permanente; mientras que las muestras que tienen estabilical y son humedecidas presentan deformaciones permanentes similares a las medidas en muestras con diferente tiempo de secado.

#### **Deformación permanente en el suelo de Guadalajara:**

- La deformación permanente de suelo con estabilical es inferior a la medida en suelo natural, para tiempo de almacenamiento de 28 días.
- Las muestras de suelo natural humedecidas soportan menos de 5000 ciclos de carga en la prueba de deformación permanente; mientras que las muestras que tienen estabilical y se humedecen presentan deformaciones permanentes similares a las medidas en muestras almacenadas o secadas.

#### **Permeabilidad**

- De acuerdo con las mediciones, la permeabilidad de ambos suelos -con y sin estabilidad- se clasifican como “muy baja permeabilidad”; sin embargo, cabe señalar que el suelo con estabilical sí muestra un ligero decremento en la permeabilidad en el caso del suelo de Monterrey.



## **Bibliografía y Referencias**

---

Amu, O. O., Bamisaye, O. F., y Komolafe, I. A. (2011). The suitability of lime stabilization requirement of some lateritic soil samples as pavement. *Int. J. Pure Appl. Sci. Technol.*, 2(1) (2011). Pp. 29-46.

Department of Transportation and Main Roads. Queensland Government. Technical Note 151. Testing Materials for lime Stabilization. June 2018.

Ethiopian Roads Authority. Pavement Design Manual. Volume I. Flexible Pavements and Gravel Roads-2002. Chapter 7. Cement and Lime Stabilized Materials.

Illinois Department of Transportation (2005). Pavement Technology Advisory. Subgrade Modification and Stabilization. PTA-D7. Design, Construction and Materials.

Little, D. N. (1999). Evaluation of structural properties of lime stabilized soils and aggregates. Volume 1. Summary of findings. Prepared for the lime Association. January, 1999.

Little, D. N. y Yusuf, F.A. M. S. (2001). An example problem illustrating the application of the National lime Association mixture design and testing protocol (MDTP) to ascertain engineering properties of lime-treated subgrades for mechanistic pavement design/analysis. Reporte FHWA/MS-DOT-RD-01-129.

Shivaji, K. P. (s.f.). Experimental study on use of ceented materials for pavements. [www.iitk.ac.in/transEL/thesis%20abstracts/PravinKolhe07.pdf](http://www.iitk.ac.in/transEL/thesis%20abstracts/PravinKolhe07.pdf), consultado 23 julio 2018.

ASTM D 854. Standard test method for specific gravity of soils.

ASTM D 698. Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort  $600 \text{ kN}\cdot\text{m}/\text{m}^3$  ( $12\,400 \text{ ft}\cdot\text{lb}/\text{ft}^3$ ).

ASTMD 1140. Standard Test Methods for Amount of Material in soils finer than No. 200 ( $75 \mu\text{m}$ ) sieve.

ASTM D 2216. Standard test method for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass

ASTM D 4318. Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils.

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

# Anexo 1. Características de los especímenes ensayados

## SUELO DE GUADALAJARA

### Especímenes de suelo natural

Muestra No	Característica	Ensayo	Condiciones iniciales								Condiciones finales							
			dprom, cm	hprom, cm	Área (cm <sup>2</sup> )	Vol (cm <sup>3</sup> )	Peso (g)	$\gamma_m$ (kN/m <sup>3</sup> )	w (%)	$\gamma_w$ (kN/m <sup>3</sup> )	dprom, cm	hprom, cm	Área (cm <sup>2</sup> )	Vol (cm <sup>3</sup> )	Peso (g)	$\gamma_m$ (kN/m <sup>3</sup> )	w (%)	$\gamma_w$ (kN/m <sup>3</sup> )
37	14 días de almacenamiento	Mr	7.099	14.426	39.58	570.99	907.99	15.60	36.37	11.44	7.138	14.427	40.02	577.32	905.2	15.381	38.87	11.076
38	14 días de almacenamiento	Mr	7.092	14.373	39.50	567.77	904.48	15.63	36.37	11.46	7.115	14.358	39.76	570.87	901.6	15.493	35.52	11.432
32	14 días de almacenamiento	Mr	7.086	14.402	39.44	567.96	909.6	15.71	36.6	11.50	7.118	14.412	39.79	573.50	906.9	15.513	34.95	11.495
65	7 días de almacenamiento	Mr	7.09	14.404	39.48	568.68	910.45	15.71	36.59	11.50	7.112	14.418	39.73	572.77	908.5	15.560	35.71	11.466
62	7 días de almacenamiento	Mr	7.11	14.414	39.70	572.29	908.9	15.58	36.39	11.42	7.109	14.423	39.69	572.48	906.9	15.540	35.5	11.468
66	7 días de almacenamiento	Mr	7.089	14.398	39.47	568.28	912.82	15.76	36.59	11.54	7.125	14.424	39.87	575.10	910.6	15.532	35.66	11.450
9	28 días de almacenamiento	Cs	7.088	14.424	39.46	569.15	910.33	15.69	37.16	11.44	7.103	14.425	39.63	571.60	903.3	15.502	35.37	11.452
10	28 días de almacenamiento	Cs	7.089	14.334	39.47	565.75	911.44	15.80	37.16	11.52	7.093	14.35	39.51	567.03	904.7	15.652	35.35	11.564
18	28 días de almacenamiento	Mr	7.102	14.379	39.61	569.61	911.25	15.69	37.26	11.43	7.124	14.367	39.86	572.67	903.8	15.482	35.13	11.457
17	28 días de almacenamiento	Mr	7.1	14.383	39.59	569.45	912.96	15.73	37.26	11.46	7.109	14.372	39.69	570.46	906.2	15.584	35.38	11.511
27	28 días de almacenamiento	Mr	7.082	14.394	39.39	567	912.48	15.79	37.14	11.51	7.128	14.375	39.90	573.63	905.6	15.487	35.06	11.467
12	28 días de almacenamiento	Cs	7.034	14.367	38.86	558.29	886.76	15.58	37.32	11.35	7.07	14.365	39.26	563.94	879.7	15.303	34.81	11.352
28	28 días de almacenamiento	Dp	7.086	14.394	39.44	567.64	907.33	15.68	37.14	11.43	7.1	14.382	39.59	569.41	900.9	15.521	35	11.497
30	28 días de almacenamiento	Dp	7.081	14.399	39.38	567.04	910.93	15.76	36.6	11.54	7.105	14.396	39.65	570.77	905.2	15.558	34.76	11.545
36	28 días de almacenamiento	Dp	7.083	14.398	39.40	567.32	910.93	15.75	36.37	11.55	7.124	14.408	39.86	574.30	905.1	15.460	34.61	11.485
55	28 días de almacenamiento	Mr	7.103	14.406	39.63	570.84	914.32	15.71	38.05	11.38	7.115	14.396	39.76	572.38	908.3	15.567	34.81	11.548
88	14 días de almacenamiento	Dp	7.1	14.4	39.59	570.13	912.66	15.70	37.54	11.42	7.114	14.397	39.75	572.26	907.1	15.549	35.73	11.456
53	28 días de almacenamiento	Dp	7.1	14.403	39.59	570.24	917.23	15.78	38.05	11.43	7.098	14.391	39.57	569.45	910.4	15.683	35.09	11.609
67	14 días de secado	Cs	7.089	14.388	39.47	567.89	904.48	15.62	37.35	11.38	6.969	14.059	38.14	536.27	761.8	13.936	14.25	12.198
49	28 días de almacen, 14 días de hum.	Cs	7.105	14.399	39.65	570.89	900.54	15.47	36.91	11.30	7.229	14.66	41.04	601.70	978.8	15.958	47.74	10.801
51	14 días de almacen, 14 días de hum.	Mr	7.107	14.39	39.67	570.85	902.58	15.62	38.05	11.46	7.219	14.658	40.93	599.96	993.7	16.249	46.41	11.098
56	14 días de almacen, 14 días de hum.	Dp	7.094	14.401	39.53	569.2	907.59	15.64	38.05	11.33	7.244	14.677	41.21	604.90	989.1	16.040	47.35	10.886
60	14 Alm-14 Hum-14Alm	Mr	7.091	14.422	39.49	569.55	904.92	15.59	36.39	11.43	7.212	14.681	40.85	599.73	984.2	16.099	46.74	10.971
61	14 días de almacen, 14 días de hum.	Dp	7.072	14.428	39.28	566.74	904.03	15.65	36.39	11.47	7.193	14.67	40.64	596.13	977	16.078	47.88	10.872
102	14 días de secado	Dp	7.071	14.451	39.27	567.48	904.69	15.64	36.93	11.42	6.963	14.089	38.08	536.49	724.1	13.240	8.58	12.193
72	7 días de almacen, 14 días de hum.	Dp	7.077	14.411	39.34	566.87	905.11	15.66	36.72	11.46	7.219	14.683	40.93	600.98	979	15.981	45.86	10.956
74	7 días de almacen, 14 días de hum.	Cs	7.078	14.394	39.35	566.36	903.27	15.65	36.72	11.44	7.223	14.685	40.98	601.73	980.6	15.987	46.13	10.940
68	28 días de secado	Cs	7.094	14.385	39.53	568.57	908.5	15.68	37.35	11.41	6.972	14.091	38.18	537.96	782	14.261	16.44	12.247
69	28 días de secado	Cs	7.089	14.396	39.47	568.2	907.17	15.66	37.35	11.40	6.985	14.106	38.32	540.54	782.9	14.208	16.81	12.163
70	28 días de secado	Cs	7.051	14.402	39.05	562.36	899.31	15.69	37.35	11.42	6.973	14.114	38.19	538.99	777.7	14.155	16.98	12.101
33	28 días de alm- 14 días de hum-14 días de alm	Mr	7.088	14.397	39.46	568.08	909.31	15.70	36.6	11.50	7.182	14.601	40.51	591.51	977.8	16.216	44.87	11.194
34	28 días de alm- 14 días de hum-14 días de alm	Mr	7.087	14.401	39.45	568.08	909.31	15.70	36.6	11.50	7.182	14.604	40.51	591.63	975.3	16.171	44.81	11.167
89	7 días de alm- 14 días de hum.	Mr	7.066	14.412	39.21	565.15	896.57	15.56	36.45	11.41	7.22	14.672	40.94	600.70	975.1	15.924	46.93	10.838
90	7 días de alm- 14 días de hum.	Mr	7.086	14.407	39.44	568.15	895.05	15.45	36.45	11.33	7.228	14.702	41.03	603.26	981.5	15.960	45.16	10.995
39	28 días de alm- 14 días de hum-14 días de alm	Cs	7.103	14.394	39.63	570.37	913.91	15.72	36.37	11.53	7.186	14.598	40.56	592.05	983.1	16.289	48.88	10.941
40	28 días de alm- 14 días de hum-14 días de alm	Cs	7.09	14.397	39.48	568.4	911.18	15.73	36.37	11.53	7.213	14.266	40.86	582.94	983.1	16.543	46.11	11.323
41	28 días de alm- 14 días de hum-14 días de alm	Cs	7.074	14.367	39.30	564.66	900.88	15.70	36.37	11.52	7.183	14.611	40.52	592.08	978.9	16.219	46.36	11.082
123	14 días de almacenamiento	Dp	7.108	14.419	39.37	567.67	899.6	15.55	36.54	11.39	7.111	14.414	39.71	572.45	896.6	15.366	36.14	11.287
111	14 días de secado-14 días de almacen	Mr	7.109	14.396	39.69	571.41	914.2	15.69	37.06	11.45	7.013	14.158	38.63	546.89	845.7	15.171	26.46	11.996
112	14 días de secado-14 días de almacen	Mr	7.1	14.407	39.59	570.4	912.4	15.69	37.06	11.45	7.011	14.163	38.61	546.77	842.4	15.114	25.95	12.000
113	14 días de secado-14 días de almacen	Mr	7.093	14.435	39.51	570.38	913.56	15.71	37.06	11.46	7.018	14.164	38.68	547.90	838.4	15.011	25.42	11.969
87	7 días de alm- 14 días de hum.	Dp	7.084	14.395	39.41	567.36	910.17	15.74	37.54	11.44	7.198	14.645	40.69	595.94	985.5	16.222	46.31	11.088
105	7 días de alm- 14 días de hum-14 días de alm	Mr	7.102	14.412	39.61	570.92	908.1	15.60	36.72	11.41	7.238	14.697	41.15	604.72	989.3	16.049	43.9	11.153
103	7 días de alm- 14 días de hum-14 días de alm	Cs	7.101	14.412	39.60	570.76	908.48	15.61	36.72	11.42	7.217	14.668	40.91	600.03	983.5	16.080	43.76	11.185
114	14 días de sec-14 días de alm	Dp	7.088	14.399	39.46	568.16	915.62	15.81	37.06	11.47	6.965	14.064	38.10	535.48	788.8	14.44	18.11	12.23
109	7 días de alm- 14 días de hum-14 días de alm	Dp	7.112	14.413	39.73	572.57	906.17	15.53	37.06	11.33	7.209	14.694	40.82	599.76	985.7	16.122	48.29	10.872
97	28 días de secado, 14 días de almacen	Mr	7.126	14.399	39.88	574.27	905.8	15.47	36.93	11.30	7.018	14.164	38.68	547.90	822.3	14.722	23.99	11.879
98	28 días de secado, 14 días de almacen	Mr	7.107	14.424	39.67	572.2	905	15.52	36.93	11.33	7.014	14.168	38.64	547.43	821.9	14.728	23.92	11.885
101	28 días de secado, 14 días de almacen	Mr	7.105	14.449	39.65	572.87	907.22	15.54	36.93	11.35	7.007	14.186	38.56	547.03	816.7	14.645	22.3	11.975
77	14 días de alm-14 días de hum	Mr	7.087	14.412	39.45	568.51	908.15	15.67	36.72	11.46	7.193	14.604	40.64	593.45	974.2	16.104	45.42	11.074
86	14 días de alm-14 días de hum	Mr	7.109	14.415	39.69	572.17	913.14	15.66	37.54	11.38	7.171	14.583	40.39	588.98	975.9	16.255	44.82	11.274
42	28 días de alm-14 días de hum	Dp	7.113	14.398	39.74	572.14	908.31	15.57	36.32	11.42	7.188	14.568	40.58	591.16	971.2	16.116	44.93	11.120
106	14 días de aalm-14 días de hum	Cs	7.083	14.404	39.40	567.56	905.43	15.65	36.72	11.45	7.184	14.613	40.53	592.33	973.7	16.126	46.54	11.004
107	14 días de alm-14 días de hum	Cs	7.108	14.422	39.68	572.28	909.08	15.58	36.72	11.40	7.203	14.651	40.75	597.01	989.7	16.263	47.78	11.005
108	14 días de alm-14 días de hum	Cs	7.093	14.399	39.51	568.96	907.26	15.64	36.72	11.44	7.19	14.618	40.60	593.52	982.9	16.245	47.09	11.045
35	7 días de almacenamiento	Cs	7.081	14.389	39.38	566.64	914.81	15.84	36.9	11.57	7.116	14.469	39.77	575.44	860.1	14.663	38.98	10.550
36	7 días de almacenamiento	Cs	7.083	14.398	39.40	567.32	910.93	15.75	36.37	11.55	7.109	14.48	39.69	574.75	860.2	14.683	39.28	10.542
54	28 días de almacen, 14 días de hum.	Dp	7.099	14.397	39.58	569.85	915.47	15.76	38.05	11.42	7.182	14.594	40.51	591.23	980.4	16.267	45.3	11.195
57	28 días de almacen, 14 días de hum.	Dp	7.1	14.39	39.59	569.73	902.15	15.53	36.39	11.39	7.178	14.588	40.47	590.33	967.9	16.084	45.64	11.043
58	28 días de almacen, 14 días de hum.	Dp	7.096	14.399	39.55	569.44	899.75	15.50	36.39	11.36	7.164	14.602	40.31					

### Especímenes con estabilizante

Muestra No	Característica	Ensaye	Condiciones iniciales								Condiciones finales							
			dprom, cm	hprom, cm	Área (cm²)	Vol (cm³)	Peso (g)	$\gamma_m$ (kN/m³)	w (%)	$\gamma_c$ (kN/m³)	dprom, cm	hprom, cm	Área (cm²)	Vol (cm³)	Peso (g)	$\gamma_m$ (kN/m³)	w (%)	$\gamma_c$ (kN/m³)
1	1 día de compactación (almacenamiento)	Mr	7.088	14.406	39.45829	568.44	852.24	14.7079	39.74	10.525	7.116	14.443	39.7707	574.41	850.3	14.5225	39.91	10.3799
2	1 día de compactación (almacenamiento)	Mr	7.073	14.418	39.29146	566.5	850.87	14.7343	39.74	10.544	7.102	14.427	39.6143	571.52	851.7	14.6193	40.05	10.4386
3	1 día de compactación (almacenamiento)	Mr	7.094	14.424	39.52513	570.11	852.61	14.671	40.33	10.455	7.112	14.433	39.726	573.36	851.9	14.5753	40.08	10.405
4	1 día de compactación (almacenamiento)	Cs	7.089	14.426	39.46943	569.39	856.97	14.7648	40.76	10.489	7.111	14.456	39.7148	574.12	856.3	14.6315	40.78	10.3932
5	1 día de compactación (almacenamiento)	Cs	7.107	14.443	39.67012	572.96	858.82	14.7045	40.76	10.447	7.106	14.472	39.659	573.94	858.2	14.6682	40.68	10.4267
6	0 días de almacen	Cs	7.084	14.397	39.41377	567.44	838.05	14.4884	40.59	10.305	7.121	14.455	39.8266	575.69	840.6	14.3244	40.83	10.1714
7	0 días de almacen	Cs	7.09	14.438	39.48057	570.02	841.17	14.7956	40.18	10.597	7.109	14.415	39.6925	572.17	849.1	14.358	40.73	10.2025
8	0 días de almacen	Cs	7.074	14.419	39.30258	566.7	838.29	14.5113	40.59	10.322	7.1	14.435	39.592	571.51	837.6	14.3779	40.75	10.2152
38	7 días de almacenamiento	Mr	7.106	14.427	39.65896	572.16	862.09	14.781	40.46	10.523	7.096	14.451	39.5474	575.5	861.3	14.7838	39.85	10.5712
52	7 días de almacenamiento	Mr	7.096	14.417	39.54742	570.16	864.09	14.8674	40.18	10.606	7.109	14.438	39.6925	573.08	862.7	14.7674	39.81	10.5625
44	7 días de almacenamiento	Mr	7.096	14.445	39.54742	571.26	853.98	14.665	40.14	10.465	7.103	14.481	39.6255	573.82	851.1	14.5506	39.43	10.4358
49	14 días de almacenamiento	Mr	7.1	14.405	39.59201	570.32	860.17	14.7956	40.18	10.555	7.111	14.44	39.7148	573.48	857.2	14.6631	40.01	10.4729
50	14 días de almacenamiento	Mr	7.09	14.454	39.48057	570.65	866.59	14.8974	40.18	10.627	7.112	14.483	39.726	575.35	864.8	14.7449	39.29	10.5858
51	14 días de almacenamiento	Mr	7.092	14.455	39.50284	571.01	864.1	14.8452	40.18	10.59	7.118	14.479	39.793	576.16	862.4	14.6833	39.51	10.5249
55	14 días de almacenamiento	Dp	7.089	14.443	39.46943	570.06	859.9	14.7979	40.52	10.531	7.103	14.458	39.6255	572.91	857.9	14.69	39.55	10.5267
91	0 días de alm (gd >)	Cs	7.084	14.438	39.41377	569.06	881.9	15.2031	39.96	10.862	7.113	14.443	39.7371	573.92	865.3	14.7911	41.01	10.5568
92	0 días de alm (gd >)	Cs	7.088	14.403	39.45829	568.32	879.96	15.1894	39.96	10.853	7.101	14.406	39.6032	570.52	879.2	15.1176	40.04	10.7952
93	0 días de alm (gd >)	Cs	7.089	14.412	39.46943	568.83	882.9	15.2263	39.96	10.879	7.086	14.416	39.662	568.51	862.2	15.2236	40.17	10.8608
63	14 días de almacenamiento	Cs	7.103	14.442	39.62548	572.27	864.26	14.8153	39.52	10.619	7.109	14.475	39.6925	574.55	862.8	14.7312	39.34	10.5721
64	14 días de almacenamiento	Cs	7.086	14.452	39.46033	569.93	860.35	14.8089	39.52	10.614	7.108	14.477	39.6813	574.47	858.8	14.6658	39.49	10.5139
65	14 días de almacenamiento *	Cs	7.096	14.426	39.54742	570.51	861.99	14.822	39.55	10.621	7.109	14.458	39.6925	573.87	862	14.7352	40.1	10.5176
88	7 días de almacenamiento	Dp	7.105	14.432	39.6478	572.2	869.41	14.9056	39.98	10.648	7.117	14.465	39.7818	575.44	868	14.7977	39.79	10.5857

### SUELO DE MONTERREY

### ESPECÍMENES DE SUELO NATURAL

Muestra No.	Característica	Ensaye	Condiciones iniciales								Condiciones finales							
			dprom, cm	hprom, cm	Área (cm²)	Vol (cm³)	Peso (g)	$\gamma_m$ (kN/m³)	w (%)	$\gamma_c$ (kN/m³)	dprom, cm	hprom, cm	Área (cm²)	Vol (cm³)	Peso (g)	$\gamma_m$ (kN/m³)	w (%)	$\gamma_c$ (kN/m³)
33	28 días de secado - 14 días de alm	Mr	15.037	29.998	177.59	5327.28	12095.0	22.27	7.59	20.70	14.993	29.928	176.55	5283.79	11505.0	21.36	2.27	20.89
34	28 días de secado - 14 días de alm	Mr	15.029	30.001	177.40	5322.15	12093.5	22.29	7.63	20.71	15.004	29.944	176.81	5294.38	11498.0	21.30	2.17	20.85
35	28 días de secado - 14 días de alm	Mr	15.029	30.009	177.40	5323.57	12140.0	22.37	7.85	20.74	15.009	14.951	176.93	5265.24	11495.5	21.30	2.21	20.85
36	28 días de secado - 14 días de alm	Dp	15.057	29.989	178.06	5339.86	12071.0	22.18	7.69	20.59	15	29.919	176.72	5271.14	11521.5	21.39	2.29	20.91
37	28 días de secado - 14 días de alm	Dp	15.04	30.025	177.66	5334.20	12077.0	22.21	7.61	20.64	15.006	29.976	176.83	5300.74	11498.0	21.28	1.99	20.86
38	28 días de secado - 14 días de alm	Dp	15.047	30.004	177.82	5335.44	12160.0	22.36	7.40	20.82	15.021	29.953	177.21	5307.98	11580.5	21.40	2.01	20.98
39	28 días de secado - 14 días de alm	Cs	15.027	29.999	177.35	5320.38	12042.5	22.20	7.59	20.64	15.009	29.963	176.93	5301.27	11471.5	21.23	2.11	20.79
40	28 días de secado - 14 días de alm	Cs	15.04	30.042	177.66	5337.22	12150.0	22.33	7.37	20.80	15.011	30.007	176.97	5310.47	11572.0	21.38	2.02	20.95
41	28 días de secado - 14 días de alm	Cs	15.043	30.012	177.73	5334.02	11975.5	22.02	7.60	20.47	14.969	29.978	175.99	5275.69	11460.0	21.31	2.21	20.85
45	28 días de alm - 14 días de hum-14 días de alm	Cs	15.034	29.975	177.52	5321.07	11915.5	21.97	7.80	20.38	15.25	30.56	182.77	5585.59	12406.0	21.79	11.41	19.56
46	28 días de alm - 14 días de hum-14 días de alm	Cs	15.048	30.02	177.85	5338.99	12029.5	22.22	7.91	20.59	15.204	30.628	182.42	5587.01	12504.0	22.01	10.64	19.89
47	28 días de alm - 14 días de hum-14 días de alm	Cs	15.039	30.001	177.64	5329.23	11849.5	21.81	7.45	20.30	15.299	30.451	183.83	5597.82	12328.5	21.61	11.03	19.46
48	28 días de alm - 14 días de hum-14 días de alm	Dp	15.045	30.005	177.78	5334.20	12030.0	22.12	7.63	20.56	15.292	30.515	183.66	5604.45	12472.0	21.83	11.00	19.67
49	28 días de alm - 14 días de hum-14 días de alm	Mr	15.03	29.999	177.42	5322.50	12045.0	22.20	7.58	20.64	15.287	30.485	183.54	5595.28	12436.5	21.80	10.51	19.73
50	28 días de alm - 14 días de hum-14 días de alm	Mr	15.029	30.034	177.40	5328.00	12038.5	22.17	7.39	20.64	15.271	30.547	183.16	5594.93	12447.5	21.83	10.14	19.66
51	28 días de alm - 14 días de hum-14 días de alm	Dp	15.022	29.959	177.23	5309.75	11840.5	21.88	7.84	20.29	15.294	30.464	183.71	5596.54	12288.0	21.54	10.94	19.42
52	28 días de almacenamiento	Dp	15.026	30.001	177.33	5320.02	11828.5	21.81	7.54	20.28	15.032	30.05	177.47	5332.97	11805.0	21.72	6.84	20.33
53	28 días de almacenamiento	Mr	15.027	30.001	177.35	5320.73	11928.0	21.99	7.46	20.47	15.022	29.994	177.23	5315.95	11914.5	21.99	7.00	20.55
54	28 días de alm - 14 días de hum-14 días de alm	Dp	15.052	30.015	177.94	5340.94	12028.0	22.09	7.40	20.57	15.247	30.456	182.58	5560.74	12436.5	21.94	10.96	19.77
55	28 días de almacenamiento	Mr	15.044	29.992	177.75	5331.18	12100.0	22.27	7.66	20.68	15.023	29.987	177.26	5315.42	12080.0	22.29	7.10	20.82
56	28 días de almacenamiento	Mr	15.04	29.976	177.66	5325.50	12076.0	22.24	7.74	20.65	15.023	30	177.26	5317.72	12056.5	22.24	7.05	20.78
57	28 días de almacenamiento	Cs	15.045	29.977	177.78	5329.22	12038.0	22.16	7.58	20.60	15.032	29.977	177.47	5320.01	12021.0	22.17	7.02	20.71
58	28 días de almacenamiento	Cs	15.038	30.017	177.61	5331.36	12050.5	22.17	7.80	20.57	15.038	30.008	177.61	5329.77	12036.5	22.15	7.12	20.68
59	28 días de almacenamiento	Cs	15.042	29.973	177.71	5326.38	12125.5	22.33	8.20	20.64	15.03	29.986	177.42	5320.19	12112.0	22.33	6.96	20.88
60	28 días de alm - 14 días de hum-14 días de alm	Dp	15.051	29.996	177.92	5336.85	12058.5	22.17	8.20	20.49	15.344	30.423	184.91	5625.62	12452.5	21.71	11.13	19.54
61	14 días de secado - 14 días de alm	Dp	15.049	29.986	177.87	5333.65	12079.0	22.22	7.86	20.60	14.988	29.921	176.43	5279.03	11582.5	21.52	3.03	20.89
62	14 días de alm - 14 días de hum-14 días de alm	Mr	15.029	29.99	177.40	5320.19	12043.0	22.21	7.81	20.60	15.259	30.469	182.87	5571.87	12460.5	21.94	11.24	19.72
63	14 días de alm - 14 días de hum-14 días de alm	Dp	15.014	29.994	177.05	5310.29	12073.0	22.30	7.96	20.66	15.216	30.421	181.84	5531.79	12425.5	22.04	10.24	19.99
64	14 días de alm - 14 días de hum-14 días de alm	Cs	15.035	30.018	177.54	5329.41	12131.5	22.33	8.04	20.67	15.274	30.386	183.23	5567.63	12476.0	21.98	10.15	19.96
65	14 días de alm - 14 días de hum-14 días de alm	Dp	15.033	29.987	177.49	5322.49	12060.0	22.13	7.46	20.59	15.252	30.391	182.70	5552.91	12471.0	22.03	10.58	19.93
66	14 días de alm - 14 días de hum-14 días de alm	Cs	15.021	30.003	177.21	5316.95	12134.5	22.38	8.20	20.69	15.266	30.467	183.04	5571.32	12432.5	21.87	10.92	19.72
67	14 días de alm - 14 días de hum-14 días de alm	Mr	15.029	29.983	177.40	5318.95	12021.5	22.17	7.77	20.57	15.217	30.479	181.86	5543.06	12368.5	21.89	10.80	19.76
68	14 días de secado - 14 días de alm	Mr	15.023	30.003	177.26	5318.25	12070.0	22.20	7.85	20.59	15.004	29.991	176.81	5302.69	11550.0	21.37	3.02	20.74
87	14 días de secado - 14 días de alm	Cs	15.057	30.016	178.06	5344.67	12065.5	22.15	7.90	20.52	15.183	14.611	40.52	592.08	11533.0	19.09		

ESPECÍMENES DE SUELO ESTABILIZADO

Muestra No.	Característica	Ensayo	Condiciones iniciales								Condiciones finales							
			dprom, cm	hprom, cm	Área (cm <sup>2</sup> )	Vol (cm <sup>3</sup> )	Peso (g)	$\gamma_w$ (kN/m <sup>3</sup> )	w (%)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	dprom, cm	hprom, cm	Área (cm <sup>2</sup> )	Vol (cm <sup>3</sup> )	Peso (g)	$\gamma_w$ (kN/m <sup>3</sup> )	w (%)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )
1	28 días de almacenamiento	Mr	15.016	30.037	177.09	5319.32	11627.0	21.44	10.85	19.34	15.051	30.059	177.92	5348.06	11616.5	21.31	9.95	19.38
2	28 días de almacenamiento	Mr	15.030	30.026	177.42	5327.29	11632.0	21.42	11.06	19.29	15.035	30.054	177.54	5335.81	11615.5	21.36	10.33	19.36
3	28 días de almacenamiento	Mr	15.048	30.032	177.85	5341.12	11661.0	21.42	11.38	19.23	15.055	30.043	178.01	5348.05	11649.0	21.37	10.23	19.38
4	28 días de alm- 14 días de hum	Mr	15.050	30.033	177.90	5342.72	11624.5	21.34	11.09	19.21	15.028	30.051	177.38	5330.31	11584.0	21.32	10.25	19.34
5	28 días de alm- 14 días de hum	Mr	15.060	29.979	178.13	5340.21	11675.5	21.45	11.55	19.23	15.048	30.021	177.85	5339.17	11637.0	21.38	10.20	19.40
6	28 días de alm- 14 días de hum	Mr	15.017	30.046	177.12	5321.62	11620.5	21.42	10.83	19.33	15.016	30.020	177.09	5316.31	11561.0	21.33	10.60	19.29
7	28 días de almacenamiento	Cs	15.002	30.022	176.76	5306.75	11623.0	21.49	11.10	19.34	15.026	30.034	177.33	5325.87	11611.5	21.39	10.08	19.43
8	28 días de almacenamiento	Cs	15.004	29.975	176.81	5299.86	11697.0	21.65	11.44	19.43	15.031	30.048	177.45	5331.90	11681.0	21.49	10.27	19.49
9	28 días de almacenamiento	Cs	14.995	30.045	176.60	5305.86	11575.0	21.40	10.92	19.29	15.026	30.036	177.33	5326.23	11561.5	21.29	10.32	19.30
10	28 días de alm- 14 días de hum	Cs	15.012	30.054	177.00	5319.49	11578.5	21.35	10.80	19.27	15.034	30.046	177.52	5333.68	11530.5	21.21	10.05	19.27
11	28 días de alm- 14 días de hum	Cs	15.014	30.005	177.05	5312.24	11638.0	21.49	11.10	19.34	15.024	30.029	177.28	5323.57	11577.5	21.33	9.46	19.49
12	28 días de alm- 14 días de hum	Cs	15.023	30.027	177.26	5322.51	11671.0	21.51	11.14	19.35	15.036	30.074	177.56	5340.07	11624.0	21.35	10.23	19.37
13	28 días de almacenamiento	Dp	15.002	30.007	176.76	5304.10	11629.0	21.51	11.07	19.36	15.026	30.073	177.33	5332.79	11615.0	21.37	10.31	19.37
14	28 días de almacenamiento	Dp	15.007	30.033	176.88	5312.24	11581.5	21.39	11.07	19.26	15.035	30.096	177.54	5343.26	11564.5	21.23	10.35	19.24
15	28 días de almacenamiento	Dp	15.004	30.017	176.81	5307.28	11534.0	21.32	10.94	19.22	15.033	30.034	177.49	5330.85	11523.0	21.21	10.44	19.20
16	28 días de alm- 14 días de hum-14 días de alm	Dp	15.004	30.000	176.81	5304.28	11593.5	21.44	11.15	19.29	15.029	30.038	177.40	5328.71	11530.0	21.23	10.19	19.26
17	28 días de alm- 14 días de hum-14 días de alm	Dp	15.008	29.985	176.90	5304.45	11649.5	21.54	10.93	19.42	15.032	30.068	177.47	5336.16	11578.5	21.29	9.93	19.36
18	28 días de alm- 14 días de hum-14 días de alm	Dp	15.004	30.009	176.81	5305.87	11610.0	21.47	11.51	19.25	15.020	29.994	177.19	5314.53	11575.0	21.37	10.30	19.37
19	14 días de alm- 14 días de hum	Mr	15.013	30.016	177.02	5313.48	11647.0	21.50	10.97	19.38	15.027	30.037	177.35	5327.11	11646.0	21.45	10.95	19.33
20	14 días de alm- 14 días de hum	Mr	15.008	30.006	176.90	5308.17	11632.0	21.50	11.08	19.35	15.032	30.041	177.47	5331.37	11640.5	21.42	10.47	19.39
21	14 días de alm- 14 días de hum	Mr	15.008	30.002	176.90	5307.46	11641.0	21.52	11.15	19.36	15.010	30.035	176.95	5314.71	11592.5	21.40	10.35	19.39
22	14 días de alm- 14 días de hum	Cs	15.019	30.004	177.16	5315.60	11689.0	21.57	11.34	19.38	15.032	30.028	177.47	5329.06	11618.0	21.39	9.75	19.49
23	14 días de alm- 14 días de hum-14 días de alm	Cs	15.028	30.019	177.38	5324.63	11534.0	21.25	10.70	19.20	15.005	30.111	176.83	5324.61	11545.0	21.27	10.38	19.27
24	14 días de alm- 14 días de hum-14 días de alm	Cs	15.030	29.990	177.42	5320.90	11615.0	21.41	10.89	19.31	15.036	30.022	177.56	5330.83	11578.0	21.31	10.13	19.35
25	14 días de alm- 14 días de hum-14 días de alm	Dp	15.021	30.017	177.21	5319.32	11645.5	21.48	11.36	19.29	15.032	30.071	177.33	5336.69	11625.0	21.37	10.10	19.41
26	14 días de almacenamiento	Dp	15.027	30.000	177.35	5320.55	11644.5	21.47	11.07	19.33	15.043	30.032	177.73	5337.58	11633.0	21.38	10.75	19.31
27	28 días de secado - 14 días de alm	Cs	15.028	30.012	177.38	5323.39	11640.5	21.45	11.07	19.31	14.973	29.987	176.08	5280.09	10814.5	20.09	2.58	19.59
28	28 días de secado - 14 días de alm	Cs	15.022	29.987	177.23	5314.71	11661.0	21.52	10.96	19.40	14.967	29.886	175.94	5258.09	10833.0	20.21	2.71	19.68
29	28 días de secado - 14 días de alm	Dp	15.033	29.998	177.49	5324.45	11587.5	21.35	11.06	19.22	14.988	29.926	176.43	5279.92	10763.5	20.00	2.69	19.47
30	28 días de secado - 14 días de alm	Mr	15.024	30.004	177.28	5319.14	11547.5	21.30	11.20	19.15	14.981	29.940	176.27	5277.45	10703.5	19.90	2.74	19.37
31	14 días de secado	Cs	15.016	29.990	177.09	5310.99	11594.5	21.42	11.53	19.20	14.975	29.897	176.13	5265.65	10857.5	20.23	3.76	19.49
32	14 días de secado	Cs	15.021	29.998	177.21	5315.95	11638.5	21.48	11.23	19.31	14.989	29.896	176.46	5275.33	10892.0	20.25	3.76	19.52
69	28 días de alm- 14 días de hum-14 días de alm	Mr	15.024	29.986	177.28	5315.95	11617.0	21.44	11.24	19.27	15.002	30.068	177.36	5314.88	11568.0	21.35	9.39	19.52
70	28 días de alm- 14 días de hum-14 días de alm	Mr	15.020	29.976	177.19	5311.34	11576.0	21.38	11.05	19.25	14.993	30.031	176.55	5301.98	11526.0	21.33	10.23	19.35
71	28 días de alm- 14 días de hum-14 días de alm	Cs	15.032	29.957	177.47	5316.46	11634.0	21.47	11.12	19.32	15.012	30.031	177.00	5315.42	11575.0	21.36	9.91	19.44
72	28 días de alm- 14 días de hum-14 días de alm	Cs	15.016	29.980	177.09	5309.22	11614.5	21.46	11.23	19.29	15.020	30.038	177.19	5322.33	11578.5	21.34	10.16	19.37
73	28 días de almacenamiento	Dp	15.033	29.984	177.49	5321.96	11640.0	21.53	11.33	19.34	15.126	30.067	179.70	5402.93	11671.0	21.17	10.29	19.20
74	28 días de almacenamiento	Dp	15.037	30.038	177.59	5334.38	11672.5	21.47	10.71	19.39	15.021	30.072	177.21	5329.06	11656.5	21.46	9.88	19.53
75	14 días de alm- 14 días de hum-14 días de alm	Mr	15.045	30.020	177.78	5336.86	11510.0	21.16	10.59	19.13	15.027	30.027	177.35	5325.34	11437.0	21.07	9.62	19.22
76	28 días de secado - 14 días de alm	Mr	15.027	30.009	177.35	5322.15	11636.0	21.45	10.82	19.35	15.003	29.918	176.79	5289.07	10881.5	22.04	2.74	19.45
77	28 días de secado - 14 días de alm	Dp	15.034	30.015	177.52	5328.17	11622.0	21.40	10.58	19.35	14.976	29.954	176.15	5276.40	10886.0	20.24	2.81	19.69
78	14 días de secado - 14 días de alm	Mr	15.025	30.000	177.30	5319.14	11573.5	21.34	10.88	19.25	15.002	29.902	176.76	5285.54	10918.0	20.59	3.41	19.91
79	14 días de secado - 14 días de alm	Mr	15.025	30.017	177.30	5322.15	11586.5	21.36	11.11	19.22	14.975	29.972	176.13	5278.86	10873.0	20.21	3.45	19.53
80	14 días de alm- 14 días de hum-14 días de alm	Dp	15.028	30.007	177.38	5322.50	11576.0	21.34	10.77	19.26	15.009	30.049	176.93	5316.48	11527.0	21.27	9.84	19.36
81	14 días de alm- 14 días de hum-14 días de alm	Mr	15.065	29.987	178.25	5348.18	11557.0	21.21	10.68	19.16	15.032	30.051	177.47	5333.14	11512.5	21.18	9.82	19.28
82	14 días de secado - 14 días de alm	Dp	15.009	29.974	176.93	5303.21	11496.0	21.27	10.76	19.20	14.976	29.956	176.15	5276.75	10772.0	20.03	3.28	19.39
83	14 días de secado - 14 días de alm	Cs	15.024	30.015	177.28	5321.09	11658.0	21.49	10.87	19.39	14.998	29.893	176.67	5281.13	10925.5	20.29	3.31	19.64
84	14 días de secado - 14 días de alm	Cs	15.054	30.028	177.99	5344.67	11586.5	21.27	11.65	19.05	15.025	29.938	177.30	5308.14	10835.0	20.02	3.22	19.40
85	14 días de secado - 14 días de alm	Cs	15.043	30.020	177.73	5335.44	11594.0	21.32	11.50	19.12	15.013	29.906	177.02	5294.00	10846.5	20.10	3.14	19.49
86	14 días de alm- 14 días de hum-14 días de alm	Dp	15.028	30.000	177.38	5321.26	11621.5	21.42	10.63	19.37	15.028	30.042	177.38	5328.71	11591.5	21.34	10.04	19.39
89	7 días de alm- 14 días de hum-14 días de alm	Mr	15.024	29.996	177.28	5317.72	11590.0	21.38	11.36	19.20	15.012	30.060	177.00	5320.56	11549.5	21.29	10.27	19.31
94	7 días de alm- 14 días de hum-14 días de alm	Dp	15.027	29.971	177.35	5315.41	11522.0	21.26	10.85	19.18	15.022	30.042	177.23	5324.46	11514.0	21.21	9.86	19.31
95	7 días de alm- 14 días de hum-14 días de alm	Mr	15.030	29.983	177.42	5319.66	11495.5	21.20	11.20	19.06	15.020	30.019	177.19	5318.96	11491.5	21.19	10.31	19.21
97	7 días de alm- 14 días de hum-14 días de alm	Dp	15.034	30.015	177.52	5328.17	11559.0	21.28	11.21	19.14	15.032	30.023	177.47	5328.18	11535.5	21.24	10.05	19.30
100	7 días de alm- 14 días de hum-14 días de alm	Cs	15.045	30.003	177.78	5333.84	11646.0	21.42	11.04	19.29	15.029	30.022	177.40	5325.87	11601.5	21.37	10.11	19.41
101	7 días de alm- 14 días de hum-14 días de alm	Dp	15.035	29.988	177.54	5324.09	11471.5	21.14	11.06	19.11	15.035	30.027	177.54	5331.01	11421.5	21.02	10.21	19.07
102	7 días de alm- 14 días de hum-14 días de alm	Cs	15.029	30.008	177.40	5323.39	11602.0	21.38	10.71	19.31	15.026	30.053	177.33	5329.24	11547.0	21.26	9.93	19.34
104																		





Km 12+000 Carretera Estatal 431 "El Colorado-Galindo"  
Parque Tecnológico San Fandila  
Mpio. Pedro Escobedo, Querétaro, México  
CP 76703  
Tel +52 (442) 216 9777 ext. 2610  
Fax +52 (442) 216 9671

[publicaciones@imt.mx](mailto:publicaciones@imt.mx)

<http://www.imt.mx/>

Esta publicación fue desarrollada en el marco de un sistema de gestión de calidad  
certificada bajo la norma ISO 9001:2015