



INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

Evaluación de las propiedades de suelos estabilizados con óxido de calcio. El caso de suelos de la Ciudad de México

Natalia Pérez García
Paul Garnica Anguas
Alfonso Pérez Salazar
Francisco Javier Castañeda
José Luis Silva González

Publicación Técnica No. 638
Sanfandila, Qro.
2021

ISSN 0188-7297

Esta investigación fue realizada en la Coordinación de Infraestructura de Vías Terrestres del Instituto Mexicano del Transporte, por la Dra. Natalia Pérez García, el Ing. Alfonso Pérez Salazar, el Dr. Paul Garnica, el Ing. Francisco Javier Castañeda, el Ing. José Luis Silva González y el técnico Miguel A. Cervantes Nieto.

Este texto es el producto final del proyecto de investigación externa IE-12/19 “Evaluación del aditivo estabilical. Segunda Fase”.

Nuestra gratitud al Ing. Francisco Javier Castañeda quien en representación del grupo CALIDRA, permitió la publicación de los resultados del proyecto. Asimismo, se agradece la colaboración del Ing. José Luis Silva González de CALIDRA por todo el apoyo proporcionado desde la gestión del proyecto hasta la finalización del mismo.

Se agradece la participación de los siguientes estudiantes: Emma Cruz Gervacio de la Universidad de San Nicolás de Hidalgo, Anahí Santiago Bautista del Tecnológico Nacional de México, campus Tlaxiaco, Ing. Norma Curiel Iñiguez, de la Universidad Autónoma de Querétaro, David Alonso Leyva Cervantes, del Instituto Tecnológico de Durango, y Ma. Guadalupe Reséndiz Romero de la Universidad Politécnica de San Juan del Río.

Se agradece al maestro Juan Fernando Mendoza por sus atinados comentarios y corrección al estilo de la publicación.

Contenido

	Página
Índice de figuras	v
Índice de tablas	ix
Sinopsis	xi
Abstract	xiii
Resumen Ejecutivo	xv
Introducción	1
1. Los suelos y su preparación	3
2. Procedimientos para determinar propiedades índice y mecánicas	7
2.1. Procedimientos utilizados	7
2.2. Determinación de la demanda de cal	7
2.3. Determinación del contenido de materia orgánica	9
2.3.1. Procedimiento	9
2.3.2. Cálculo	9
2.4. Procedimiento de preparación de los especímenes para las pruebas de compresión simple, módulo de resiliencia y deformación permanente	9
2.5. Procedimiento de prueba de CBR	12
2.6. Procedimiento de prueba de la resistencia en compresión simple	12
2.7. Procedimiento de la prueba de módulo de resiliencia	13
2.8. Procedimiento de la prueba de deformación permanente	14
3. Resultados y Discusión	15
3.1. Propiedades índice de suelos naturales y suelos con óxido de calcio	15
3.2. Características de compactación	17
3.3. California Bearing Ratio (CBR)	18
3.4. Resultados en compresión simple	20
3.5. Módulo de resiliencia	22
3.6. Deformación permanente	31
3.6.1. Suelo 1	32
3.6.2. Suelo 2	35
3.6.3. Suelo 3	37
Conclusiones	41
Referencias	43
Anexo 1: Características de los especímenes de prueba	45

Índice de figuras

	Página	
Figura 1.1.	Perfil estratigráfico del predio donde se extrajeron los suelos en estudio (tomada de reporte de la empresa CALIDRA) (los números indican la identificación de cada suelo)	3
Figura 1.2.	Suelo 1	4
Figura 1.3.	Suelos 2 y 3	4
Figura 1.4.	Cribado de material por la malla No. 4	5
Figura 1.5.	Secado al aire de uno de los materiales	5
Figura 2.1.	Procedimiento para determinar la demanda de cal en los tres suelos. (a) Suelos con agua destilada y diferentes porcentajes de cal; (b) Medición del pH de cada muestra; (c) Valor de pH en suelo 3 con 6% de óxido de calcio	8
Figura 2.2.	Preparación de la mezcla suelo-óxido de calcio y agua para alcanzar el contenido de agua óptimo con respecto a la prueba Proctor estándar	10
Figura 2.3	Compactación de los especímenes en molde de 7.1 cm de diámetro por 14.4 cm de altura	11
Figura 2.4.	Enrase y toma de dimensiones y peso de la muestra	11
Figura 2.5.	(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; (c) Almacenamiento de muestras después de humedecerse, secarse o compactarse	12
Figura 2.6.	(a) Compactación de muestra; (b) saturación durante 96 horas y, (c) aplicación de carga para determinar CBR	12
Figura 2.7.	(a) Equipo triaxial para determinar el módulo de resiliencia y, (b) vista de la aplicación de la carga cíclica en el espécimen	13
Figura 3.1.	Curva granulométrica del suelo 1 y fotografía del material retenido en malla No. 200	16
Figura 3.2.	Curva granulométrica del suelo 2 y fotografía del material retenido en malla No. 200.	16
Figura 3.3.	Curva granulométrica del suelo 3 y fotografía del material retenido en malla No. 200	17

Figura 3.4.	Curvas de compactación de los suelos naturales y con óxido de calcio	19
Figura 3.5.	Curvas de compactación de los suelos con y sin óxido de calcio	19
Figura 3.6.	CBR y expansión libre del suelo 1	20
Figura 3.7.	CBR y expansión libre del suelo 2	20
Figura 3.8.	CBR y expansión libre del suelo 3	20
Figura 3.9.	Resumen de CBR y expansión de los suelos en estudio	21
Figura 3.10.	Resistencia en compresión simple de las muestras que se almacenanaron	23
Figura 3.11.	Resistencia en compresión simple de muestras que se secan durante 7, 14 o 28 días	24
Figura 3.12.	Resistencia en compresión simple de muestras que se almacenan durante 7, 14 o 28 días y posteriormente se humedecen durante 14 días	25
Figura 3.13.	Módulo de resiliencia del suelo 1 con y sin óxido de calcio. Para 7, 14 y 28 días de almacenamiento	27
Figura 3.14.	Módulo de resiliencia del suelo 2 con y sin óxido de calcio. Para 7, 14 y 28 días de almacenamiento	28
Figura 3.15.	Módulo de resiliencia del suelo 3 con y sin óxido de calcio. Para 7, 14 y 28 días de almacenamiento	29
Figura 3.16.	Módulo de resiliencia para muestras que se almacenanaron 7, 14 o 28 días (con y sin óxido de calcio)	30
Figura 3.17.	Módulo de resiliencia del suelo 1 con y sin óxido de calcio. Para 7, 14 y 28 días de secado	31
Figura 3.18.	Módulo de resiliencia del suelo 2 con y sin óxido de calcio. Para 7, 14 y 28 días de secado	32
Figura 3.19.	Módulo de resiliencia del suelo 3 con y sin óxido de calcio. Para 7, 14 y 28 días de secado	33
Figura 3.20.	Módulo de resiliencia de los tres suelos para especímenes secados durante 7, 14 y 28 días	34
Figura 3.21.	Módulo de resiliencia del suelo 1 con y sin óxido de calcio. Para 7, 14 y 28 días de almacenamiento-14 días de humedecimiento y 14 días de almacenamiento	35
Figura 3.22.	Módulo de resiliencia del suelo 2 con y sin óxido de calcio. Para 7, 14 y 28 días de almacenamiento-14 días de humedecimiento y 14 días de almacenamiento	36
Figura 3.23.	Módulo de resiliencia del suelo 3 con y sin óxido de calcio. Para 7, 14 y 28 días de almacenamiento-14 días de humedecimiento y 14 días de almacenamiento	37

Figura 3.24.	Módulo de resiliencia de los tres suelos para especímenes almacenados durante 7, 14 y 28 días, humedecidos durante 14 días y almacenados 14 días	38
Figura 3.25.	Pruebas de deformación permanente del suelo 1. Muestras almacenadas 7, 14 o 28 días	39
Figura 3.26.	Pruebas de deformación permanente del suelo 1. Muestras secadas por 7, 14 o 28 días	40
Figura 3.27.	Pruebas de deformación permanente del suelo 1. Muestras almacenadas 7, 14 o 28 días, con posterior humedecimiento de 14 días	40
Figura 3.28.	Deformación permanente acumulada en 20 000 ciclos para el suelo 1. Condiciones de curado: Almacenamiento, secado y almacenamiento-humedecimiento-almacenamiento	41
Figura 3.29.	Pruebas de deformación permanente del suelo 2. Muestras almacenadas 7, 14 o 28 días	42
Figura 3.30.	Pruebas de deformación permanente del suelo 2. Muestras secadas por 7, 14 o 28 días	43
Figura 3.31.	Pruebas de deformación permanente del suelo 2. Muestras almacenadas 7, 14 o 28 días, con posterior humedecimiento de 14 días	44
Figura 3.32.	Deformación permanente acumulada en 20 000 ciclos para el suelo 2. Condiciones de curado: Almacenamiento, secado y almacenamiento-humedecimiento-almacenamiento	46
Figura 3.33.	Pruebas de deformación permanente del suelo 3. Muestras almacenadas 7, 14 o 28 días	46
Figura 3.34.	Pruebas de deformación permanente del suelo 3. Muestras secadas por 7, 14 o 28 días	46
Figura 3.35.	Pruebas de deformación permanente del suelo 2. Muestras almacenadas 7, 14 o 28 días, con posterior humedecimiento de 14 días	47
Figura 3.36.	Deformación permanente acumulada en 20 000 ciclos para el suelo 3. Condiciones de curado: Almacenamiento, secado y almacenamiento-humedecimiento-almacenamiento	48

Índice de tablas

	Página
Tabla 2.1. Normativa utilizada	7
Tabla 2.2. Porcentajes de cal	8
Tabla 2.3. No. de golpes aplicados por capa	10
Tabla 2.4. Esfuerzos de confinamiento y desviadores aplicados en la prueba de módulo de resiliencia según el protocolo NCHRP 1-28A. Procedimiento para materiales de subrasante	14
Tabla 3.1. Características de los suelos en estudio	15
Tabla 3.2. Cantidades de arcilla de los suelos	17
Tabla 3.3. Reducción de la deformación permanente en suelo 1 con óxido de calcio	42
Tabla 3.4. Reducción de la deformación permanente en suelo 2 con óxido de calcio	45
Tabla 3.5. Reducción de la deformación permanente en suelo 2 con óxido de calcio	49

Sinopsis

El IMT, desde el año 2017 ha evaluado el óxido de calcio como estabilizador de suelos. Este documento muestra un segundo estudio en donde se siguió evaluando este producto con tres suelos de la Ciudad de México.

Los resultados indicaron que los suelos se debían estabilizar con 5, 4 y 5% de óxido de calcio para cada uno de los casos. En cuanto a propiedades mecánicas, se observó que el CBR, la resistencia en compresión y el módulo de resiliencia de los tres suelos se incrementaron de forma importante cuando a los suelos se le adicionó óxido de calcio. En cuanto a la deformación permanente, ésta se redujo en las muestras con óxido de calcio.

La condición de humedecimiento deja ver un efecto que en carreteras es muy importante. Es decir, un suelo natural que por alguna razón tiene un incremento en su contenido de agua, pierde de forma abrupta la mayor parte de su resistencia o rigidez, mientras que un suelo mejorado con óxido de calcio, aunque muestre una ganancia en contenido de agua, no pierde estabilidad, es decir, su resistencia o sus módulos de resiliencia tienden a permanecer en valores como los que tendría si no absorbiera agua.

Abstract

The Mexican Institute of Transportation has been evaluating calcium oxide as a soil stabilizer since 2017. In this document, a second study is shown where calcium oxide was evaluated in three different soils from Mexico City.

The results first indicated that the soils (1, 2 y 3) should be stabilized with 5, 4 and 5% calcium oxide (regarding dry mass of soil). In terms of mechanical properties, it was observed that the CBR, compressive strength and resilient modulus of the three soils increased significantly when calcium oxide was added to the soil. As for the permanent deformation, it was reduced in the samples with calcium oxide.

On the other hand, the wetting condition showed an effect that is very important in pavement engineering. That is to say, a natural soil that for some reason has an increase in its water content, abruptly loses most of its resistance or stiffness, while a soil improved with calcium oxide, although it shows a gain in water content, does not lose stability, that is to say, its resistance or its resilient modulus tends to remain at values like those it would have if it did not absorb water.

Resumen ejecutivo

El presente documento muestra los resultados del segundo estudio de evaluación del óxido de calcio. En el cual se evaluaron las propiedades mecánicas de tres suelos de la Ciudad de México con y sin óxido de calcio.

Posterior a su traslado a los laboratorios del Instituto Mexicano del Transporte, estos se cribaron por la malla No. 4 y se secaron al aire para después almacenarlos.

La verificación del comportamiento de la mezcla suelo-óxido de calcio se llevó a cabo a través de pruebas como límites de consistencia, valor relativo de soporte, resistencia en compresión simple, módulo de resiliencia y deformación permanente. En estas tres últimas pruebas, se ensayaron probetas en condiciones de almacenamiento, secado y humedecimiento. Otra de las pruebas realizadas fue la determinación del contenido de materia orgánica.

Las pruebas indicaron primeramente que los suelos 1, 2 y 3 debían estabilizarse con 5, 4 y 5 porciento de óxido de calcio (con respecto a peso seco), respectivamente. Los resultados de la prueba de materia orgánica indicaron contenidos de 1.8%, 4.9% y 4.9% para cada uno de los tres suelos.

En cuanto a resultados de propiedades mecánicas, el CBR de los tres suelos se incrementó de forma importante cuando a los suelos se les adicionó óxido de calcio. Asimismo, la resistencia en compresión simple y el módulo de resiliencia también se incrementaron en suelo estabilizado con óxido de calcio. En cuanto a la deformación permanente, ésta se redujo en las muestras estabilizadas con el aditivo.

La condición de humedecimiento deja ver un efecto que en carreteras es muy importante. Es decir, un suelo no estabilizado con óxido de calcio y que por alguna razón tiene un incremento en su contenido de agua, pierde de forma abrupta la mayor parte de su resistencia o rigidez, mientras que un suelo mejorado con óxido de calcio, aunque muestre una ganancia en contenido de agua, no pierde su estabilidad, es decir, su resistencia o sus módulos de resiliencia tienden a permanecer en valores como los que tendría si no absorbiera agua.

Por otro lado, en cuanto a deformación permanente, el suelo natural al incrementar su contenido de agua presenta deformaciones permanentes superiores a 5% en las primeras aplicaciones de carga cíclica. No así el suelo estabilizado con óxido de calcio, en donde las deformaciones permanentes se logran mantener en valores muy reducidos.

Introducción

El Instituto Mexicano del Transporte ha realizado diversos estudios para evaluar el comportamiento de materiales estabilizados con óxido de calcio.

En esos trabajos se ha comprobado (con las pruebas de laboratorio realizadas) que el óxido de calcio ha mejorado las propiedades mecánicas de los suelos estudiados de forma importante. Sin embargo, es importante destacar que en la construcción de las estructuras del pavimento se hace uso de diversos bancos de materiales los cuales tienen diferentes composiciones mineralógicas, lo que hace necesario realizar pruebas para comprobar la efectividad del óxido de calcio en suelos con diferentes características.

Por esto, para seguir investigando el efecto del óxido de calcio, en este estudio se utilizaron tres suelos de la Ciudad de México. Estos suelos son de especial importancia ya que presentan características especiales como se detalla en los capítulos 2 y 3.

En esta publicación se muestran también los procedimientos de prueba utilizados para la evaluación de los suelos, así como los resultados obtenidos.

En este documento no se presentan antecedentes de estabilización con cal ya que en la publicación técnica 560 “Evaluación del óxido de calcio (estabilical) como estabilizador de suelos”, se presentó un capítulo en donde se mostraron los aspectos más relevantes en cuanto a estabilización de suelos con cal.

1. Los suelos y su preparación

En el Instituto Mexicano del Transporte (en adelante IMT) ha realizado diversos estudios y pruebas para evaluar el efecto del óxido de calcio como estabilizador de suelos. En dichos estudios se han utilizado materiales de Querétaro, Monterrey, Guadalajara y Estado de México. Para el estudio presentado en este trabajo se decidió que también era importante determinar el comportamiento de suelos de la Ciudad de México, debido a la complejidad de los mismos.

La Figura 1.1 muestra el perfil de suelo que se observó en el predio donde se extrajeron las muestras. El suelo de la parte más profunda se etiquetó como suelo 1; el suelo de la capa intermedia fue el 2, y el tres fue el que extrajo por debajo de la capa superficial.

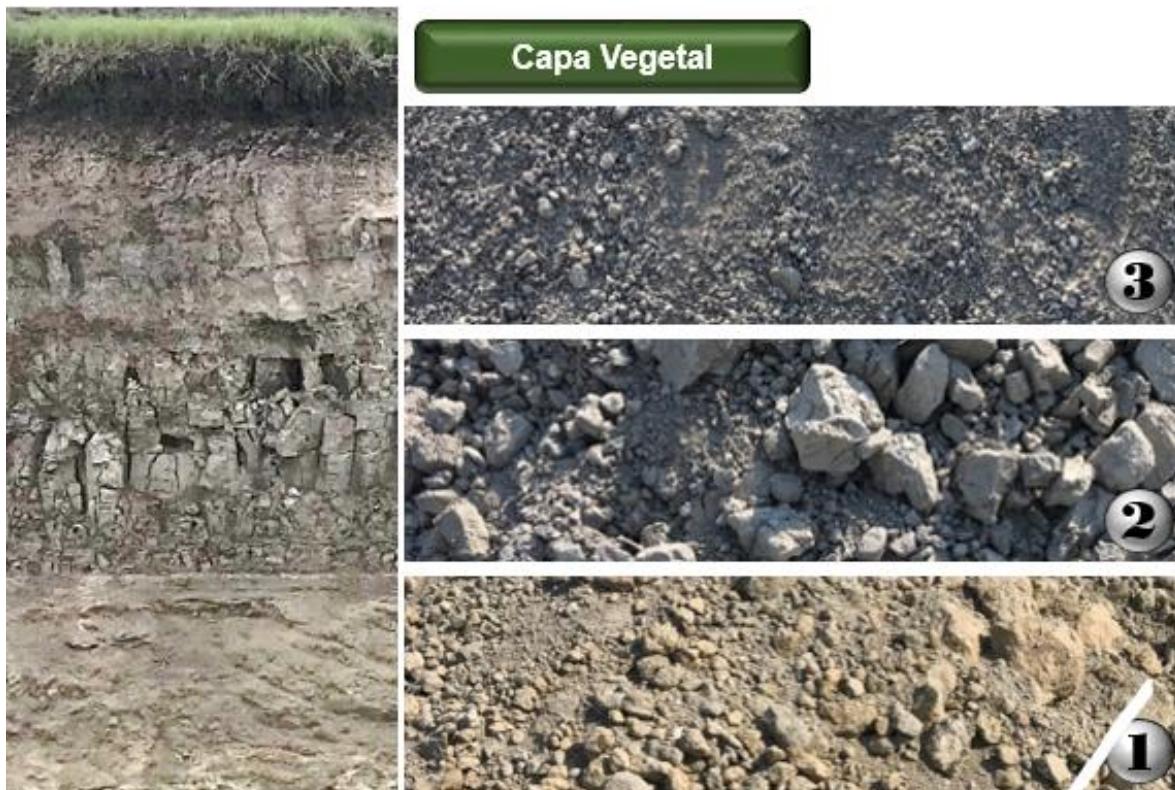


Figura 1.1 Perfil estratigráfico del predio donde se extrajeron los suelos en estudio (los números indican la identificación de cada suelo).

Fuente: Fotografías extraídas del informe de investigación de la empresa CALIDRA)

La Figura 1.2, 1.3 y 1.4, muestran los suelos una vez que fueron trasladados a las instalaciones del IMT.



Figura 1.2. Suelo 1



Figura 1.3. Suelo 2 y 3

Los materiales en estado natural contenían terrones y el suelo uno contenía material de sobretamaño. En el proyecto solo se utilizó suelo que pasó por la malla No. 4, por tanto, los suelos se disgregaron y criaron mediante dicha malla (Figura 1.4). Previo al uso de ellos, estos se secaron al aire durante varios días y se almacenaron en costales (Figura 1.5).



Figura 1.4. Cribado de material por la malla No. 4



Figura 1.5. Secado al aire de uno de los materiales

2. Procedimientos para determinar propiedades índice y mecánicas

2.1. Procedimientos utilizados

En este trabajo de investigación se determinaron propiedades índice y mecánicas de acuerdo con procedimientos ASTM, AASHTO y NCHRP. La Tabla 2.1 es un resumen de la normativa utilizada. Los procedimientos para determinar propiedades índice no se detallan en este documento ya que se han abordado a profundidad en otros documentos, sin embargo, sí se describe el procedimiento para obtención de demanda de cal, el de determinación de materia orgánica, y el de preparación de especímenes para las pruebas de resistencia en compresión simple, módulo de resiliencia y deformación permanente.

Tabla 2.1. Normativa utilizada

Norma	Nombre
ASTM D 1140-17	Determinación de la cantidad de suelo más fino que la malla No. 200.
ASTM C136-14	Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos.
ASTM D4318-10	Determinación del límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad.
ASTM D854-14	Determinación de la gravedad específica del suelo
ASTM D698-12	Determinación de las características de compactación de un suelo. Prueba Proctor estándar.
AASHTO T267-86	Método estándar para la determinación del contenido de materia orgánica en suelos por medio de ignición
ASTM D1883-16	Método estándar para la determinación del CBR de suelos compactados en laboratorio
ASTM D2166-16	Método de prueba estándar para la resistencia a la compresión no confinada de suelo cohesivo
NCHRP 1-28A	Métodos de prueba armonizados para la determinación del módulo de resiliencia para diseño de pavimentos flexibles

2.2. 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 D6276-19.

Un resumen de los pasos de esta prueba son los siguientes:

- Se criba el suelo por la malla No. 40
- Se obtienen 5 muestras de 25 g de suelo secado al horno
- Se colocan las muestras en frascos de plásticos

- Se pesan muestras de cal representativas que sean 2, 3, 4, 5 y 6 porciento con respecto a peso seco del suelo.
- El sexto espécimen de 2.0 g de cal representa la solución saturada.
- Se adiciona la cal a cada una de las muestras de suelo y se marca el frasco con cada porcentaje,
- Se cierra el frasco y se mezcla el suelo con cal.
- Se adicionan 100 ml de agua destilada a cada frasco.
- Se tapan los frascos y se agitan durante 30 segundos cada 10 minutos, esto durante una hora.
- La temperatura de prueba debe ser 25°C.
- Dentro de los primeros 15 minutos posteriores a la hora, se mide el pH y se registra su valor.
- El porcentaje más bajo de cal que proporcione un valor de pH de 12.4 es la cantidad de cal que se debe usar para estabilizar el suelo.

La Figura 2.1 muestra algunos de los pasos de este procedimiento de prueba.

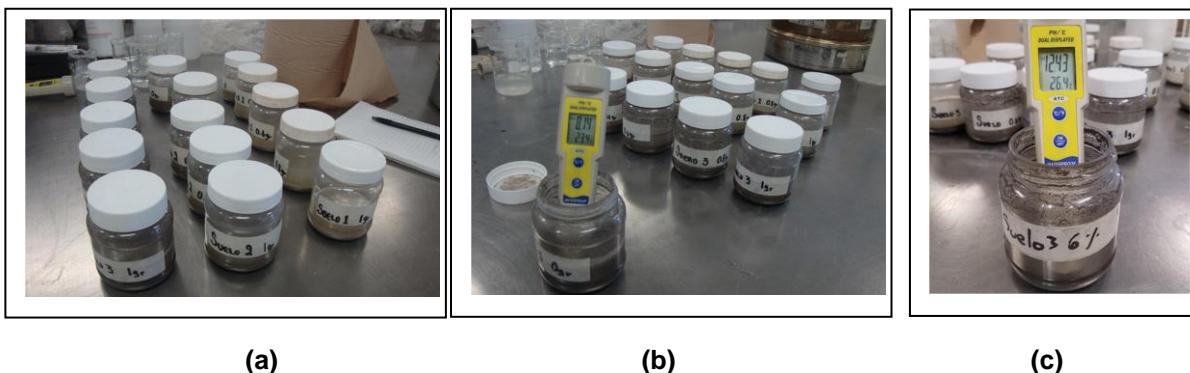


Figura 2.1. Procedimiento para determinar la demanda de cal en los tres suelos. (a) Suelos con agua destilada y diferentes porcentajes de cal; (b) Medición del pH de cada muestra; (c) Valor de pH en suelo 3 con 6% de óxido de calcio

La Tabla 2.2 muestra los porcentajes de óxido de calcio requeridos para estabilizar los tres suelos de la Ciudad de México.

Tabla 2.2. Porcentajes de cal

Suelo	pH	% óxido de calcio
1	12.40	5
2	12.42	4
3	12.37	5

2.3. Determinación del contenido de materia orgánica

Para determinar la cantidad de materia orgánica de los suelos, se utilizó el procedimiento AASHTO T267-86, el cual se describe a continuación:

2.3.1. Procedimiento

- Se selecciona una muestra de suelo con una masa de aproximadamente 10 a 40 gramos y se coloca en un contenedor o cápsula de evaporación de porcelana y se determina la masa con aproximación de 0.01 gramos.
- Se coloca el crisol o contenedor con la muestra dentro de la mufla por 6 horas a una temperatura de $455 \pm 10^{\circ}\text{C}$.
- Se saca la muestra y se coloca en el desecador para que se enfrie.
- Se retira la muestra del desecador y se determine la masa con aproximación de 0.01 g.

2.3.2. Cálculo

- El contenido de materia orgánica puede expresarse como un porcentaje de la masa del suelo secado al horno y se calcula como:

$$\% \text{ materia orgánica} = \left[\frac{A-B}{A-C} \right] \times 100 \quad (2.1)$$

Donde:

A=Masa del contenedor de evaporación y suelo secado al horno, antes de la ignición;

B=Masa del contenedor de evaporación y suelo secado al horno, después de la ignición y

C=Masa del contenedor de evaporación con aproximación de 0.01 g.

- El porcentaje de contenido de materia orgánica se calcula con aproximación de 0.1 %.

2.4. Procedimiento de preparación de los especímenes para las pruebas de compresión simple, módulo de resiliencia y deformación permanente

El procedimiento utilizado se describe a continuación:

- Se preparó la mezcla suelo-óxido de calcio-agua (Figura 2.2) y se permitió un tiempo de maduración de 16 a 18 horas.
- Para las muestras sin óxido de calcio, solo se adicionó el agua de compactación, se mezcló y se permitió un tiempo de curado de 24 horas.

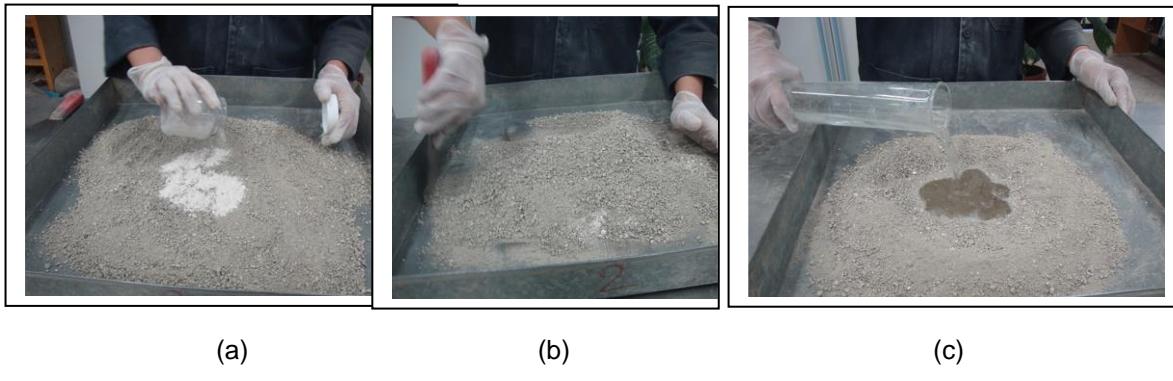


Figura 2.2. Preparación de la mezcla suelo-óxido de calcio y agua para alcanzar el contenido de agua óptimo con respecto a la prueba Proctor estándar

- Despues de las 16 a 18 horas de maduración de la mezcla (suelo-óxido de calcio) o del tiempo de curado (suelo natural), se compactaron los especímenes de prueba de forma manual. Para esto, se utilizó un molde de 7.1 cm de diámetro y 14.4 cm de altura (sin collarín). Los especímenes se compactaron en 8 capas con un pisón de 1 kg de masa y 30.5 cm de altura de caída (Figura 2.3). En cada capa se aplicaron los golpes indicados en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 No. de golpes aplicados por capa

Suelo No.	Suelo natural	Suelo con óxido de calcio
1	12	15
2	14	18
3	15	19



Figura 2.3. Compactación de especímenes en molde de 7.1 cm de diámetro por 14.4 cm de altura

- Posterior a la compactación de la última capa, el espécimen se enrasó, se extrajo del molde y se tomaron sus dimensiones y peso (Figura 2.4).



Figura 2.4. Enrase y toma de dimensiones y peso de la muestra

- Los ensayos se realizaron después de que se cumplió alguna de las siguientes condiciones:
 - Despues de compactar (nomenclatura: 0A).
 - Despues de 7, 14 o 28 días de almacenamiento (nomenclatura: 7A-, 14A, 28A).
 - Despues de 7, 14 o 28 días de secado, con 14 días de almacenamiento posteriores al secado (nomenclatura: 7S-14A, 14S-14A, 28S-14A).
 - Despues de 7, 14 o 28 días de almacenamiento-14 días de humedecimiento y 14 días de almacenamiento (nomenclatura: 7A-14H-14A, 14A-14H, 14A, 28A-14H-14A).

El procedimiento de secado o humedecimiento y almacenado se muestra en la Figura 2.5.



(a)

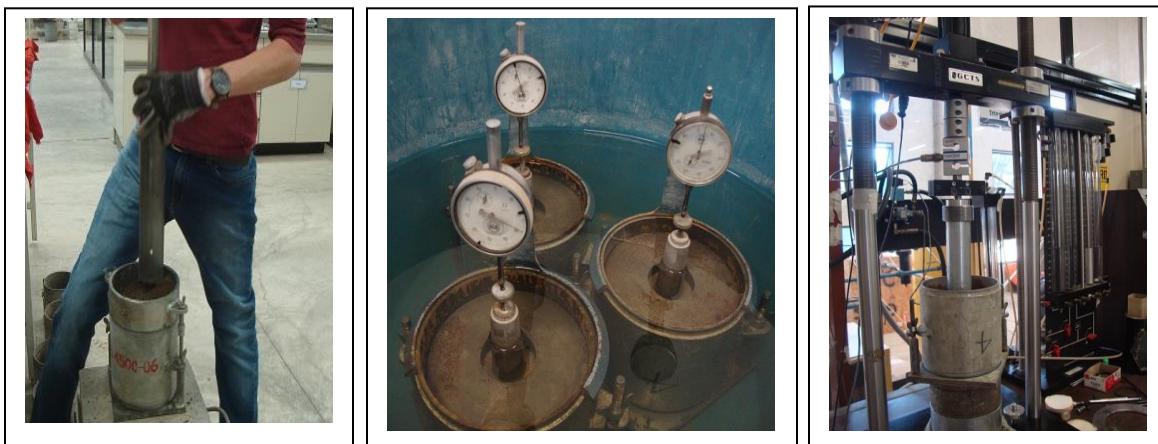
(b)

(c)

Figura 2.5. (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; (c) Almacenamiento de muestras después de humedecerse, secarse o compactarse.

2.5. Procedimiento de prueba de California Bearing Ratio (CBR)

El CBR es otro de los parámetros obtenidos para los tres suelos en estudio. Para evaluar este parámetro se utilizó la norma ASTM D1883-16. De acuerdo con este procedimiento, el material se compacta en tres capas; se compactan tres especímenes. El primer espécimen se compacta con 10 golpes, el segundo con 25 golpes y el tercero 56 golpes. Para la compactación se utiliza un pisón de 2.5 kg de masa y 30.5 cm de altura de caída. Posterior a la compactación, los especímenes se saturan 96 horas y después se realiza la penetración a una velocidad de 1.27 mm/mm (Figura 2.6).



(a)

(b)

(c)

Figura 2.6. (a) Compactación de muestra; (b) saturación durante 96 horas; y (c) aplicación de carga para determinar el CBR

2.6. Procedimiento de prueba de la resistencia en compresión simple

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

2.7. Procedimiento de la 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 2.7a. En la prueba, al espécimen se le aplicaron diferentes cargas y presiones de confinamiento. La Tabla 2.4 muestra las secuencias de prueba para el material de subarasante; la secuencia cero es la de precondicionamiento 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 segundos y después continua un período de descarga de 0.8 segundos (Figura 2.7b).

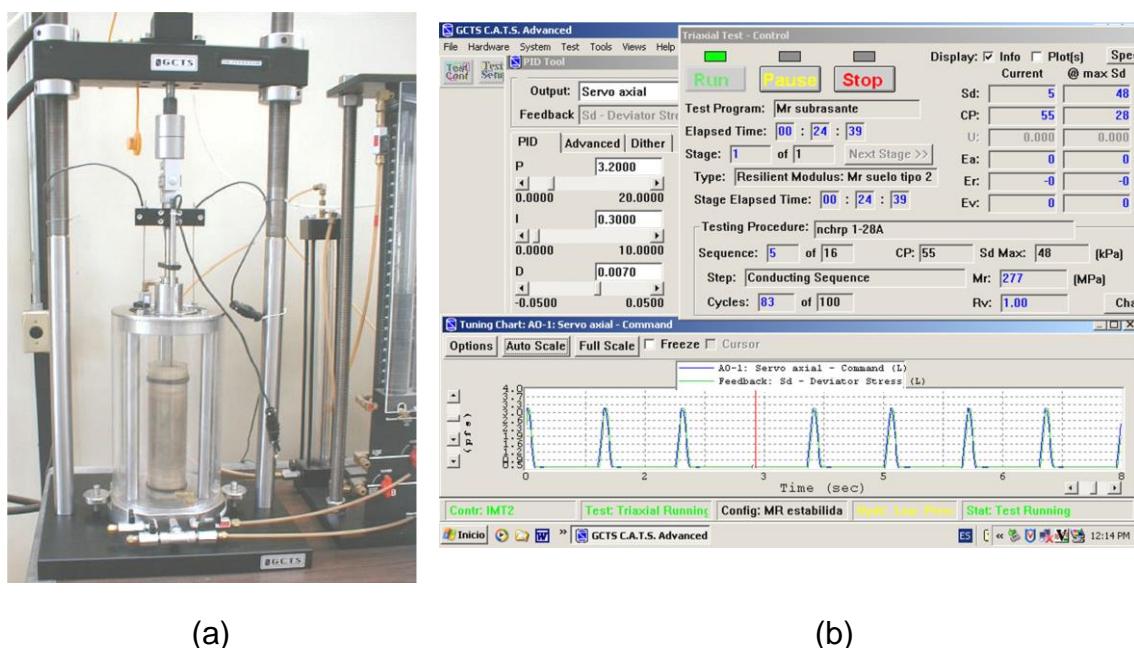


Figura 2.7. (a) Equipo triaxial para determinar el módulo de resiliencia y (b) vista de la aplicación de la carga cíclica en el espécimen

Tabla 2.4. 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, σ_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

2.8. Procedimiento de la prueba de deformación permanente

Para las pruebas de deformación permanente, no existe un procedimiento estándar, por lo que se diseñó un procedimiento específico para este estudio, el cual consistió en 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.

3. Resultados y Discusión

3.1. Propiedades índice de suelos naturales y suelos con óxido de calcio

Después de la preparación de los suelos, se determinaron las propiedades índice, características de compactación y cantidad de materia orgánica. La Tabla 3.1 resume las propiedades de los suelos con y sin óxido de calcio.

Tabla 3.1. Características de los suelos en estudio

Característica	Suelo 1	Suelo 1 con 5% óxido de calcio	Suelo 2	Suelo 2 con 4% óxido de calcio	Suelo 3	Suelo 3 con 5% óxido de calcio
Límite líquido (%)	36	46	61	73	87	85
Límite plástico (%)	26	39	38	48	58	58
Índice de plasticidad (%)	10	7	23	25	29	27
Gravedad específica	2.53	***	2.51	***	2.50	***
Pasa malla No. 200 (%)	63.90	***	72.84	***	84.68	***
Arena (%)	36.1	***	27.16	***	15.32	***
Contenido de materia orgánica (%)	1.8	***	4.9	***	4.9	***
Clasificación SUCS	ML	ML	MH	MH	MH	MH
Características de compactación Proctor estándar (ASTM D698-12)						
W _{opt} (%)	25.5	23.0	45.0	46.5	69.5	68.5
γ _{dmax} (kN/m ³)	13.9	12.68	10.7	10.53	8.31	8.18

Como se puede observar de la tabla anterior, el Índice de Plasticidad (IP) se reduce poco al adicionar el óxido de calcio; para el suelo dos, el IP se incrementa ligeramente. A pesar de adicionar óxido de calcio a los suelos, estos mantienen la misma clasificación SUCS que los suelos naturales.

Otro aspecto importante de los suelos es la granulometría. Las Figuras 3.1, 3.2 y 3.3 muestran las curvas granulométricas de los tres suelos, así como la fotografía de la granulometría del suelo que se retiene en la malla No. 200.

Las curvas indican que los suelos están conformados en su mayor parte por suelo que pasa la malla No. 200. Además, las fotografías de las arenas muestran materiales muy diferentes en cada suelo. Mientras el suelo uno muestra arenas color claro, el suelo dos tiene arenas oscuras. Por su parte, el suelo tres presenta filamentos color blanco (Figura 3.3b y c); los cuales, al colocarse en ácido, se puede

observar que son filamentos de plantas que al parecer están petrificadas (Figura 3.3c).

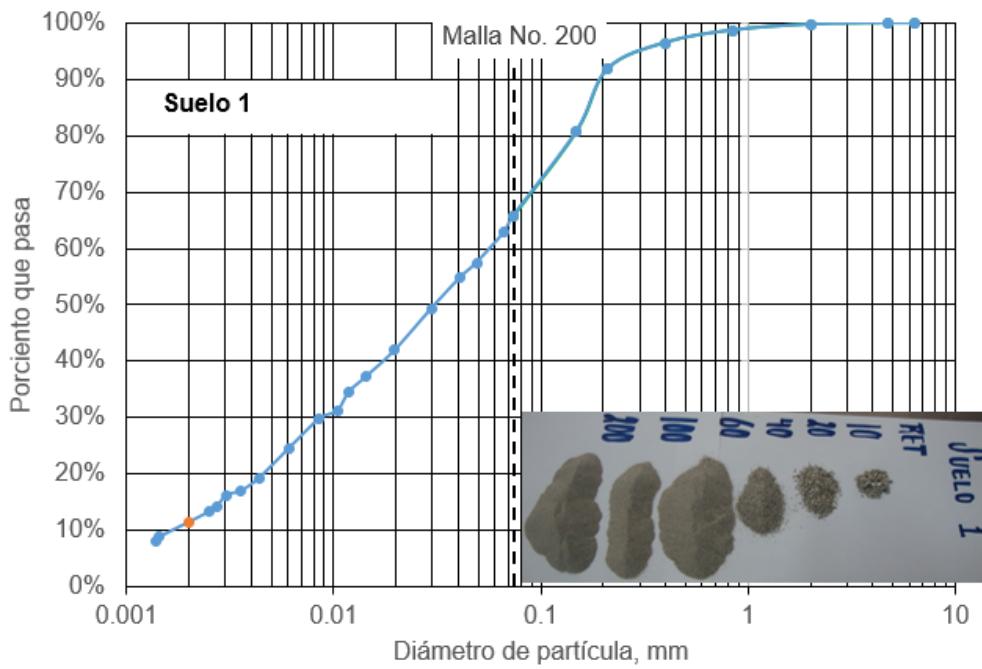


Figura 3.1. Curva granulométrica del suelo 1 y fotografía del material retenido en malla No. 200

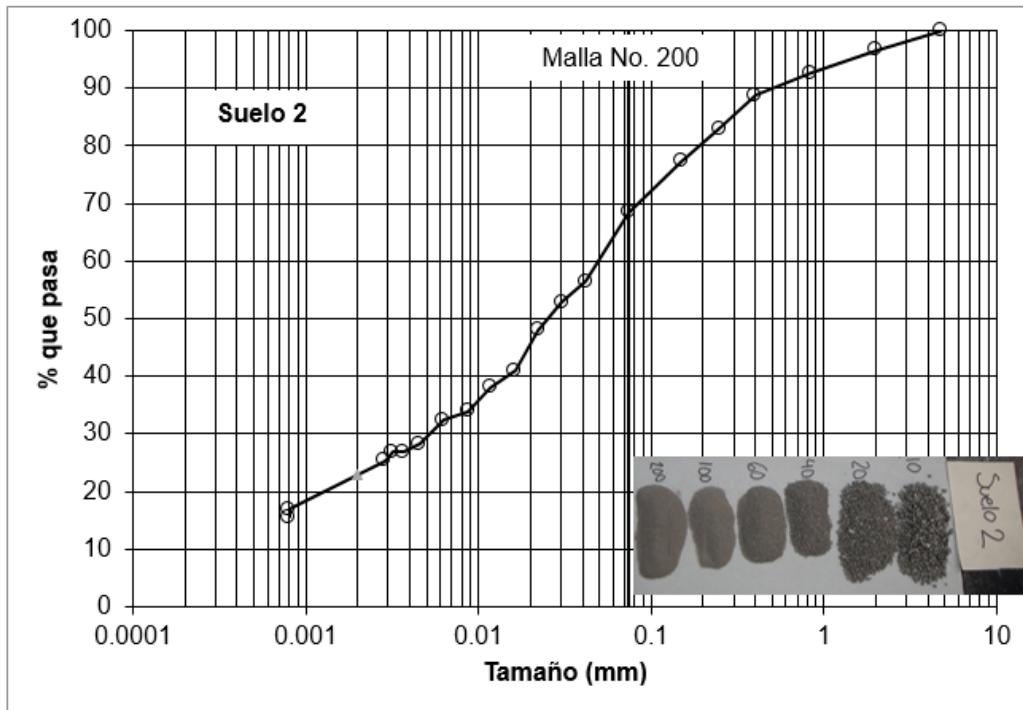


Figura 3.2. Curva granulométrica del suelo 2 y fotografía del material retenido en malla No. 200

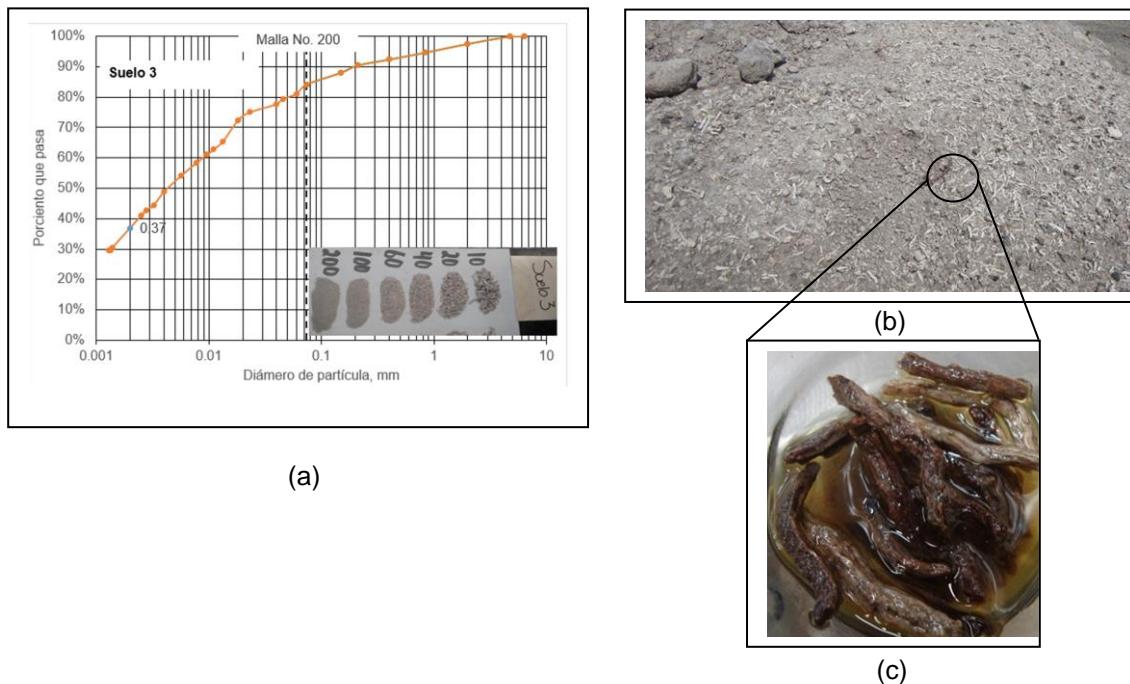


Figura 3.3. Curva granulométrica del suelo 3 y fotografía del material retenido en malla No. 200.

De acuerdo con las gráficas anteriores, y considerando que la arcilla está definida como el material con tamaño de partícula menor a 0.002 mm, los suelos contienen los porcentajes de arcilla indicados en la Tabla 3.2.

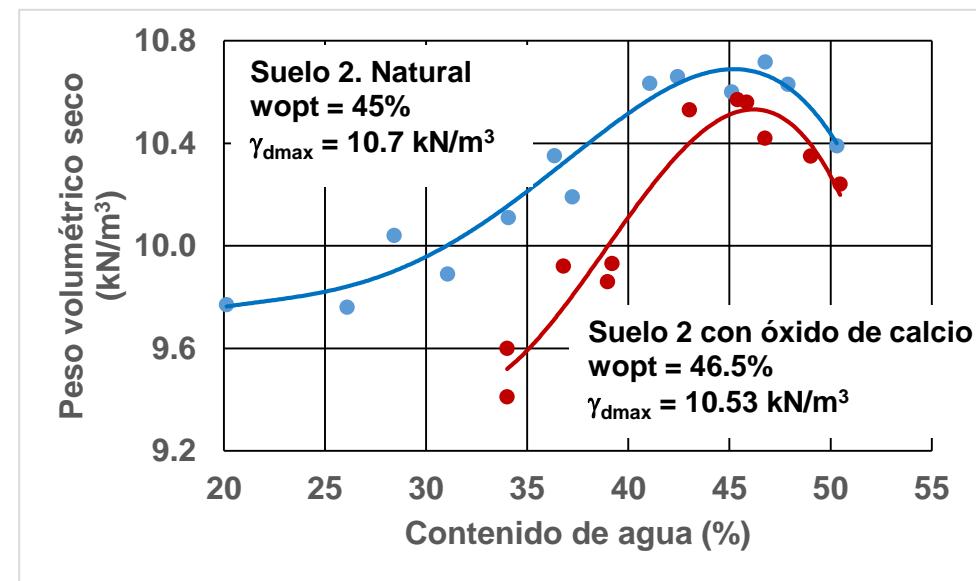
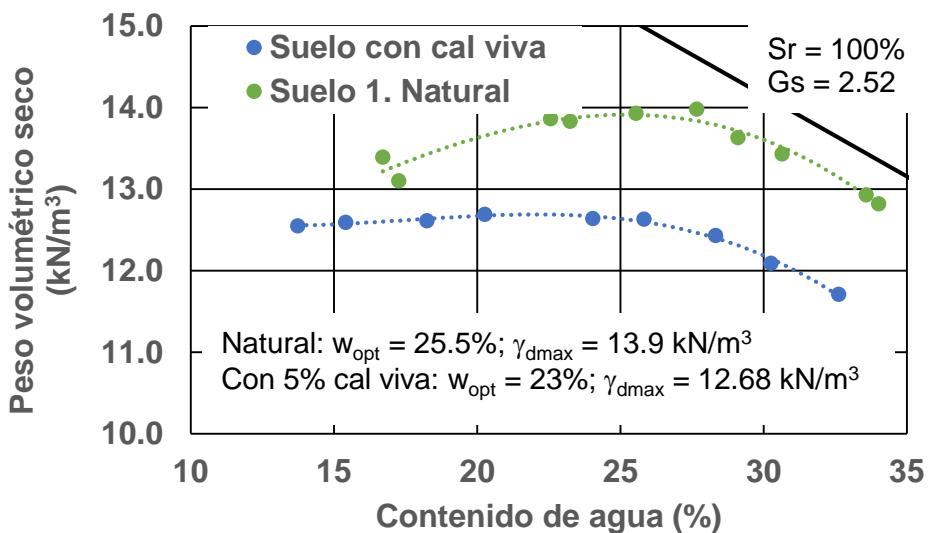
Tabla 3.2 Cantidad de arcilla de los suelos

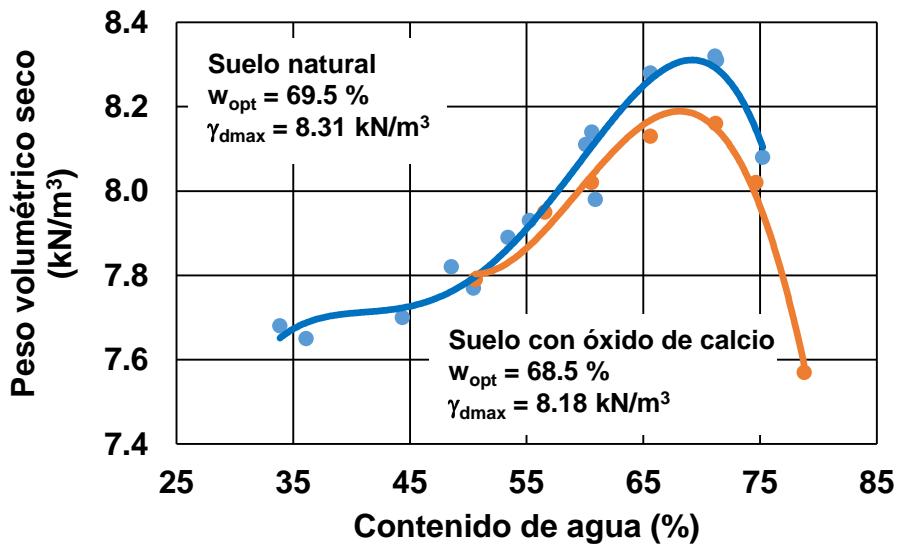
Suelo	Arcilla (%)
1	11.5
2	23
3	37

3.2. Características de compactación

Con respecto a las curvas de compactación, la Figura 3.4 muestra las curvas de los tres suelos. De acuerdo con los datos obtenidos de humedad óptima y peso volumétrico seco máximo de los suelos con y sin óxido de calcio, se observa que los suelos son completamente diferentes como ya se observó en las granulometrías.

Para poder ver estas diferencias en una forma más contundente, las seis curvas de compactación se colocaron en una sola gráfica como lo indica la Figura 3.5. Esta figura ilustra que los suelos dos y tres presentan los pesos volumétricos secos más bajos.





(c) Suelo 3

Figura 3.4. Curvas de compactación de los suelos naturales y con óxido de calcio

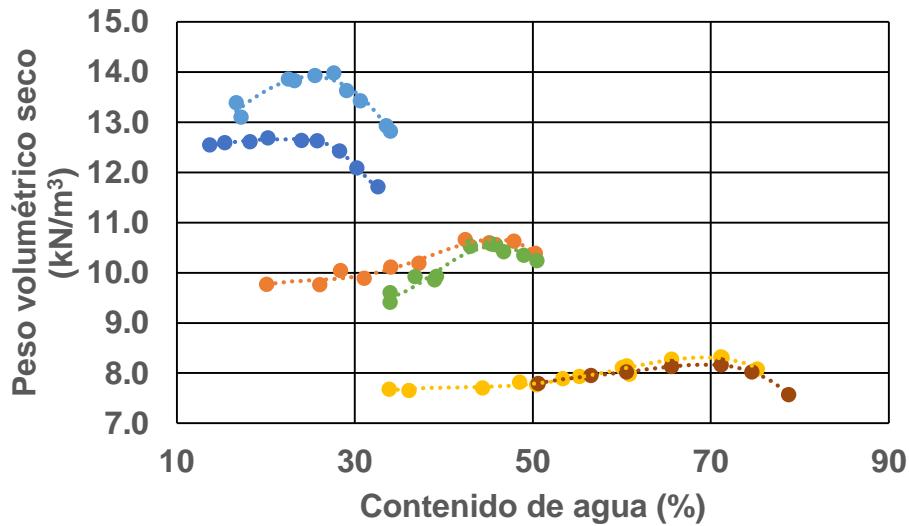


Figura 3.5. Curvas de compactación de los suelos con y sin óxido de calcio

3.3. California Bearing Ratio (CBR)

Las pruebas de CBR mostraron los resultados de las Figura 3.6, 3.7 y 3.8.

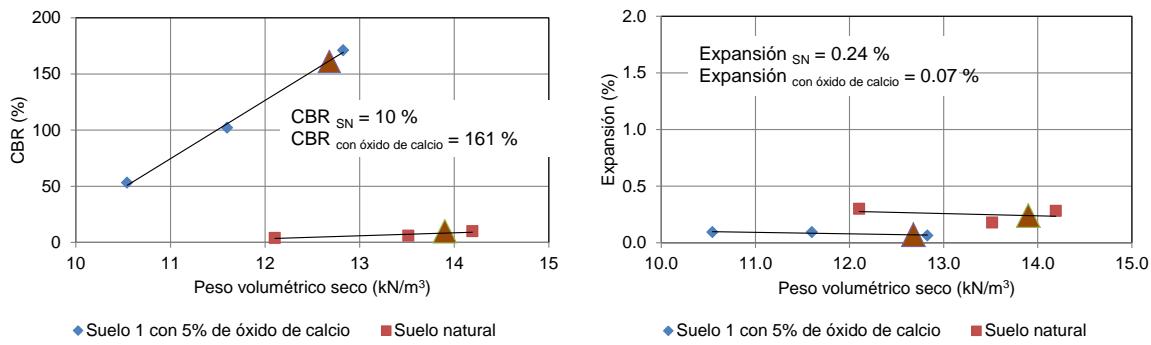


Figura 3.6. CBR y expansión libre del suelo 1

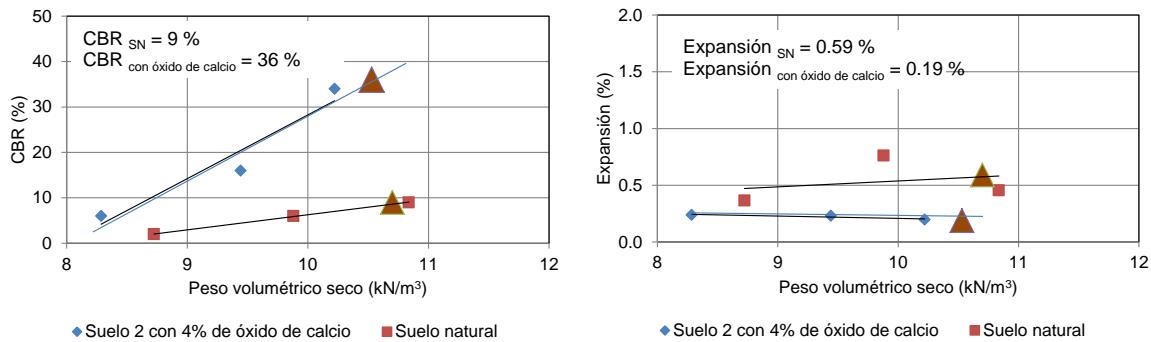


Figura 3.7. CBR y expansión libre del suelo 2

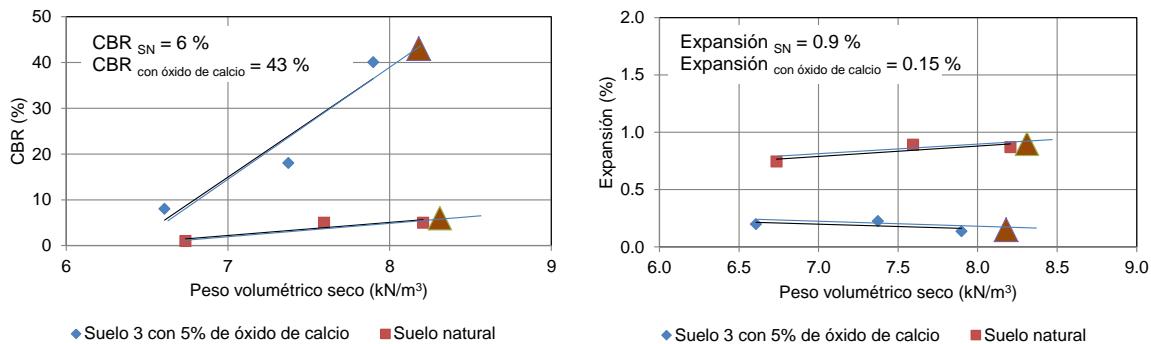


Figura 3.8. CBR y expansión libre del suelo 3

De las gráficas anteriores se observa que el óxido de calcio mejora el CBR y reduce la expansión. De hecho, el CBR se incrementa 15, 3 y 6 veces para el suelo 1, 2 y 3, respectivamente. En cuanto a expansión libre, ésta se reduce 71, 68 y 83%, para el suelo 1, 2 y 3, respectivamente. Cabe señalar que, con respecto a estos dos parámetros, los suelos estabilizados se ven beneficiados de forma importante cuando son estabilizados con óxido de calcio.

La Figura 3.9 muestra de forma más clara el comportamiento del CBR y la expansión de los suelos con y sin óxido de calcio.

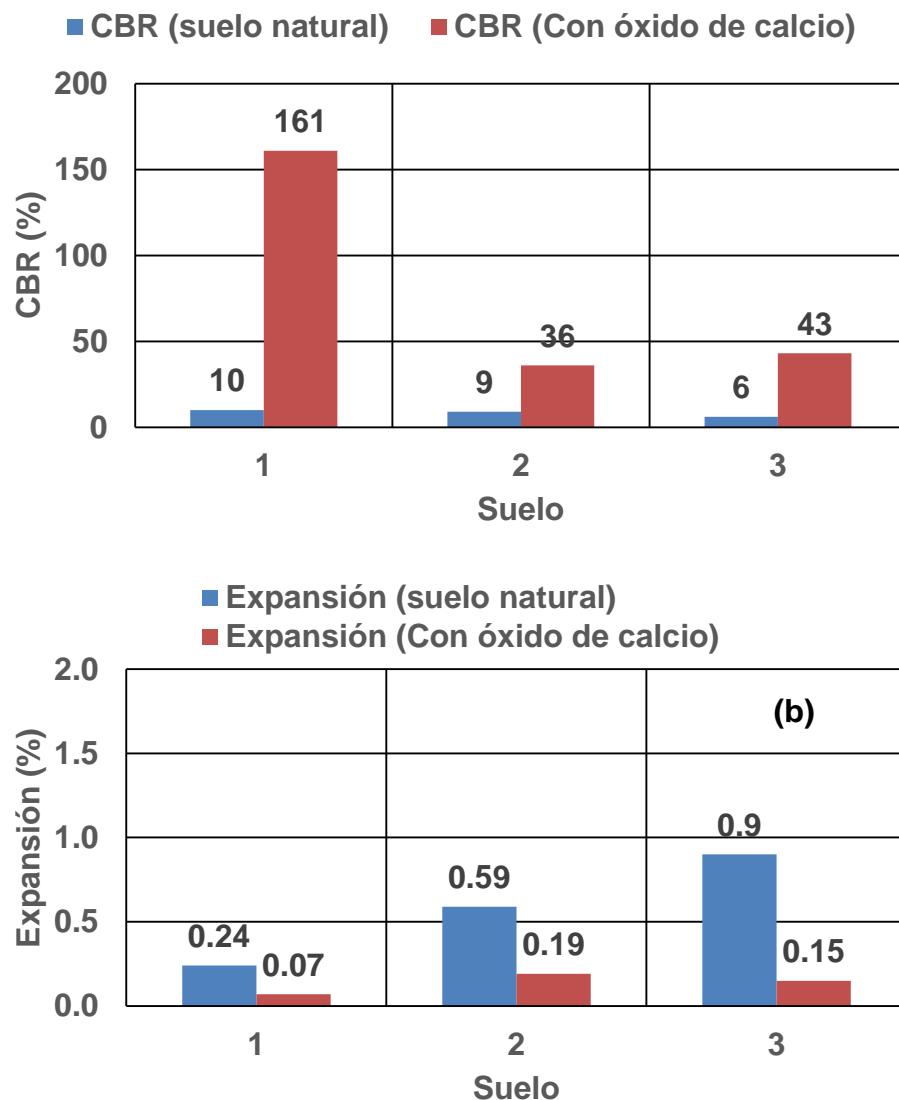


Figura 3.9. Resumen de CBR y expansión de los suelos en estudio

3.4. Resistencia en compresión simple

La resistencia en compresión simple es otra de las pruebas que se llevan a cabo relativamente en un tiempo corto y que proporciona idea de la interacción suelo-aditivo. En esta investigación, la resistencia en compresión simple se determinó en muestras con los siguientes tiempos de curado:

- Especímenes ensayados después de compactarse (con y sin óxido de calcio)
- Especímenes almacenados 7, 14, 28 días (con y sin óxido de calcio) (nomenclatura: 7A, 14A y 28A),

- Especímenes secados 7, 14, 28 días (con y sin óxido de calcio). Estos especímenes se almacenaron 14 días después del secado (nomenclatura: 7S-14A, 14S-14A y 28S-14A).
- Especímenes que se almacenaron 7, 14 o 28 días. Posterior al almacenamiento, se humedecen 14 días. Después del humedecimiento se almacenaron nuevamente 14 días antes de ensayarse (nomenclatura: 7A-14H-14A, 14A-14H-14A y 28A-14H-14A).

Con respecto a las muestras que se almacenaron, se observa que, por un lado, la resistencia en compresión simple se incrementa con el tiempo de almacenamiento, esto para los tres suelos. Sin embargo, la efectividad del óxido de calcio en los tres suelos es diferente. Por ejemplo, en el suelo 1, la resistencia se incrementó 7, 8 o 6.5 veces cuando el suelo tiene óxido de calcio; esto para tiempos de almacenamiento de 7, 14 y 28, respectivamente. Para el suelo 2, la resistencia se incrementó en promedio 2 veces para el suelo con óxido de calcio; el suelo 3 presentó al igual, un incremento de 2.4 en promedio (Figura 3.10).

Algunos aditivos requieren que posterior al mezclado y compactación, se permita tiempo de secado. Aun cuando el óxido de calcio parece no requerir este proceso, el protocolo de evaluación de aditivos utilizado en el IMT indica que se lleven a cabo estas pruebas. Para este caso, los resultados de resistencia indicaron nuevamente que a medida que el tiempo de secado se incrementa, la resistencia también aumenta. Sin embargo, nuevamente en esta condición, se ve un efecto muy marcado del óxido de calcio en el suelo 1; la resistencia de los suelos 2 y 3 también aumenta, pero en menor grado (Figura 3.11).

Otro de los factores que inciden de forma importante en la resistencia de los suelos, es la variación del contenido de agua. Para evaluar esta variable, algunas muestras se almacenaron durante 7, 14 o 28 días. Posterior al almacenamiento, se humedecieron por capilaridad durante 14 días. Cabe hacer notar que el humedecimiento se realiza por ambas caras de los cilindros. Se humedecen 7 días por cada cara. Asimismo, las muestras se envuelven en plástico posterior al humedecimiento y se permiten otros 14 días de almacenamiento para que el agua que absorbieron se distribuya en todo el espécimen.

La Figura 3.12 muestra los resultados de esta condición. Las gráficas indican, por un lado, que los suelos naturales, pierden la mayor parte de su resistencia cuando absorben agua. Sin embargo, cuando los suelos tienen óxido de calcio, al parecer el humedecimiento tiene un efecto benéfico, puesto que en los suelos 1 y 2, la resistencia es mayor si se compara con la que tienen los especímenes que solo se almacenaron. La excepción es el suelo 3 que en promedio pierde un 12% de su resistencia cuando el suelo absorbe agua aun cuando éste fue estabilizado con óxido de calcio.

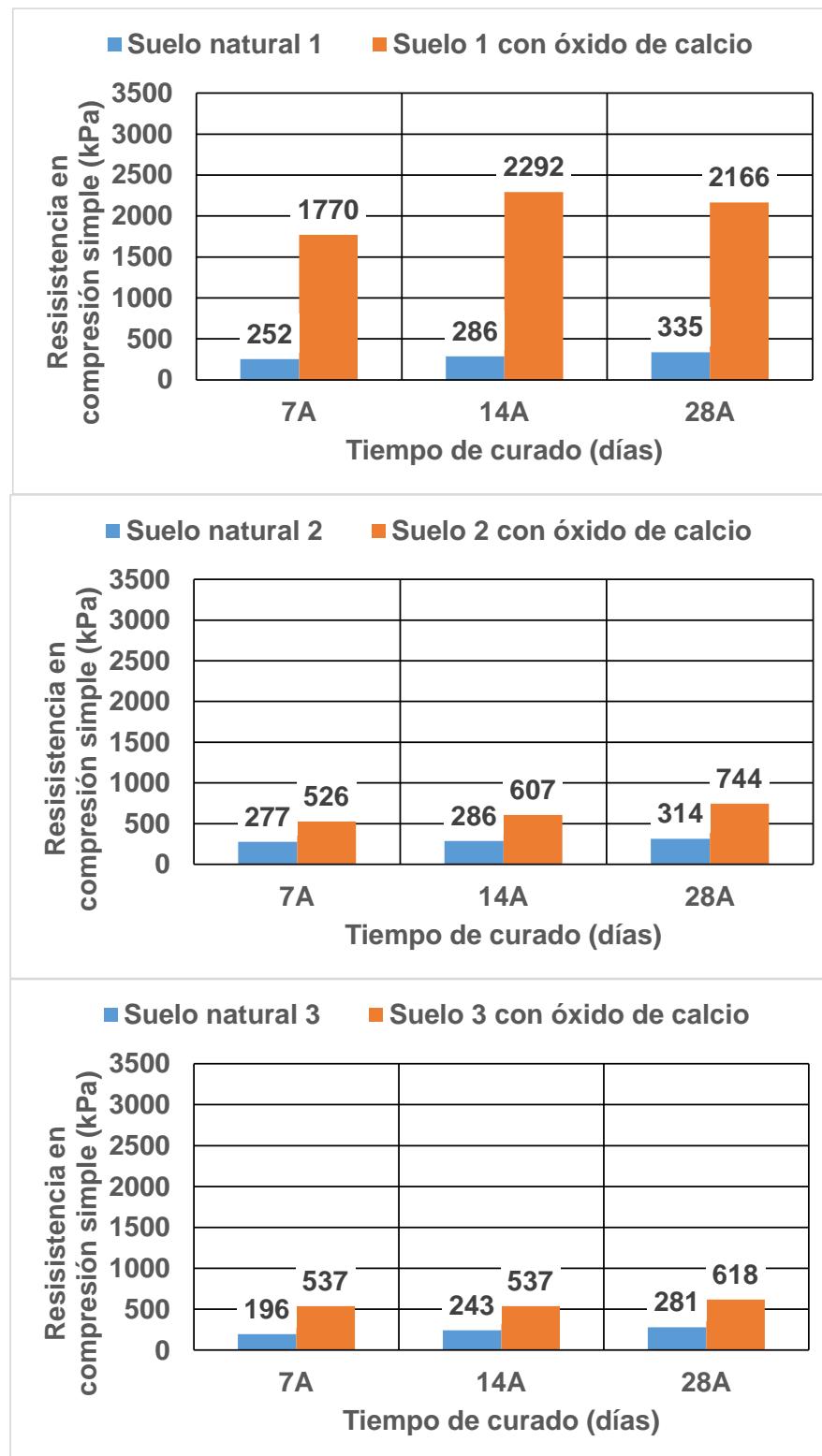


Figura 3.10. Resistencia en compresión simple de las muestras que se almacenaron

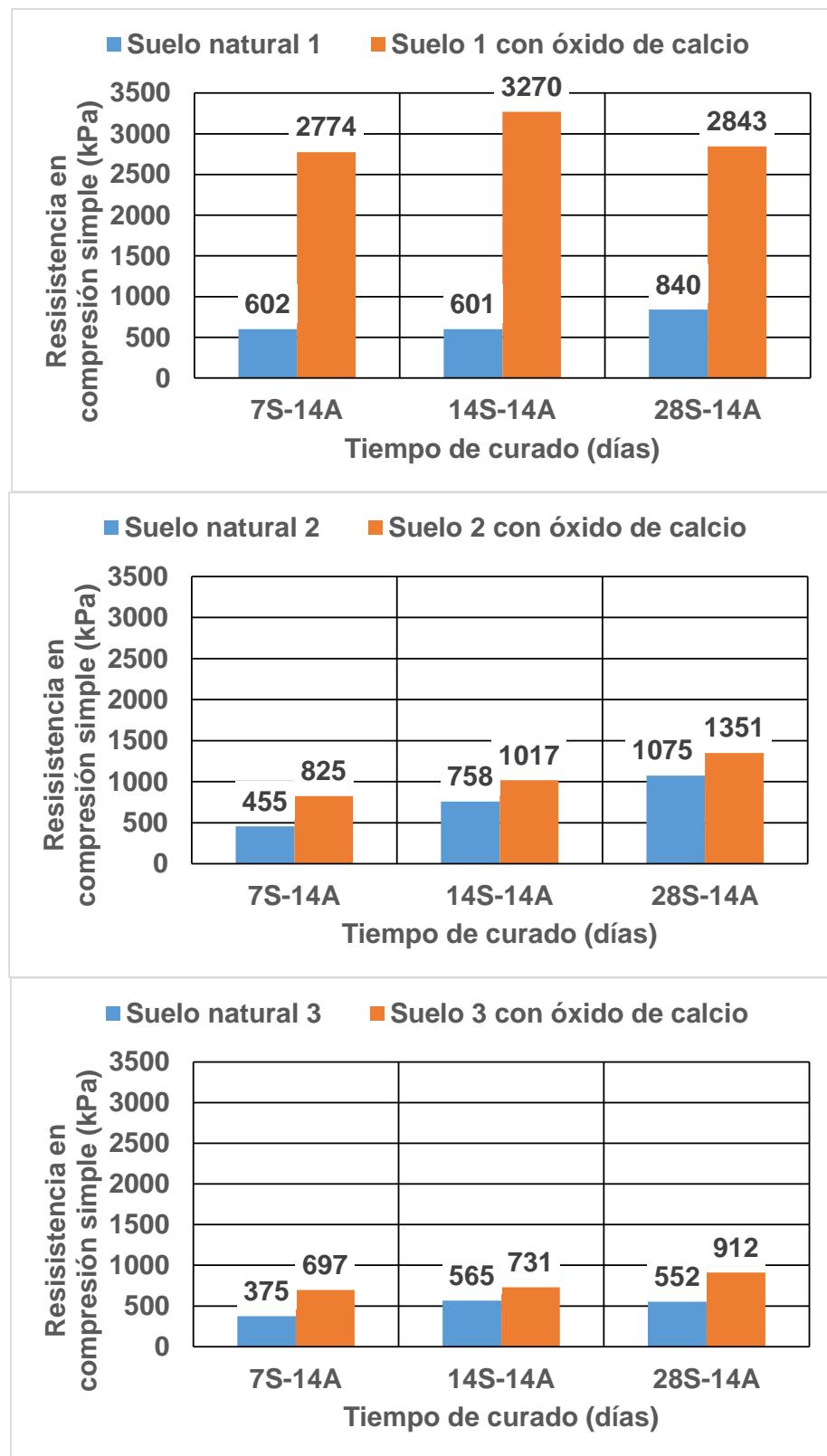


Figura 3.11. Resistencia en compresión simple de muestras que se secan durante 7, 14 o 28 días

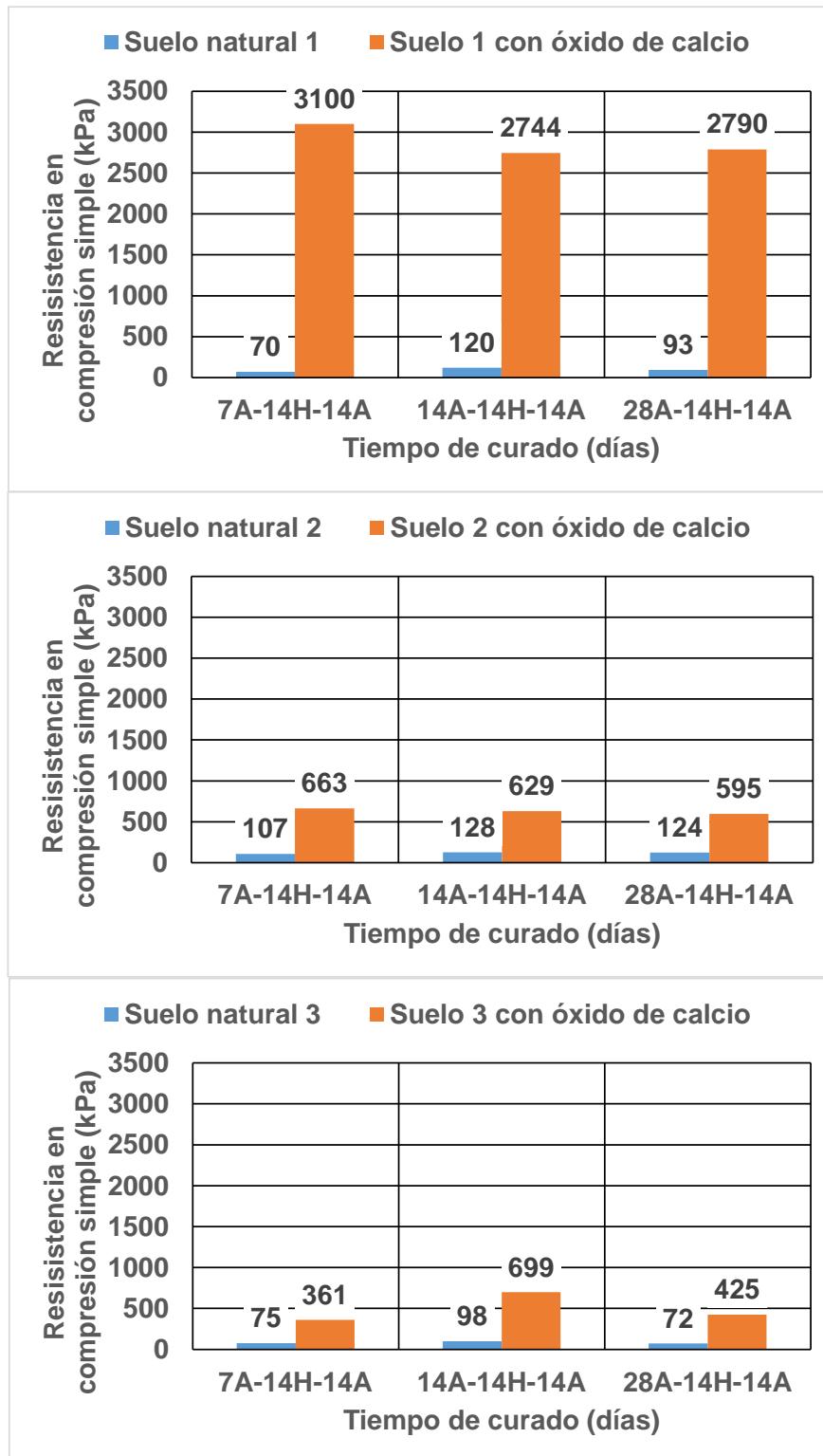


Figura 3.12. Resistencia en compresión simple de muestras que se almacenan durante 7, 14 o 28 días y posteriormente se humedecieron durante 14 días

3.5. Módulo de resiliencia

El módulo de resiliencia es uno de los parámetros que se requieren en el diseño de pavimentos. Por esto, el protocolo de evaluación de aditivos indica obtenerlo para diferentes condiciones de curado. En este estudio se consideraron las siguientes condiciones:

- Muestras almacenadas durante 7, 14 o 28 días (nomenclatura: 7A, 14A y 28A),
- Muestra secadas durante 7, 14 o 28 días. Posterior al secado, las muestras se envolvieron en plástico y se almacenaron durante 14 días (nomenclatura: 7S-14A; 14S-14A y 28S-14A),
- Muestras almacenadas durante 7, 14, o 28 días. Posterior al almacenamiento, se humedecieron 14 días. Después del humedecimiento, las muestras se almacenaron 14 días (nomenclatura: 7A-14H-14A; 14A-14H-14A y 28A-14H-14A).

En las Figuras 3.13, 3.14 y 3.15 se resumen los resultados de módulo de resiliencia de las muestras que se almacenaron durante 7, 14 o 28 días (para suelo con y sin óxido de calcio). En estas figuras se observa que cuando los suelos son estabilizados con óxido de calcio, los módulos de resiliencia se incrementan. Sin embargo, como ya se notó en la resistencia a compresión simple, los módulos de resiliencia también indican que el suelo uno es el que presenta el mayor beneficio al haberse estabilizado con óxido de calcio.

Las gráficas ilustran que una prueba de módulo de resiliencia proporciona 16 valores, que corresponden a los diferentes estados de esfuerzo bajo los cuales se realiza la prueba. Para ver de una forma más precisa el efecto del óxido de calcio, en la Figura 3.16 se graficaron solo módulos de resiliencia obtenidos para la presión confinante de 14 kPa y un esfuerzo desviador de 97 kPa. En esta forma, se ve que el módulo de resiliencia del suelo uno con óxido de calcio es cuatro veces más que el del suelo natural; esto en general para los tres tiempos de curado. En los casos del suelo dos y tres, los módulos de resiliencia del suelo con óxido de calcio se incrementan alrededor de tres y cuatro veces, respectivamente.

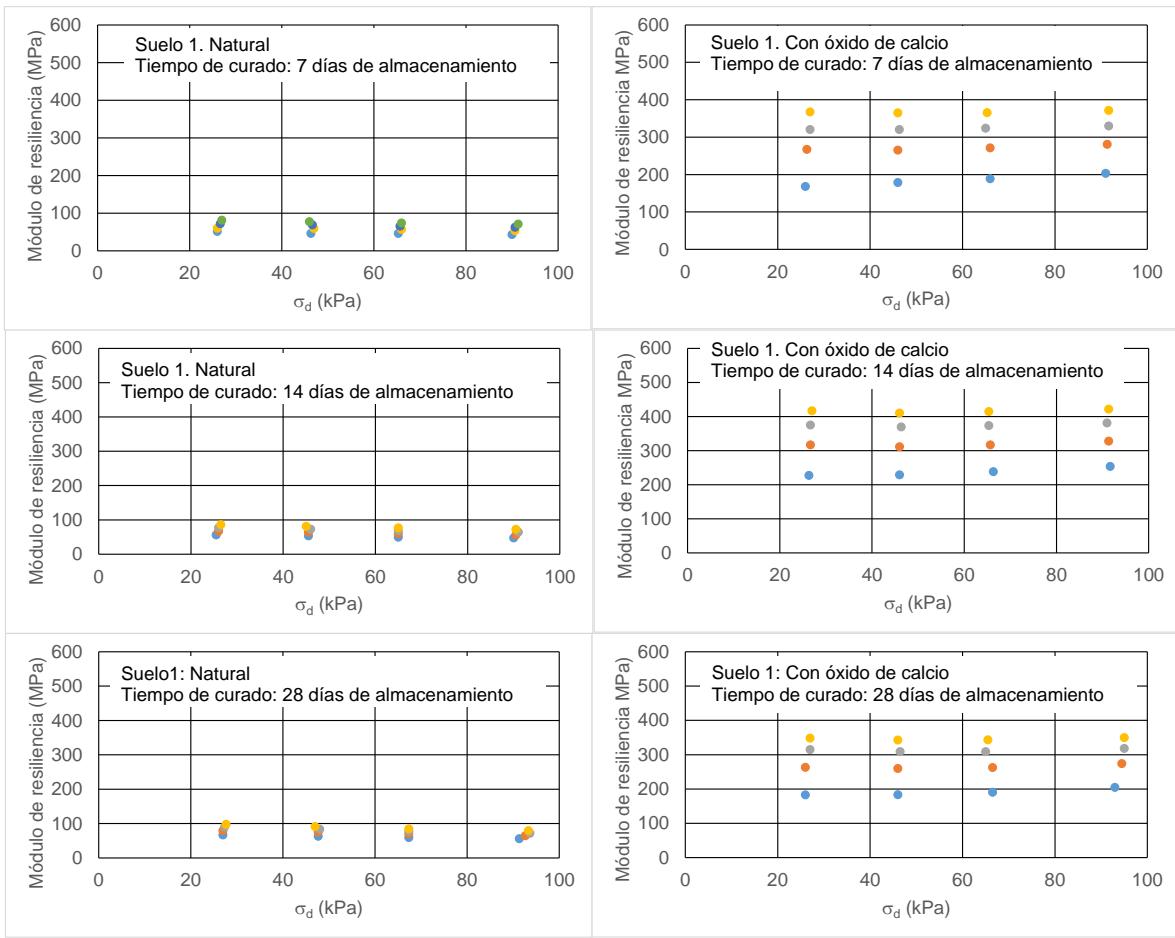


Figura 3.13. Módulo de resiliencia del suelo 1 con y sin óxido de calcio. Para 7, 14 y 28 días de almacenamiento

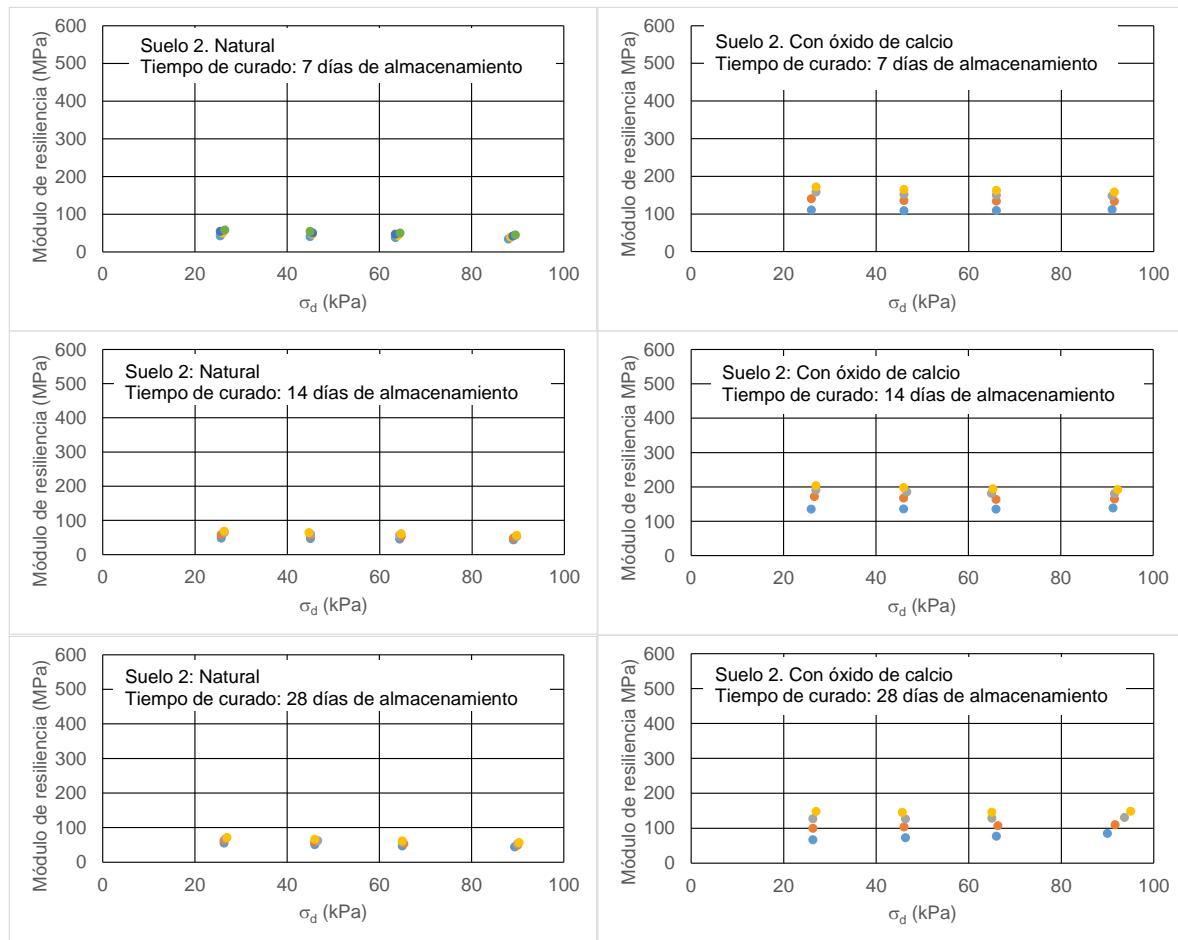


Figura 3.14. Módulo de resiliencia del suelo 2 con y sin óxido de calcio. Para 7, 14 y 28 días de almacenamiento

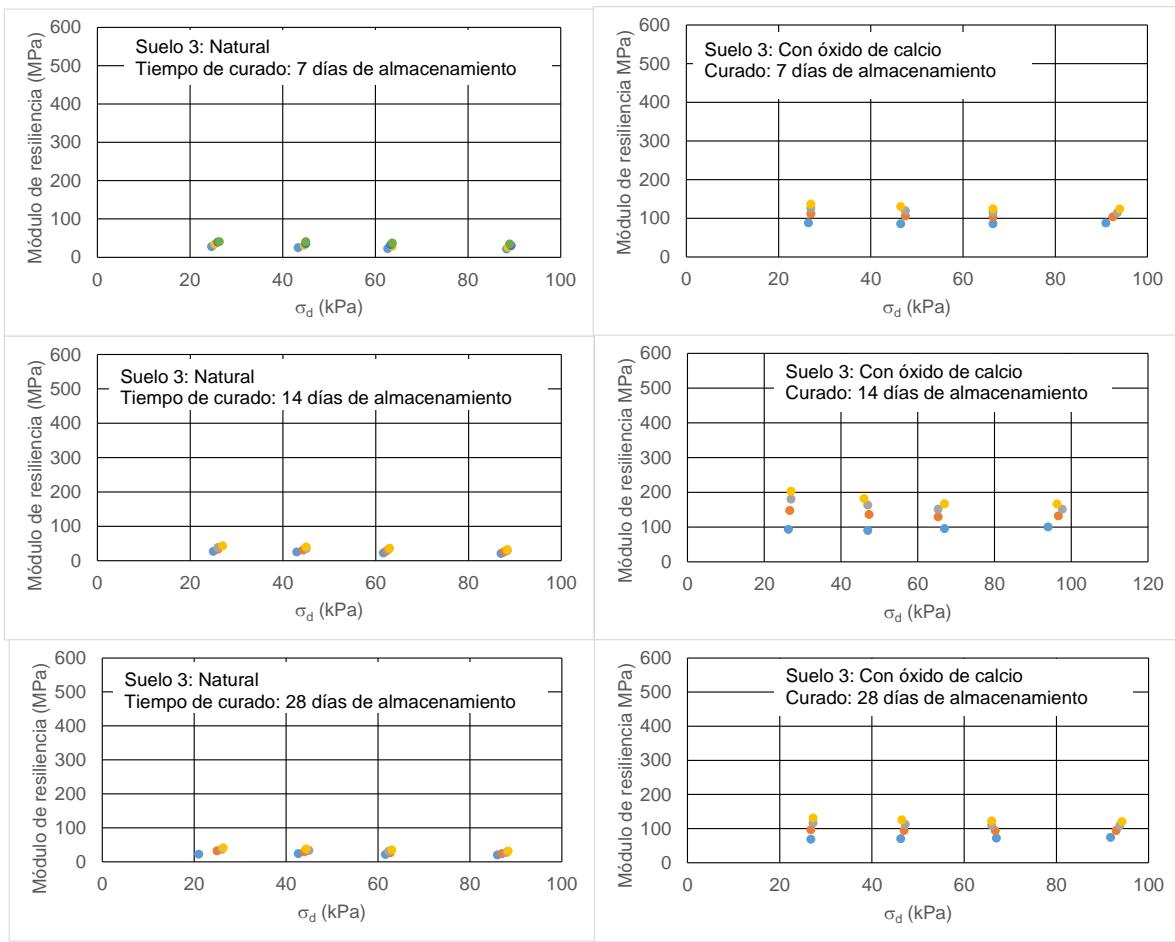


Figura 3.15. Módulo de resiliencia del suelo 3 con y sin óxido de calcio. Para 7, 14 y 28 días de almacenamiento

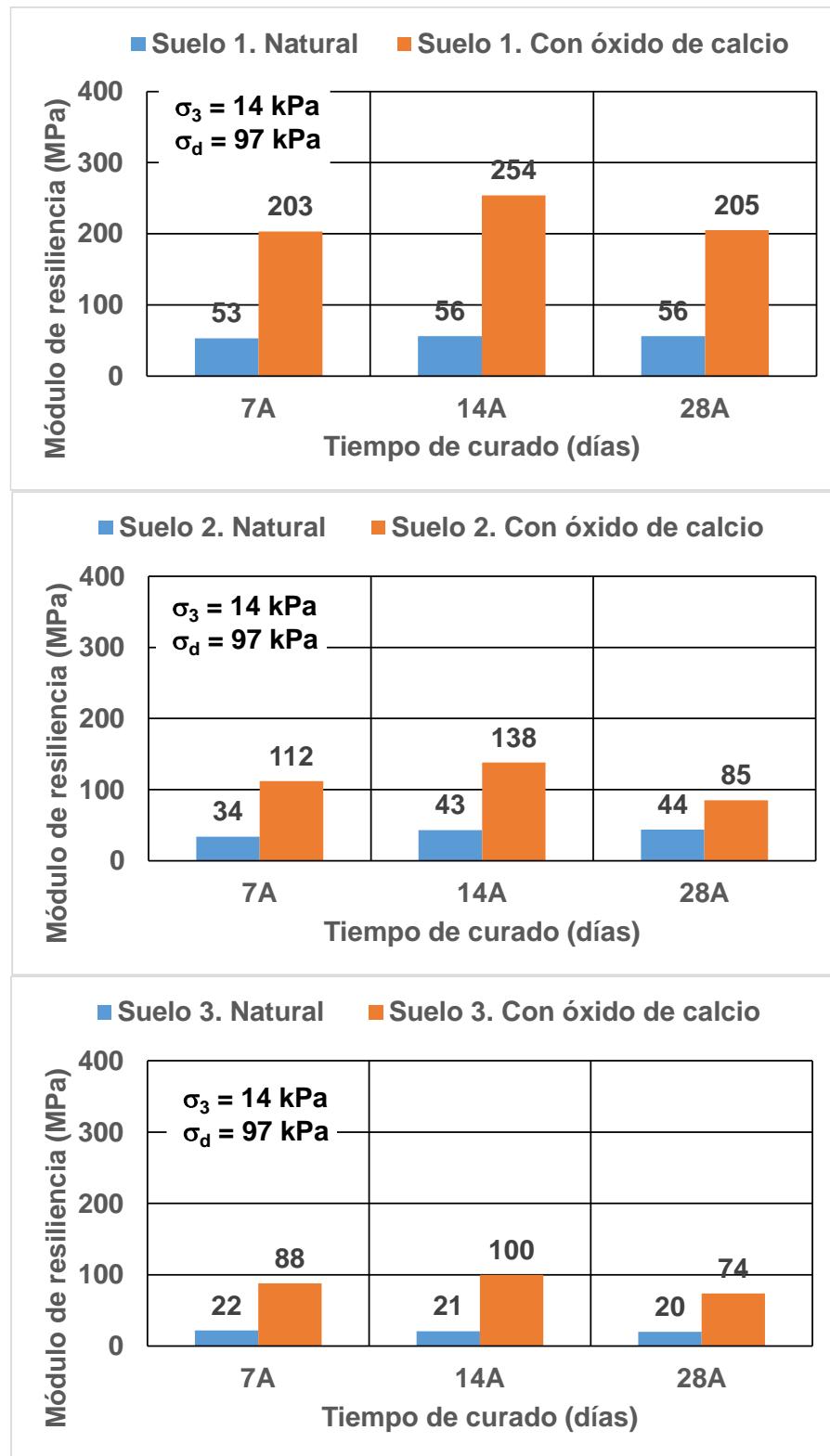


Figura 3.16. Módulo de resiliencia para muestras que se almacenaron 7, 14 o 28 días (con y sin óxido de calcio)

Las Figuras 3.17, 3.18 y 3.19 muestran las gráficas de módulo de resiliencia de los especímenes que se secaron (con y sin óxido de calcio). En estas figuras nuevamente se observa que los módulos de resiliencia de los especímenes con óxido de calcio son mayores que los del suelo natural. Al graficarse sólo los valores de módulo de resiliencia para una presión de confinamiento de 14 kPa y un esfuerzo desviador de 97 kPa, se observa que un mayor tiempo de secado no necesariamente proporciona mayores módulos de resiliencia, más bien, parecería, que el módulo tiende a mantenerse en un valor similar para los tres tiempos de secado (esto para los tres suelos). Por otro lado, los incrementos que se presentan en módulo de resiliencia de los especímenes con óxido de calcio son 3.5, 1.5 y 1.4 veces para el suelo uno (para 7, 14 y 28 días de secado, respectivamente). Para el suelo 2 los incrementos de módulo son de 1.6, 1.1 y 1.2. En el suelo 3, los incrementos de módulo de resiliencia en el suelo con óxido de calcio son de 1.5, 1.3, y 2.2 (Figura 3.20). Nuevamente, en esta condición se ve un mayor efecto del óxido de calcio en el suelo 1.

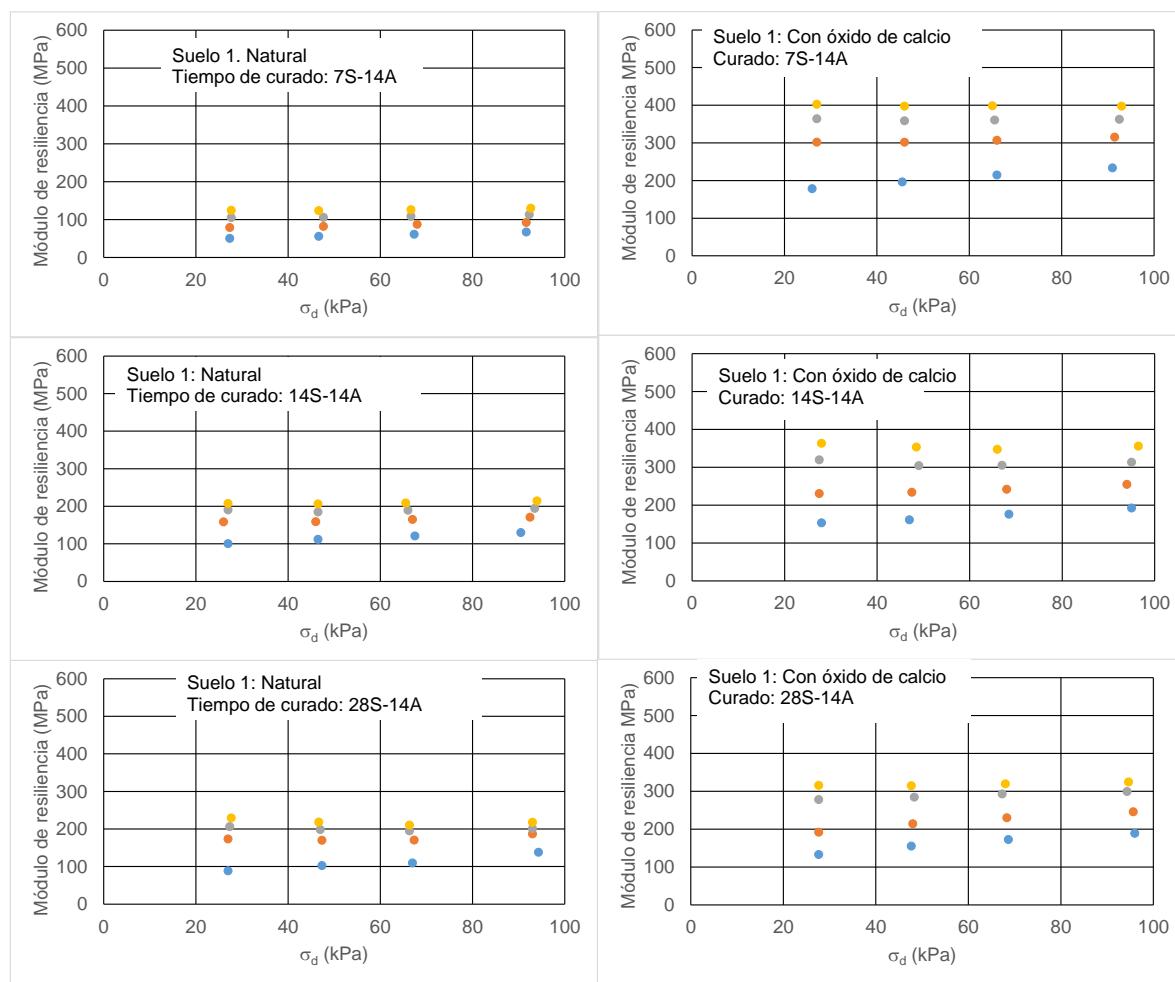


Figura 3.17. Módulo de resiliencia del suelo 1 con y sin óxido de calcio. Para 7, 14 y 28 días de secado

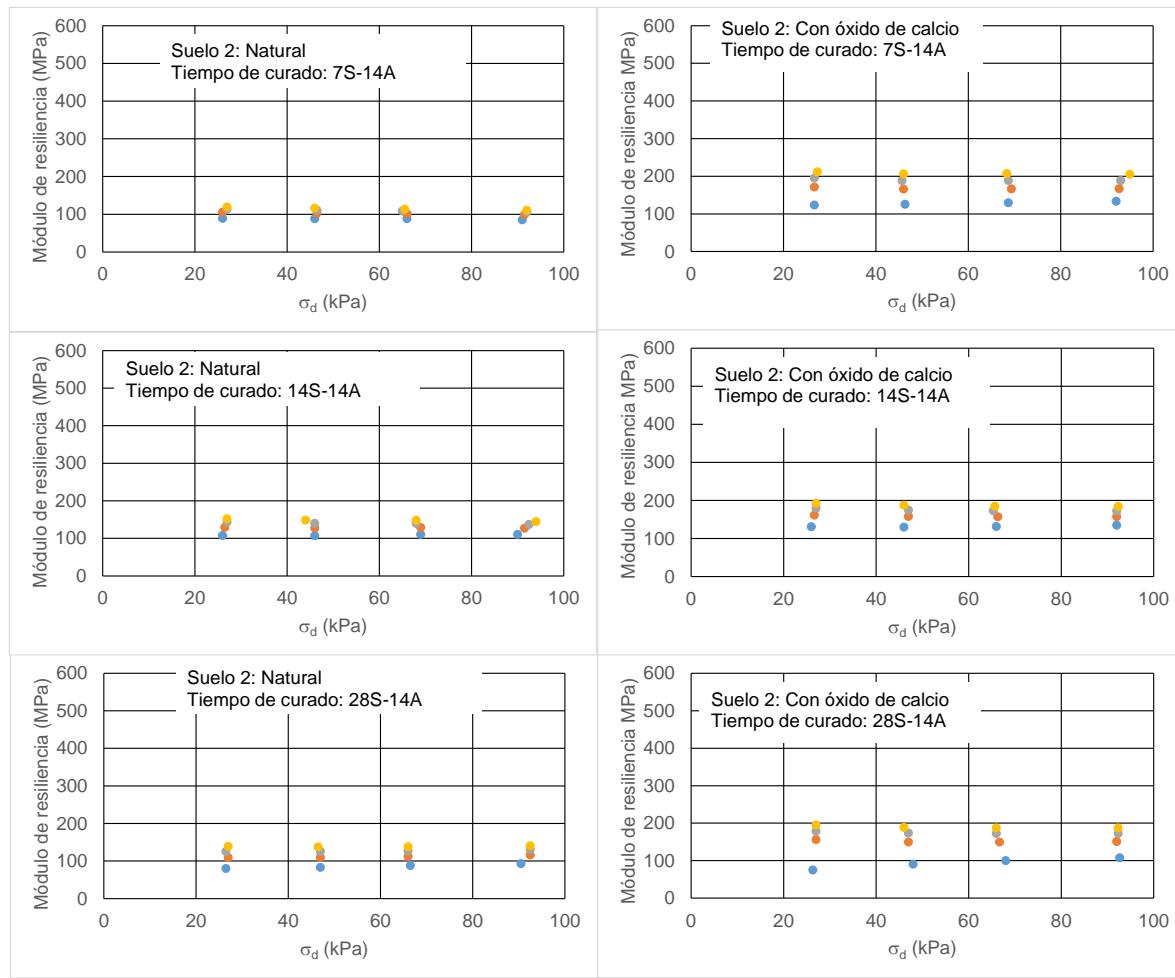


Figura 3.18. Módulo de resiliencia del suelo 2 con y sin óxido de calcio. Para 7, 14 y 28 días de secado

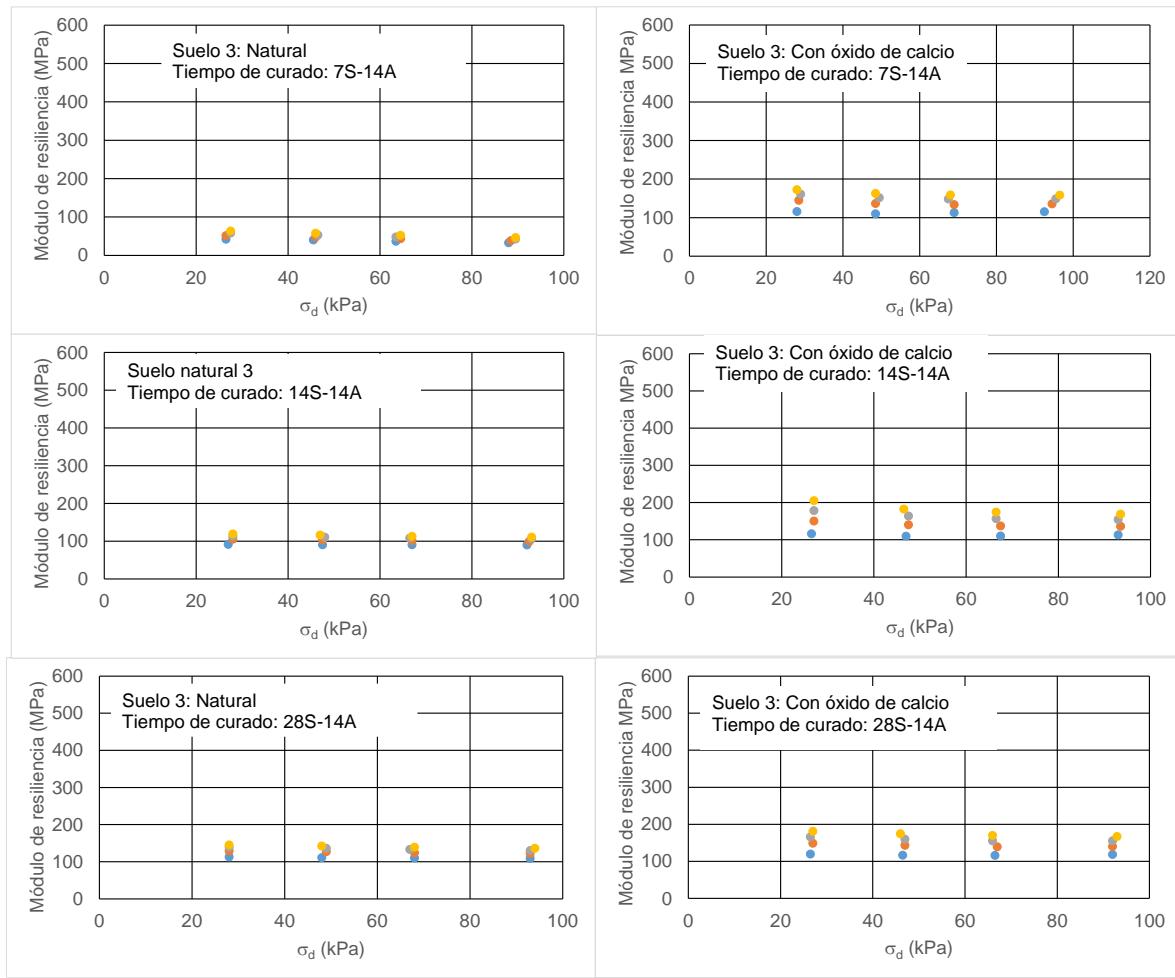


Figura 3.19. Módulo de resiliencia del suelo 3 con y sin óxido de calcio. Para 7, 14 y 28 días de secado

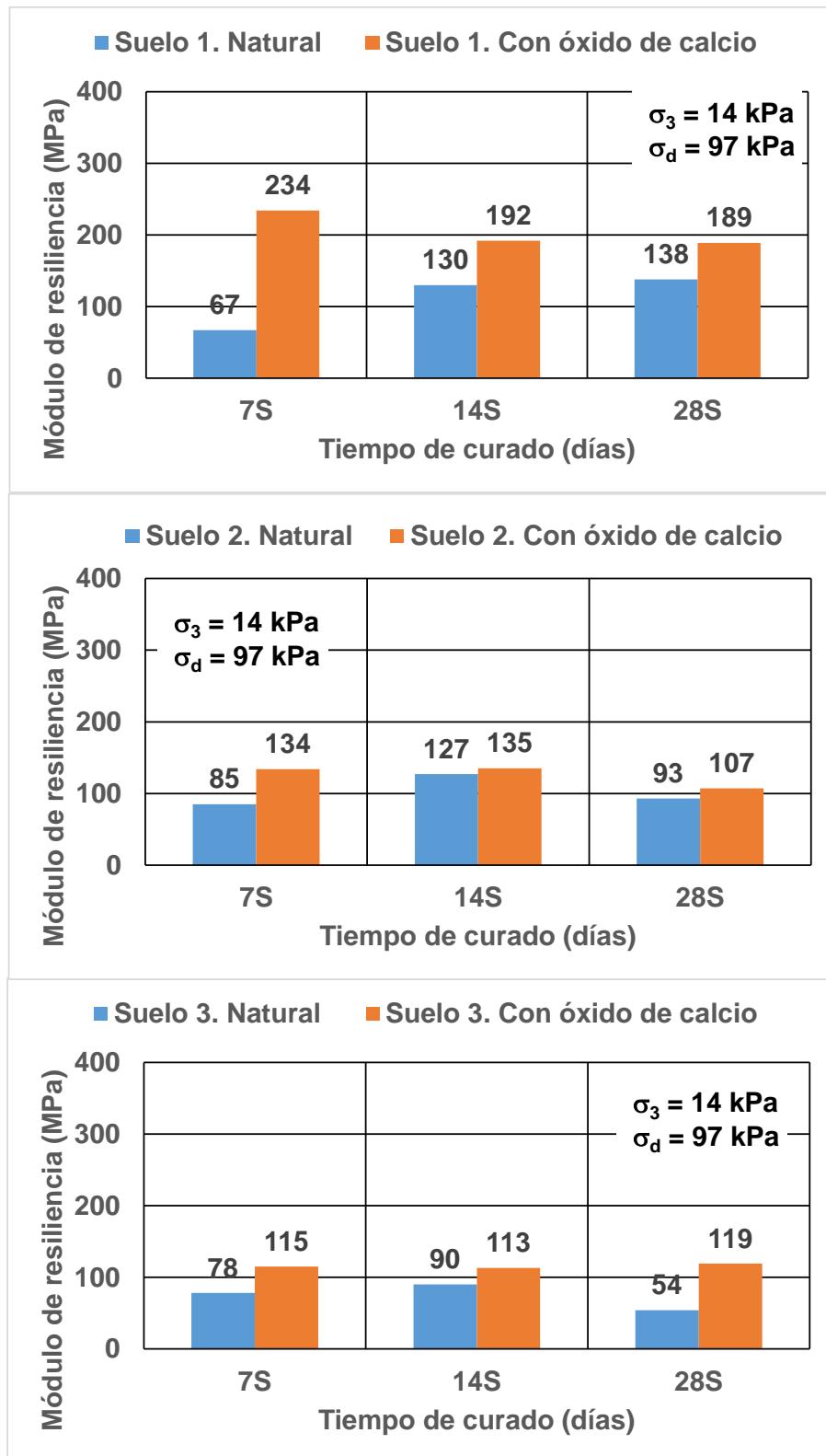


Figura 3.20. Módulo de resiliencia de los tres suelos para especímenes secados durante 7, 14 y 28 días

Las Figuras 3.21, 3.22 y 3.23, muestran las gráficas de módulo de resiliencia de los especímenes que se almacenaron y posteriormente se humedecieron. Estas gráficas indican que mientras los suelos naturales reducen de forma importante su módulo de resiliencia, los suelos con óxido de calcio mantienen su rigidez (en términos de módulo de resiliencia). La Figura 3.24, solo resume los módulos de resiliencia para una presión de confinamiento de 14 kPa y esfuerzo desviador de 69 kPa. En las gráficas de esta figura nuevamente se observa el aporte del óxido de calcio en los módulos de resiliencia. También se nota que el suelo uno se ve más beneficiado con este aditivo.

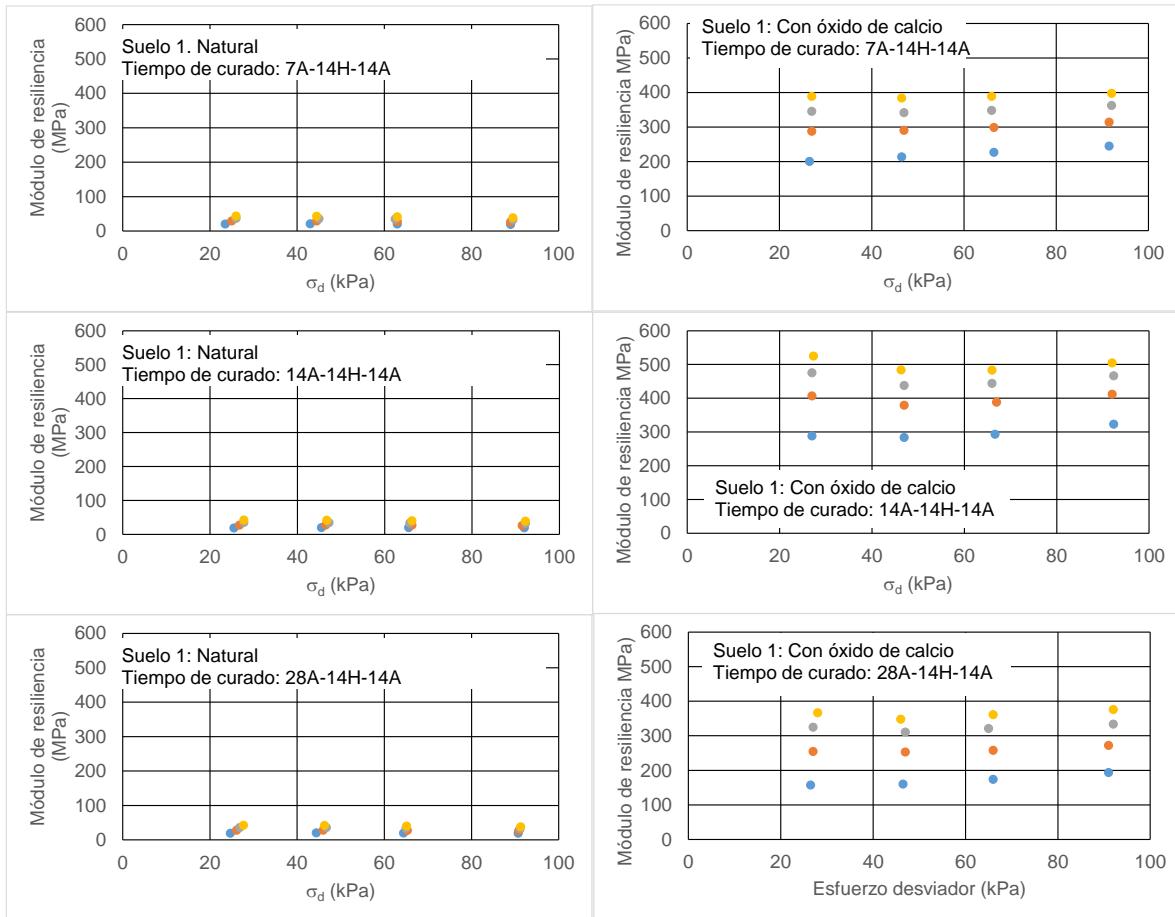


Figura 3.21. Módulo de resiliencia del suelo 1 con y sin óxido de calcio. Para 7, 14 y 28 días de almacenamiento-14 días de humedecimiento y 14 días de almacenamiento

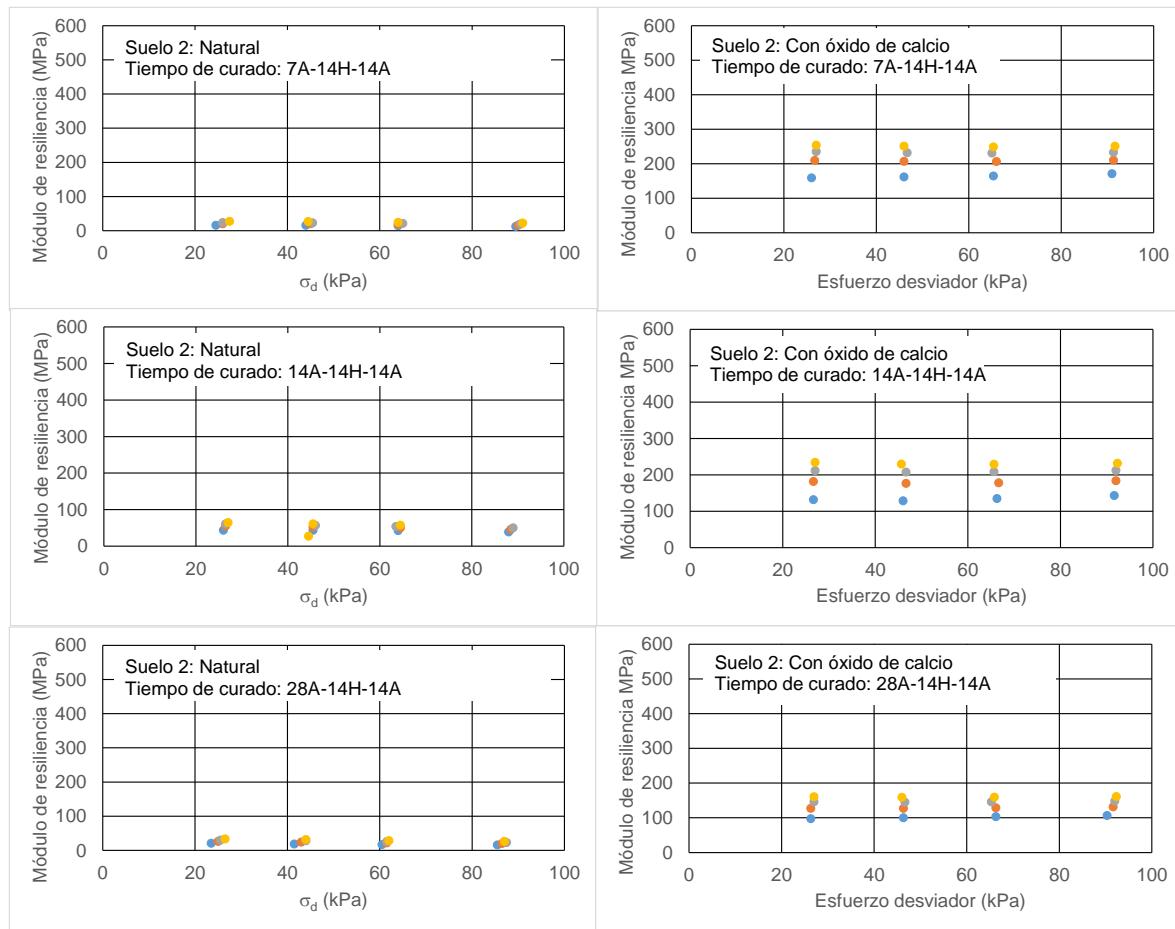


Figura 3.22. Módulo de resilencia del suelo 2 con y sin óxido de calcio. Para 7, 14 y 28 días de almacenamiento-14 días de humedecimiento y 14 días de almacenamiento

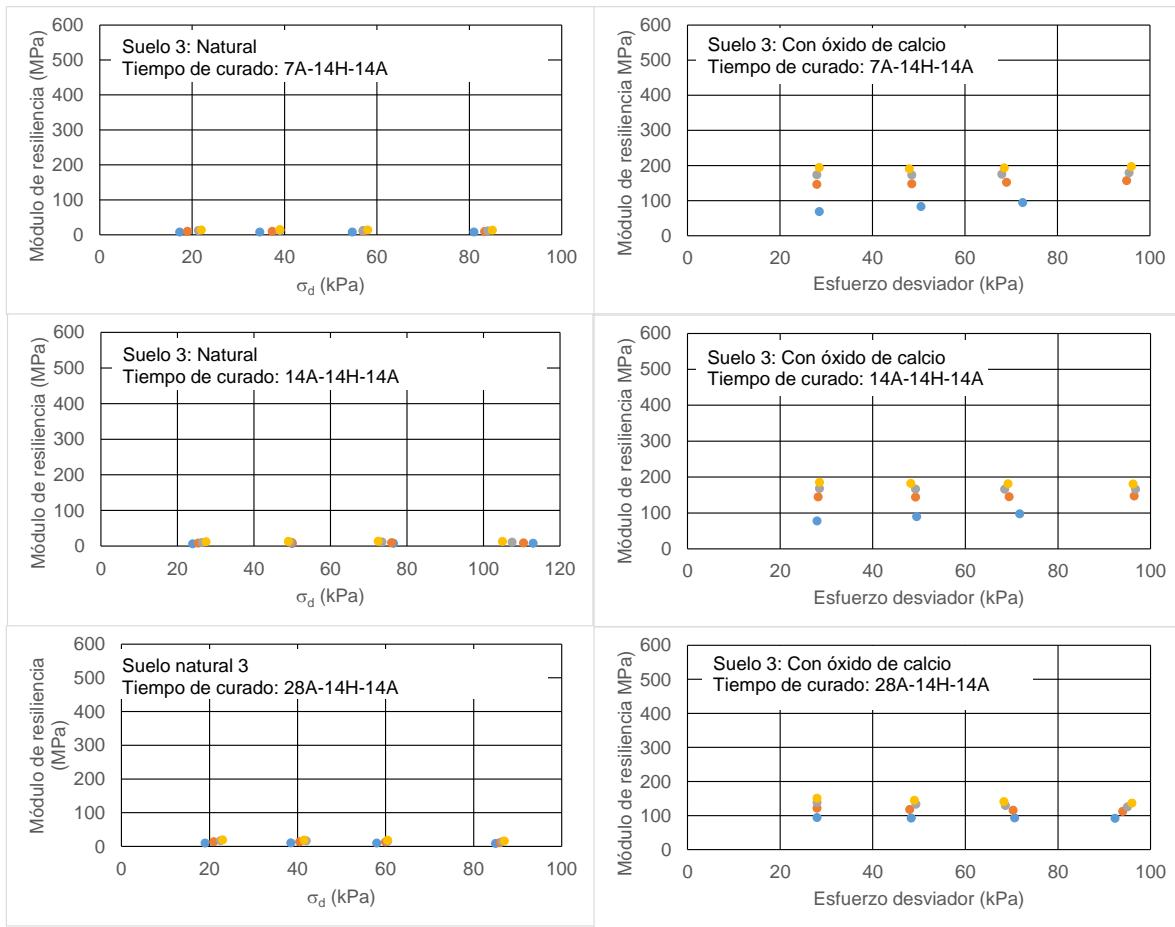


Figura 3.23. Módulo de resiliencia del suelo 3 con y sin óxido de calcio. Para 7, 14 y 28 días de almacenamiento-14 días de humedecimiento y 14 días de almacenamiento

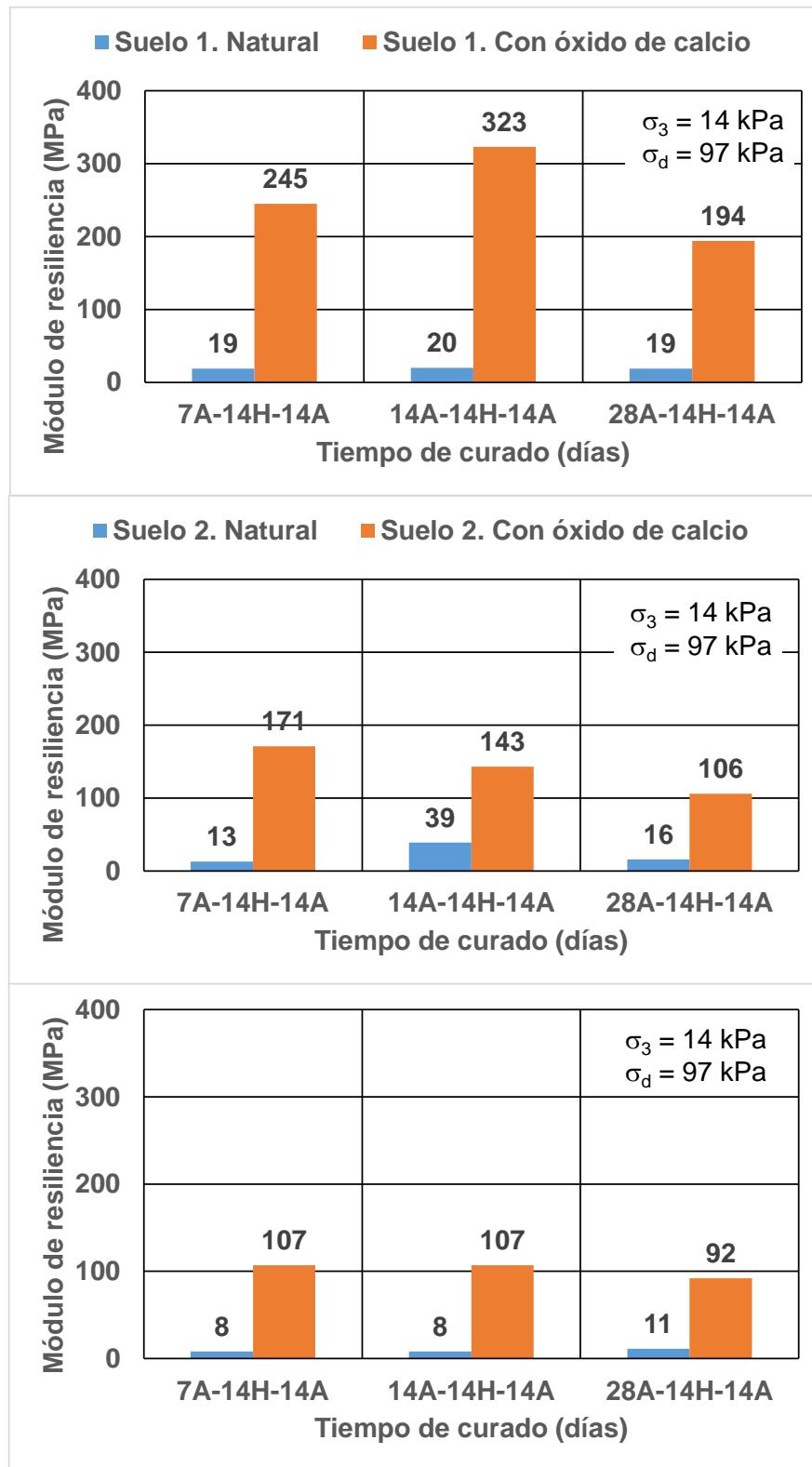


Figura 3.24. Módulo de resiliencia de los tres suelos para especímenes almacenados durante 7, 14 y 28 días, humedecidos durante 14 días y almacenados 14 días

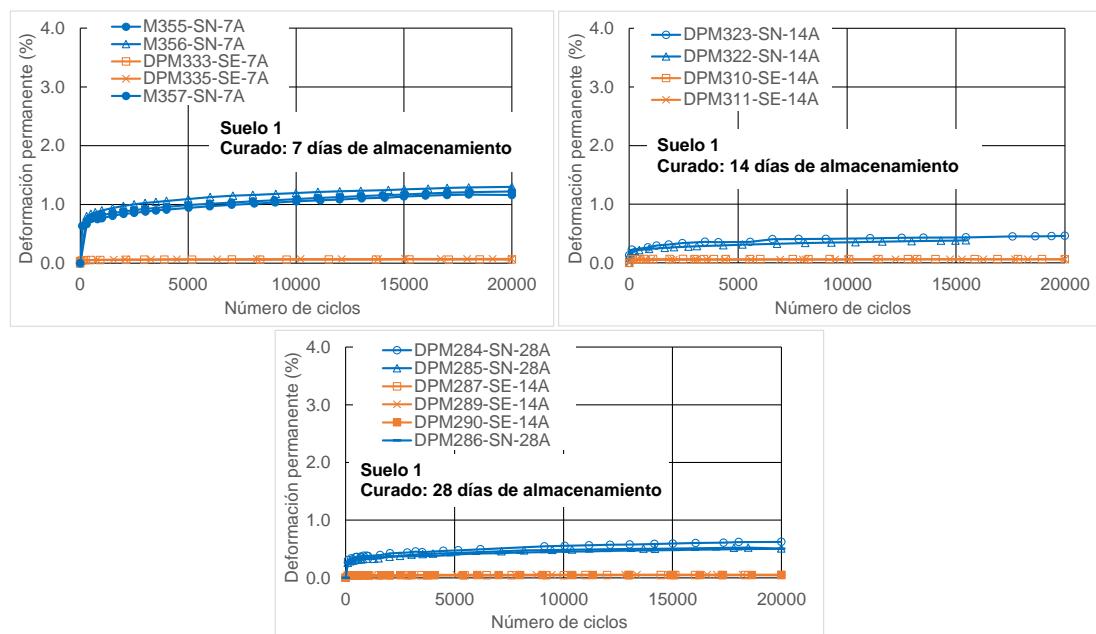
3.6. Deformación permanente

La deformación permanente que se presenta en un material para la capa de subrasante o terraplén es de gran importancia para el comportamiento general de la estructura de un pavimento. Sin embargo, su estudio no ha sido tan popular como lo ha sido el estudio del parámetro módulo de resiliencia. Una de las razones de la escasez de estos estudios puede ser que se deba a que las pruebas requieren de varias horas y algunas veces, días para su ejecución. A pesar de esto, el protocolo de evaluación de aditivos implementado en el IMT para evaluar aditivos, requiere que tanto los materiales estabilizados, así como las referencias (que generalmente es el suelo natural), sean ensayados en pruebas de deformación permanente en probetas con diferentes acondicionamientos (almacenado, secado y humedecimiento).

En la evaluación llevada a cabo para este proyecto, la prueba se llevó a cabo aplicando 20 000 ciclos de carga. Los esfuerzos aplicados a las probetas fueron una presión de confinamiento de 14 kPa y un esfuerzo desviador de 97 kPa. Este estado de esfuerzos corresponde a la presión confinante más baja de la prueba de módulo de resiliencia y el esfuerzo desviador es el más alto de la misma prueba.

3.6.1. Suelo 1

En las Figuras 3.25, 3.26 y 3.27 se muestran las curvas de deformación para las condiciones de almacenamiento, secado y almacenamiento-humedecimiento, para probetas de suelo natural y con óxido de calcio.



Nota: En las gráficas la designación SN corresponde a suelo natural; SE corresponde a suelo con óxido de calcio.

Figura 3.25. Pruebas de deformación permanente del suelo 1. Muestras almacenadas 7, 14 o 28 días

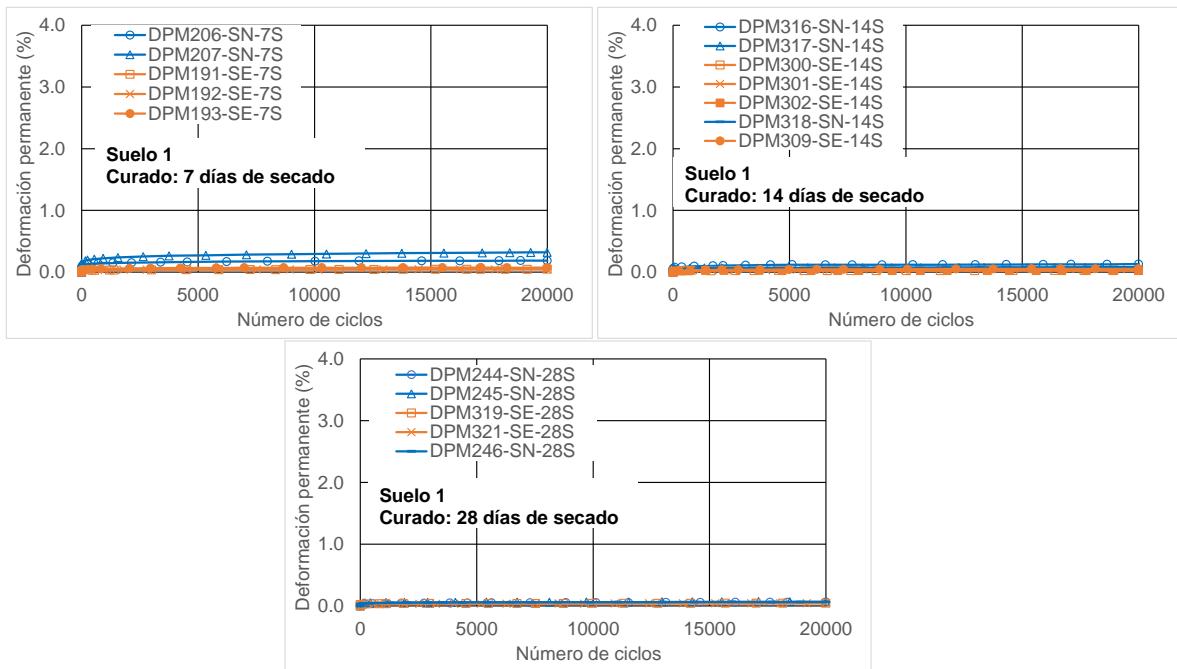


Figura 3.26. Pruebas de deformación permanente del suelo 1. Muestras secadas por 7, 14 o 28 días

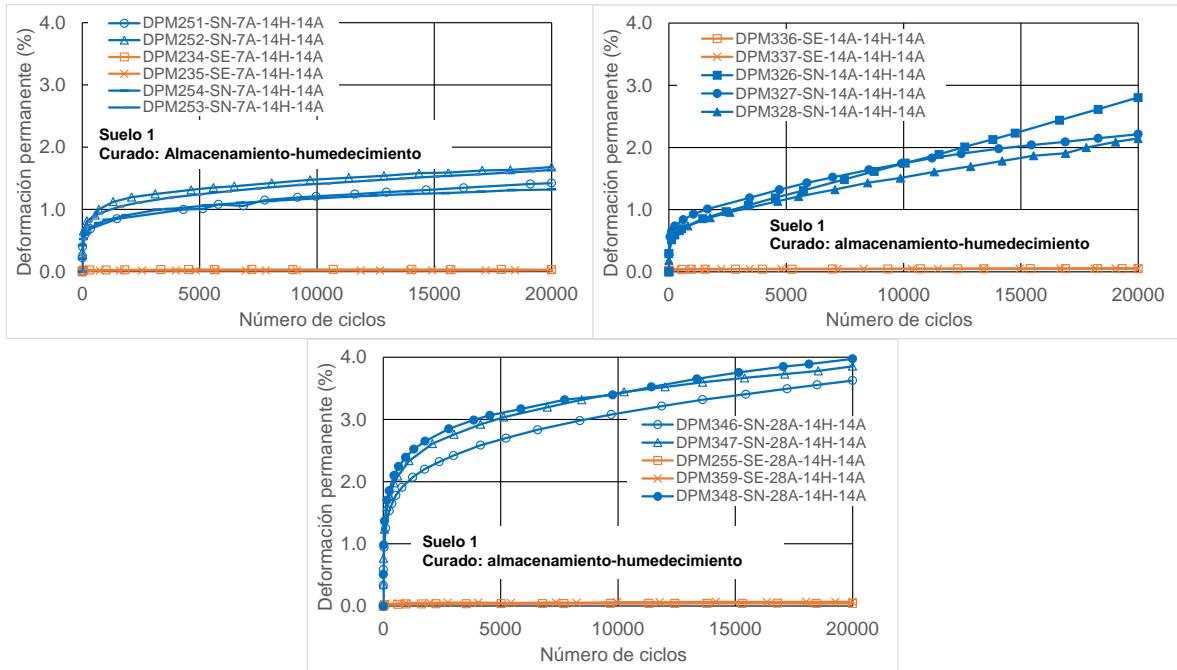


Figura 3.27. Pruebas de deformación permanente del suelo 1. Muestras almacenadas 7, 14 o 28 días, con posterior humedecimiento de 14 días

De las gráficas anteriores se observa cómo se va presentando la acumulación de la deformación permanente en 20 000 ciclos de carga para cada uno de los especímenes ensayados. Si se grafican solamente las deformaciones acumuladas

en 20000 ciclos (ε_{p20000}) se obtienen los resultados de la Figura 3.28; además en la Tabla 3.3 se resumen las veces que se reduce la deformación del suelo cuando se le adiciona óxido de calcio.

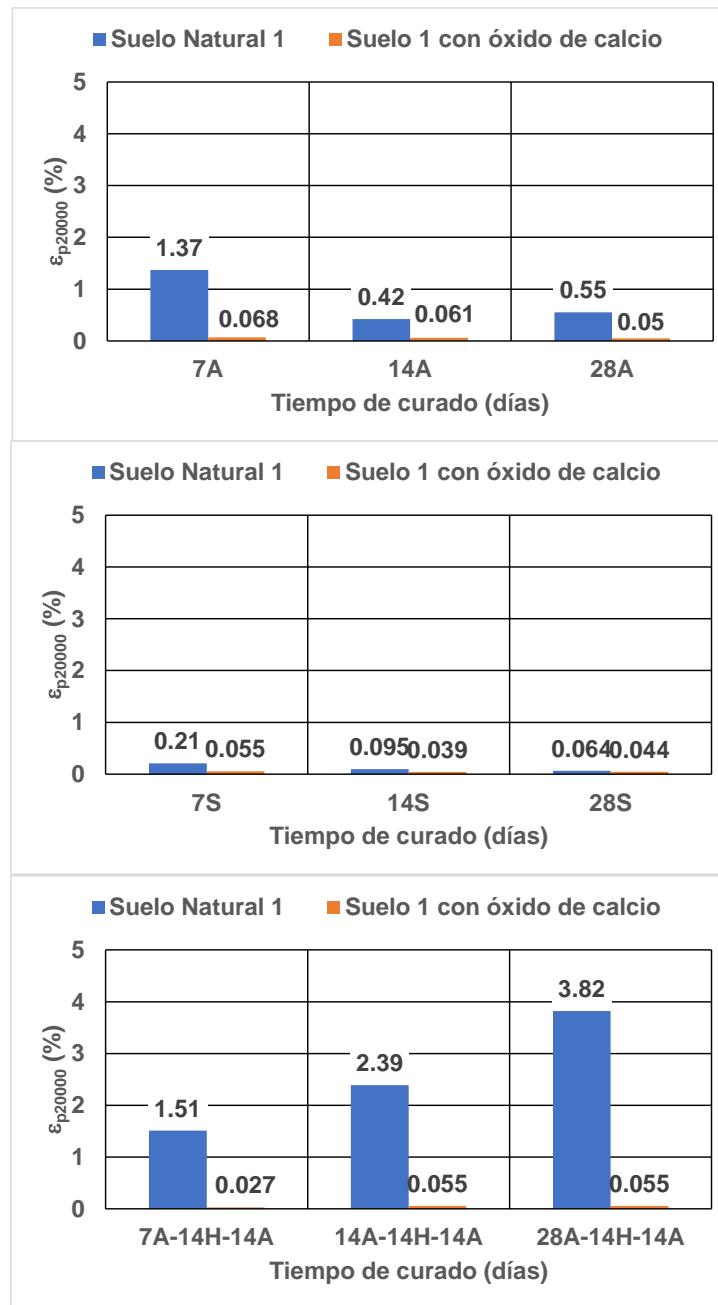


Figura 3.28. Deformación permanente acumulada en 20 000 ciclos para el suelo 1 de Santa Lucia. Condiciones de curado: Almacenamiento, secado y almacenamiento-humedecimiento-almacenamiento

Tabla 3.3. Reducción de la deformación permanente en suelo 1 con óxido de calcio

Suelo	Curado	Reducción de la deformación permanente (veces)
1	7A	20
	14A	7
	28A	11
	7S	4
	14S	2.4
	28S	1.5
	7A-14H-14A	56
	14A-14H-14A	43
	28A-14H-14A	69

De la tabla anterior se observa que, en todos los casos de curado, la deformación permanente se reduce de forma importante cuando el suelo es estabilizado con óxido de calcio. Sin embargo, el caso más interesante es el de humedecimiento, ya que el suelo que tiene óxido de calcio puede reducir su deformación permanente entre 40 y 70 veces aproximadamente.

3.6.2. Suelo 2

Para el caso de este suelo, las Figuras 3.29, 3.30 y 3.31, muestran las curvas de la acumulación de deformación permanente.

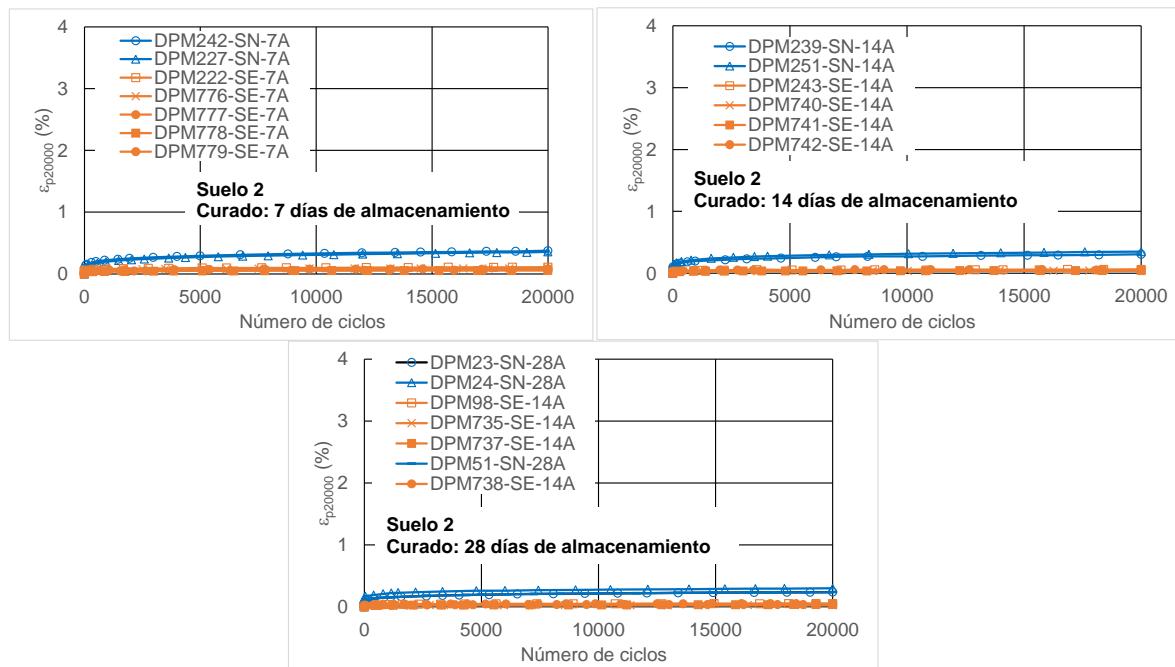


Figura 3.29. Pruebas de deformación permanente del suelo 2. Muestras almacenadas 7, 14 o 28 días

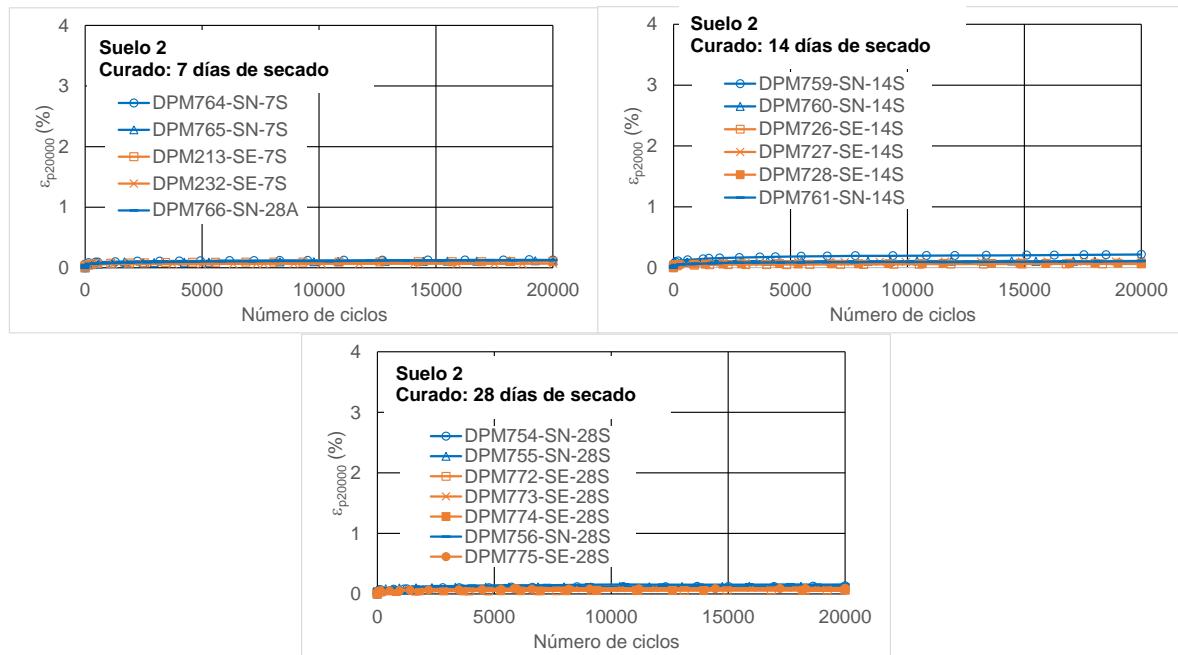


Figura 3.30. Pruebas de deformación permanente del suelo 2. Muestras secadas por 7, 14 o 28 días

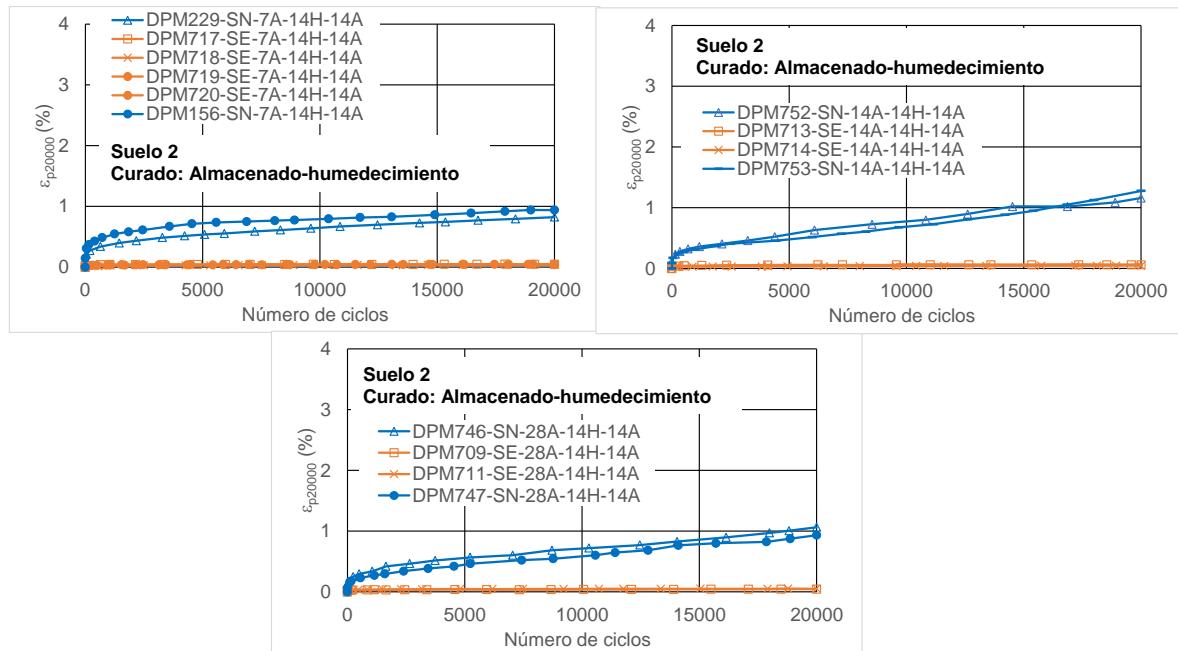


Figura 3.31. Pruebas de deformación permanente del suelo 2. Muestras almacenadas 7, 14 o 28 días, con posterior humedecimiento de 14 días

Al graficar sólo las deformaciones acumuladas a 20000 ciclos se obtienen las gráficas ilustradas en la Figura 3.32.

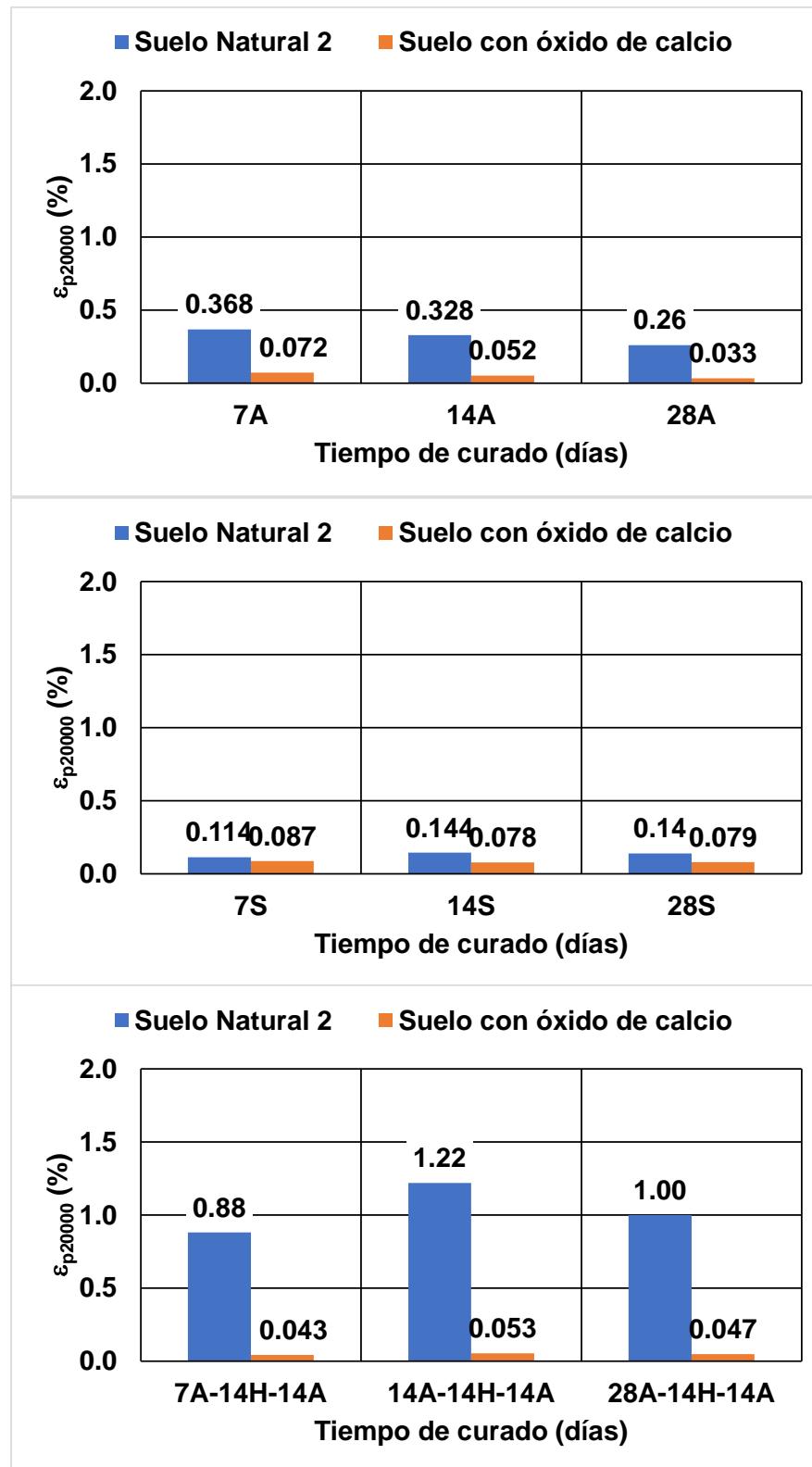


Figura 3.32. Deformación permanente acumulada en 20 000 ciclos para el suelo 2.
Condiciones de curado: Almacenamiento, secado y almacenamiento-humedecimiento-almacenamiento

Con los resultados anteriores, entonces se pueden obtener los decrementos en deformación permanente cuando el suelo es estabilizado con óxido de calcio (Tabla 3.4).

Tabla 3.4. Reducción de la deformación permanente en suelo 2 con óxido de calcio

Suelo	Curado	Reducción de la deformación permanente (veces)
2	7A	5
	14A	6
	28A	8
	7S	1
	14S	2
	28S	2
	7A-14H-14A	20
	14A-14H-14A	23
	28A-14H-14A	21

En este suelo se nota nuevamente que la deformación permanente del suelo estabilizado con óxido de calcio se reduce con respecto a la del suelo natural. Sin embargo, en este caso, las reducciones son inferiores a las presentadas en el suelo 1.

Por otro lado, la condición que muestra menos reducción es la de secado, al parecer, en esta condición, tanto el suelo natural como el estabilizado con óxido de calcio muestran condiciones de deformación similares. Sin embargo, hay que hacer notar, que cuando el suelo estabilizado con óxido de calcio está expuesto a la ganancia de agua, no incrementa su deformación permanente, por el contrario, muestra deformaciones permanentes similares a las obtenidas en especímenes a los que solo se les permitió almacenamiento.

3.6.3. Suelo 3

Para el caso de este suelo, las Figuras 3.33, 3.34 y 3.35, muestran las curvas de la acumulación de deformación permanente.

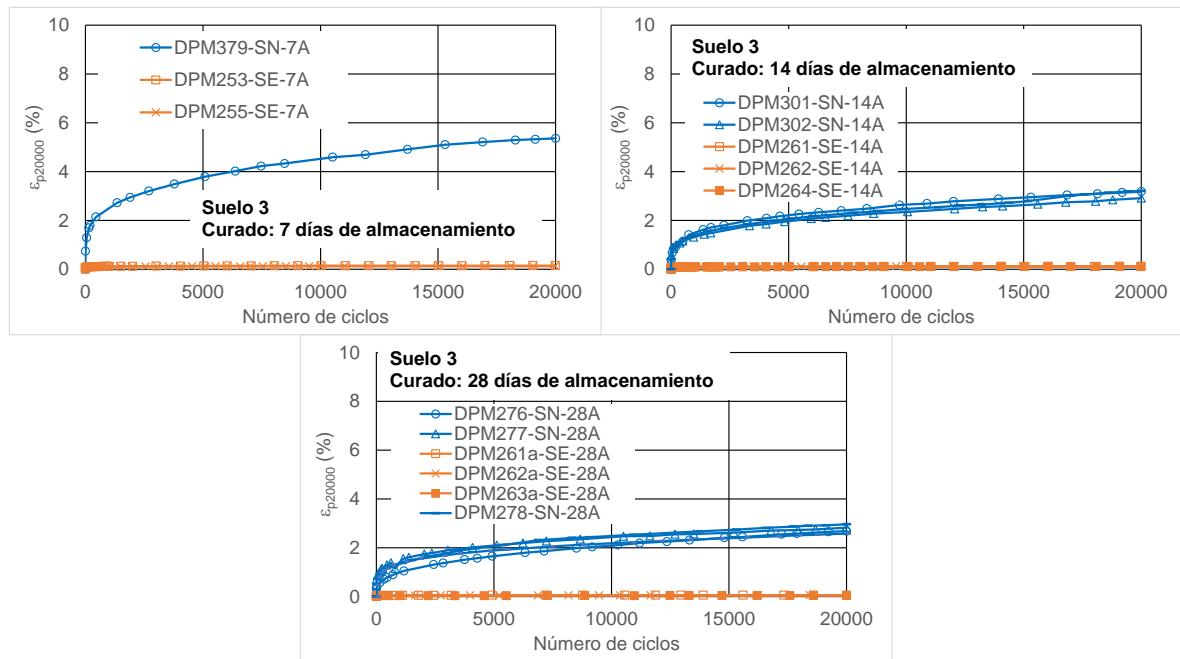


Figura 3.33. Pruebas de deformación permanente del suelo 3. Muestras almacenadas 7, 14 o 28 días

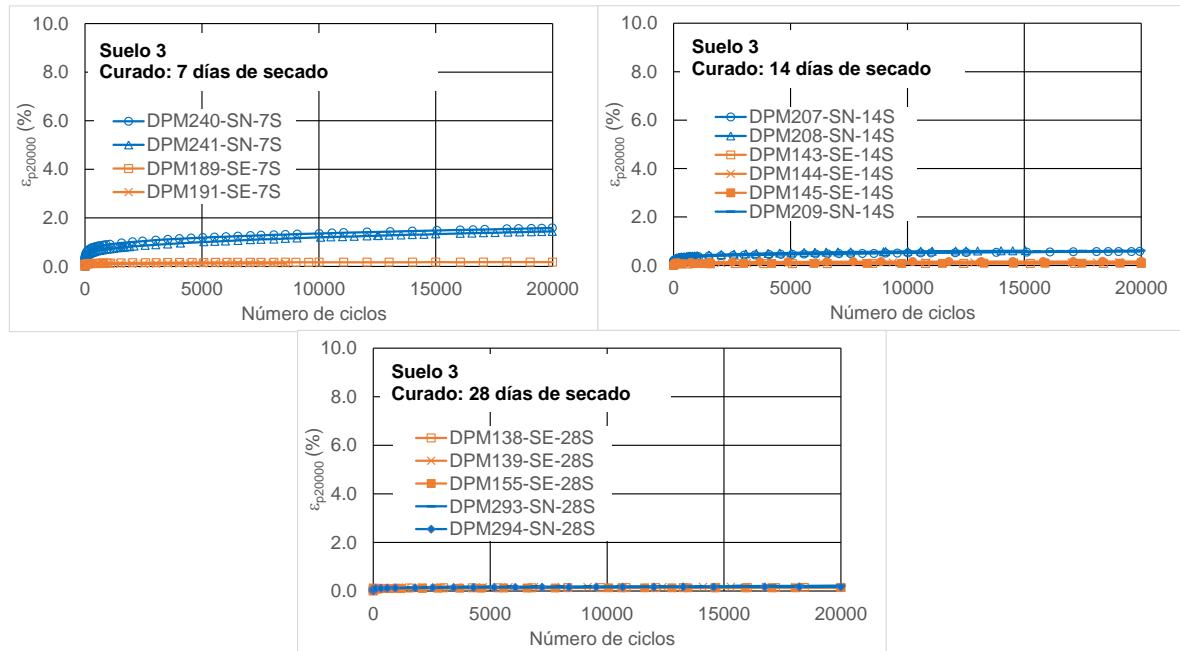


Figura 3.34. Pruebas de deformación permanente del suelo 3. Muestras secadas por 7, 14 o 28 días

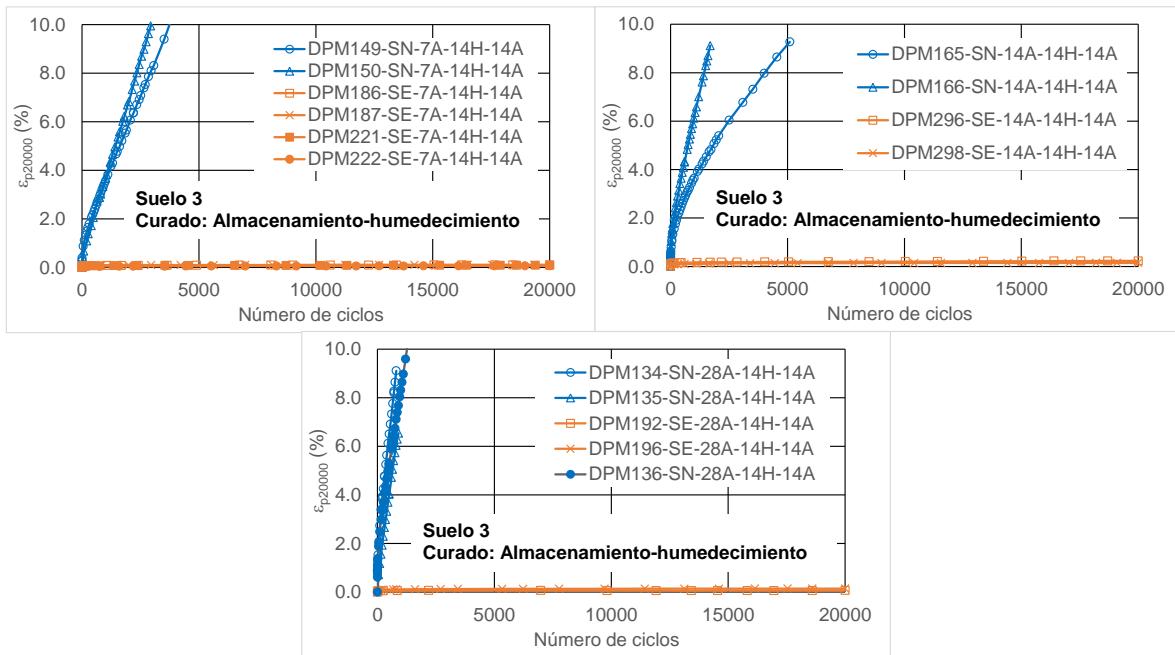
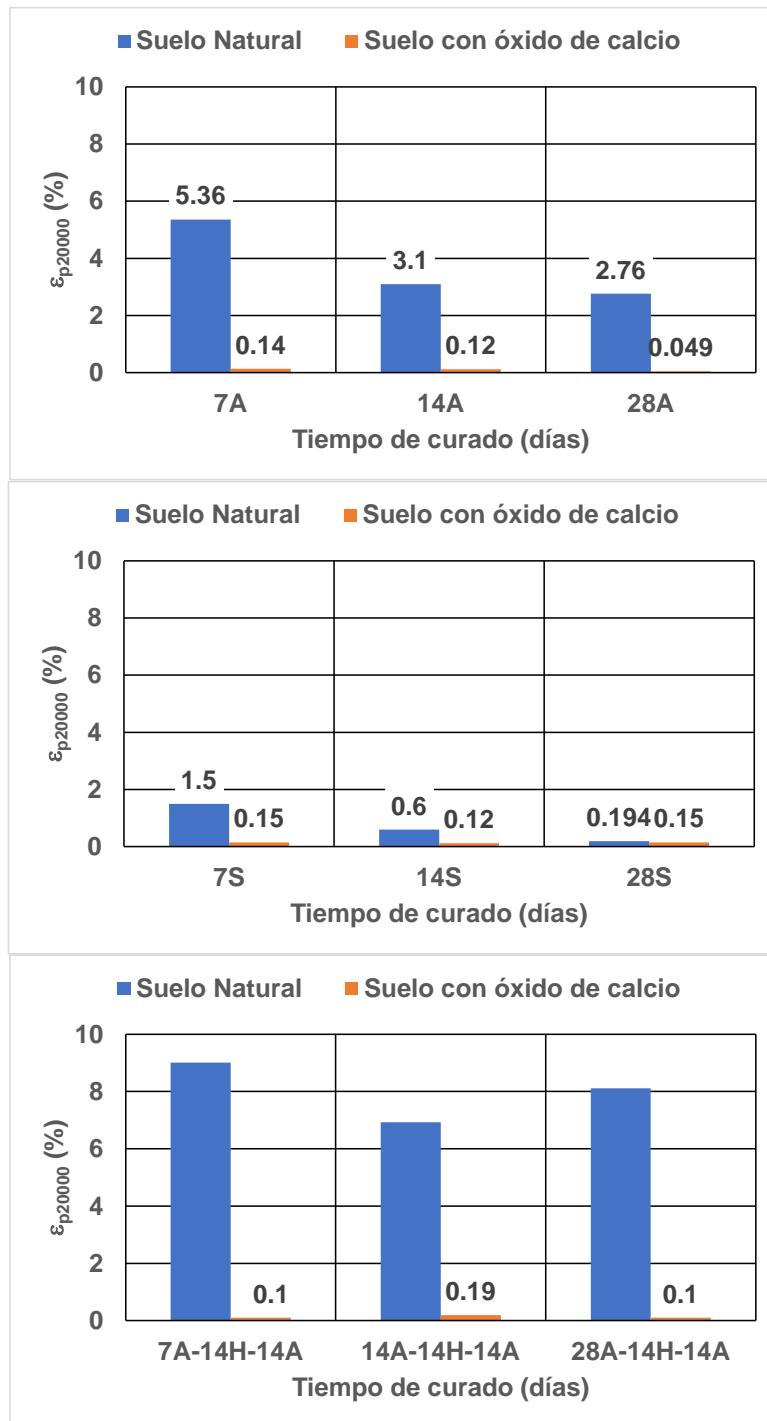


Figura 3.35. Pruebas de deformación permanente del suelo 2. Muestras almacenadas 7, 14 o 28 días, con posterior humedecimiento de 14 días

Al graficar solo las deformaciones acumuladas a 20000 ciclos se obtienen las gráficas ilustradas en la Figura 3.36.



Nota. Las deformaciones promedio para el suelo natural se tomaron en los ciclos 2900, 1650 y 800 (aproximadamente) para muestras 7-14-14, 14-14-14 y 28-14-14

Figura 3.36. Deformación permanente acumulada en 20 000 ciclos para el suelo 3 con óxido de calcio; las deformaciones de suelo natural son a menos ciclos (ver nota). Condiciones de curado: Almacenamiento, secado y almacenamiento-humedecimiento-almacenamiento

Con los resultados anteriores, entonces se pueden obtener los decrementos en deformación permanente cuando el suelo es estabilizado con óxido de calcio (Tabla 3.5).

Tabla 3.5. Reducción de la deformación permanente en suelo 3 con óxido de calcio

Suelo	Curado	Reducción de la deformación permanente (veces)
3	7A	38
	14A	26
	28A	56
	7S	10
	14S	5
	28S	1
	7A-14H-14A	90*
	14A-14H-14A	36*
	28A-14H-14A	81*

Nota. Las deformaciones para las muestras de suelo natural y que se humedecieron no corresponden al ciclo 20000, se tomaron en ciclos diferentes, cuando la muestra ya presentaba una deformación muy grande.

En este suelo se nota nuevamente que la deformación permanente del suelo estabilizado con óxido de calcio se reduce con respecto a la del suelo natural. Este suelo también presenta reducciones de deformación inferiores a las presentadas en el suelo 1.

En el caso de este suelo, las deformaciones permanentes que alcanza el suelo natural en promedio son de 8% antes de los 5000 ciclos de carga; mientras que el suelo estabilizado con óxido de calcio, aun cuando se expone a absorción de agua, presenta deformaciones menores a 0.2%, logrando además soportar las 20 000 aplicaciones de carga.

Conclusiones

En el mercado de los aditivos existen una gran cantidad que buscan mejorar el comportamiento de los materiales.

Los fabricantes generalmente se acercan a los constructores y agencias encargadas de la construcción de infraestructura para ofrecer los productos como potenciales mejoradores de propiedades tanto de materiales que cumplen con especificaciones como de aquellos que en algunos casos son llamados materiales marginales y que no cumplen con las especificaciones.

La mayoría de los responsables de la toma de decisiones en los procesos constructivos se reúsan a utilizar dichos productos puesto que no cuentan con información que garantice que en verdad los aditivos mejoran las propiedades mecánicas de los materiales.

Una toma de decisiones informado requiere que todos los aditivos deben contar con estudios tanto de campo como de laboratorio, que demuestren de qué manera estos productos modifican las propiedades de los materiales de manera benéfica.

Los resultados de los estudios deben ser difundidos, para hacer llegar los resultados a los diversos actores de interés dentro del sector.

Un ejemplo de estos estudios es el que se presenta en este documento y del cual se extrajeron las siguientes conclusiones:

- En el estudio se evaluaron las propiedades de tres suelos que fueron estabilizados con 5, 4 y 5 porciento de óxido de calcio (cal viva). Los suelos estudiados son de la Ciudad de México y presentan características especiales.
- Por un lado, el suelo uno fue clasificado como ML y el suelo dos y tres como MH. El suelo dos y tres presentan materia orgánica en una cantidad cercana al 5%; y el suelo 1 contiene 1.9%.
- Al determinar las propiedades tales como, resistencia a la compresión simple, CBR, módulo de resiliencia y deformación permanente, se observa que el óxido de calcio mejora las propiedades mecánicas de los tres suelos, observándose el mayor beneficio en el suelo uno, quizá porque es el que tiene menor cantidad de materia orgánica.
- Por otro lado, y como se ha presentado en la literatura, el agua es uno de los factores que más influye en el comportamiento de los suelos finos. Esto se debe a que un suelo, al ganar agua, disminuye su resistencia a valores casi nulos, dependiendo del tiempo al que esté expuesto a este factor ambiental. Por esto, sería deseable tener materiales que en la medida de lo posible no

cambien sus propiedades ante una variación de contenido de agua. En este estudio, las probetas con y sin óxido de calcio se expusieron a cambios en contenido de agua. Los resultados son interesantes ya que indican que el suelo que contiene óxido de calcio se ve poco afectado por la absorción de agua. De hecho, al parecer, el humedecimiento (al menos por el tiempo estudiado), ayuda a mejorar las propiedades mecánicas. Esto de acuerdo a lo observado en las pruebas de resistencia en compresión simple, módulo de resiliencia y deformación permanente de especímenes que se almacenaron y posteriormente se humedecieron.

Se espera que los resultados sean de interés para los tomadores de decisiones, y aliente a los fabricantes de productos a la realización de estudios que permitan evaluar los beneficios que se obtendrían al utilizar los diferentes aditivos que actualmente existen en el mercado.

Referencias

ASTM D6276-19 (Reapproved 2006). Standard Test Method for Using pH to Estimate the Soil-Lime Requirement for Soil Stabilization.

ASTM D 2216-10 “Standard test methods for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass.”

ASTM D 4318-10 “Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils”

NCHRP 1-28A, “Harmonized Test Methods for Laboratory Determination of Resilient Modulus for Flexible Pavement Design.”

ASTM D 1140-17 “Standard test methods for determining the amount of material finer than 75 µm (No. 200) sieve in soils by washing.”

ASTM D 854-14 “Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer.”

ASTM D 698-12 “Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort 600 kN•m/m³ (12 400 ft•lbf/ft³).“

ASTM D1883-16 “Standard test method for CBR (California Bearing Ratio) of Laboratory Compacted Soils.”

ASTM C 136-14 “Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates”.

AASHTO T267-86. Método estándar para la determinación del contenido de materia orgánica en suelos por medio de ignición.

Pérez, N., Pérez, A. y Garnica, P. (2019). Evaluación del óxido de calcio (estabilical) como estabilizador de suelos. Publicación técnica No. 560. Instituto Mexicano del Transporte.

Proyecto de investigación externa IE-12/19 “Evaluación del aditivo estabilical. Segunda Fase”.

Anexo 1. Características de los especímenes de prueba

Características de los especímenes ensayados para el suelo 1 (Resistencia en compresión simple, módulo de resiliencia y deformación permanente)

RESUMEN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL SUELO NATURAL

Muestra No.	Característica	Ensaye	Condiciones iniciales						Condiciones finales									
			dpron, cm	hprom (cm)	Área (cm ²)	Vol (cm ³)	Peso (g)	Y _m (kN/m ²)	w (%)	Y _r (kN/m ²)	dpron, cm	hprom (cm)	Área (cm ²)	Vol (cm ³)	Peso (g)	Y _m (kN/m ²)	w (%)	Y _r (kN/m ²)
279	0A	Mr	7.104	14.39	39.64	570.37	1034.17	17.79	25.4	14.18	7.106	14.416	39.66	571.72	1034.5	17.750	25.6	14.132
280	0A	Mr	7.093	14.4	39.51	569.00	1030.43	17.77	25.4	14.17	7.109	14.407	39.69	571.85	1031.7	17.699	25.5	14.107
45	7A	Mr	7.07	14.379	39.26	564.49	1016.71	17.67	25	14.14	7.098	14.419	39.57	570.56	1013	17.417	24.4	13.997
46	7A	Mr	7.111	14.378	39.71	571.02	1016.4	17.46	25	13.97	7.113	14.379	39.74	571.38	1013.4	17.400	24	14.038
47	7A	Mr	7.086	14.393	39.44	567.60	1012.11	17.49	25	13.99	7.088	14.418	39.46	568.91	1009.4	17.406	24.3	14.006
32	14A	Mr	7.079	14.408	39.36	567.07	1022.36	17.69	25.1	14.14	7.103	14.412	39.63	571.08	1017.6	17.479	24	14.095
33	14A	Mr	7.091	14.404	39.49	568.84	1023.07	17.64	25.1	14.10	7.094	14.38	39.53	568.37	1018.7	17.583	24.5	14.126
53	28A	Mr	7.093	14.379	39.51	568.17	1021.3	17.63	25	14.11	7.104	14.372	39.64	569.66	1013.9	17.461	23.7	14.121
55	28A	Mr	7.107	14.448	39.67	573.15	1020.6	17.47	25	13.98	7.104	14.389	39.64	570.33	1019.2	17.541	23.6	14.188
56	28A	Mr	7.104	14.431	39.64	572.00	1019.18	17.48	25	13.98	7.1	14.368	39.59	568.86	1011.2	17.439	23.4	14.135
96	75	Mr	7.101	14.459	39.60	572.62	1037.4	17.77	25.7	14.13	7.102	14.384	39.61	569.81	1006.4	17.244	24.4	14.247
97	75	Mr	7.112	14.42	39.63	572.46	1027.71	17.60	25.7	14.00	7.106	14.364	39.64	569.32	1003.32	17.449	20.2	14.255
98	75	Mr	7.111	14.486	39.71	571.31	1033.45	17.62	25.7	14.02	7.094	14.42	39.53	569.95	999.94	17.211	20.8	14.244
103	14S	Mr	7.108	14.403	39.68	571.53	1013.2	17.29	25	13.01	7.073	14.282	39.28	561.00	919.27	16.075	13.1	14.212
105	14S	Mr	7.098	14.415	39.57	570.40	1010.25	17.37	25	13.90	7.065	14.333	39.20	561.89	942.34	16.540	16.8	14.164
137	28S	Mr	7.12	14.411	39.82	573.78	1035.64	17.71	25.4	14.12	7.039	14.254	38.91	554.69	945.93	16.729	12.4	14.878
138	28S	Mr	7.118	14.436	39.79	574.45	1032.68	17.64	25.4	14.06	7.052	14.322	39.06	559.40	954.22	16.734	15.5	14.491
139	28S	Mr	7.1	14.423	39.59	571.04	1032.2	17.73	25.4	14.14	7.055	14.31	39.09	559.40	944.52	16.565	14.4	14.478
151	7A-14H-14A	Mr	7.112	14.409	39.73	572.41	1036.4	17.76	26	14.10	7.129	14.415	39.92	575.39	1069.4	18.232	29.3	14.106
152	7A-14H-14A	Mr	7.096	14.424	39.55	570.43	1030.14	17.72	26	14.06	7.085	14.429	39.42	568.86	1060.6	18.289	29	14.175
194	14A-14H-14A	Mr	7.1	14.488	39.59	573.61	1031.03	17.67	25.5	14.08	7.153	14.528	40.19	583.81	1072.5	18.022	29.2	13.944
195	14A-14H-14A	Mr	7.099	14.468	39.58	572.66	1034.6	17.72	25.5	14.12	7.105	14.521	39.66	575.89	1073.2	18.282	29.4	14.130
224	14A-14H-14A	Mr	7.101	14.387	39.60	569.77	1021.61	17.61	25.4	14.04	7.116	14.426	39.77	568.86	1066.4	18.243	29.9	14.044
225	14A-14H-14A	Mr	7.101	14.397	39.60	570.17	1025.4	17.64	25.4	14.07	7.125	14.435	39.87	575.54	1063.3	18.122	29.6	13.979
153	28A-14H-14A	Mr	7.111	14.412	39.71	572.37	1027.88	17.61	25.8	14.00	7.133	14.426	39.96	576.48	1066.6	18.140	29	14.064
154	28A-14H-14A	Mr	7.075	14.382	39.31	565.41	1025.4	17.79	25.8	14.14	7.128	14.448	39.90	576.55	1067.2	18.159	29.2	14.055
169	28A-14H-14A	Mr	7.119	14.42	39.80	573.81	1011.19	17.60	26	14.14	7.129	14.432	39.82	576.65	1067.6	18.200	29.0	14.130
200	14A-14H-14A	Mr	7.102	14.455	39.67	570.34	1029.1	17.59	25.5	14.04	7.122	14.444	39.82	576.29	1067.6	18.212	28.9	14.239
271	28A-14H-14A	Mr	7.114	14.437	39.75	573.75	1037.61	17.74	26	14.08	7.123	14.443	39.85	575.54	1064.7	18.148	28.9	14.078
188	28A-14H-14A	Mr	7.082	14.428	39.39	568.44	1007.15	17.38	25	13.91	7.14	14.468	40.04	579.29	1058	17.917	30.8	13.698
275	0A	CS	7.104	14.385	39.64	570.17	1034.88	17.81	25.6	14.18	7.11	14.408	39.70	572.05	1035.6	17.760	25.3	14.179
276	0A	CS	7.115	14.39	39.76	572.14	1036.39	17.77	25.6	14.15	7.112	14.393	39.73	572.01	1035.7	17.762	25.2	14.184
277	0A	CS	7.096	14.39	39.55	569.09	1033.58	17.82	25.6	14.19	7.116	14.41	39.77	573.10	1034.8	17.713	25.2	14.149
278	0A	CS	7.098	14.39	39.57	569.41	1037.82	17.88	25.6	14.24	7.095	14.404	39.54	569.48	1036.9	17.862	25.3	14.261
22	7A	CS	7.109	14.417	39.69	572.25	1034.87	17.74	25.1	14.18	7.103	14.384	39.63	569.97	1031.7	17.756	25.1	14.194
23	7A	CS	7.108	14.425	39.68	572.40	1034.49	17.73	25.1	14.17	7.109	14.412	39.69	572.05	1030.0	17.673	25.1	14.127
24	7A	CS	7.108	14.439	39.68	572.96	1030.52	17.64	25.1	14.10	7.12	14.397	39.82	573.22	1033.7	17.690	25.1	14.141
25	7A	CS	7.118	14.413	39.79	573.54	1036.07	17.72	25.1	14.17	7.122	14.372	39.84	575.25	1032.5	17.691	25.1	14.142
1	14A	CS	7.087	14.42	39.45	568.83	1022.17	17.63	25.2	14.08	7.104	14.374	39.64	569.74	1019.6	17.556	24.2	14.137
2	14A	CS	7.092	14.411	39.50	569.28	1024.59	17.66	25.2	14.11	7.109	14.365	39.61	569.06	1020.4	17.597	24.3	14.159
3	14A	CS	7.083	14.384	39.40	566.77	1025.82	17.76	25.2	14.18	7.109	14.363	39.69	570.10	1021.5	17.578	24.3	14.137
4	14A	CS	7.092	14.38	39.50	569.05	1026.39	17.73	25.2	14.16	7.103	14.398	39.63	570.53	1037.4	17.491	24.2	14.086
55	28A	CS	7.094	14.448	39.67	570.23	1027.4	17.67	25	13.98	7.104	14.404	39.64	570.06	1036.8	17.441	24.4	14.28
56	28A	CS	7.104	14.431	39.64	572.00	1019.48	17.68	25	13.99	7.104	14.368	39.59	568.86	1031.2	17.439	24.4	14.237
203	7A	CS	7.093	14.387	39.51	568.49	1030.58	17.78	26	14.11	7.071	14.287	39.27	561.04	938.88	16.417	19.5	13.736
204	75	CS	7.092	14.452	39.50	570.90	1022.32	17.57	26	13.94	7.049	14.414	39.53	562.51	986.7	17.208	21.3	14.185
205	75	CS	7.111	14.439	39.71	573.44	1032.52	17.71	26	14.06	7.066	14.351	39.21	562.76	994.61	17.338	20.2	14.430
182	14S	CS	7.109	14.442	39.69	573.24	1026.83	17.57	25.7	13.98	7.074	14.393	39.30	565.68	981.15	17.015	19.4	14.249
183	14S	CS	7.103	14.429	39.63	571.76	1025.2	17.59	25.7	13.99	7.072	14.334	39.28	563.04	990.67	17.261	20.8	14.286
184	14S	CS	7.097	14.428	39.56	570.75	1025.46	17.63	25.7	14.02	7.059	14.339	39.34	561.17	980.24	17.136	19.5	14.337
209	14S	CS	7.105	14.401	39.65	570.97	1033.14	17.75	25.3	14.17	7.057	14.327	39.11	560.38	996.65	17.447	20.7	14.455
210	14S	CS	7.088	14.473	39.46	571.08	1031.9	17.76	25.3	14.17	7.062	14.465	39.17	565.58	1000.6	17.324	20.5	14.382
211	14S	CS	7.105	14.431	39.65	572.16	1036.82	17.78	25.3	14.19	7.061	14.432	39.16	565.13	997.17	17.310	19.9	14.432
110	28S	CS	7.105	14.457	39.65	5												

Evaluación de las propiedades de suelos estabilizados con óxido de calcio. El caso de suelos de la Ciudad de México

RESUMEN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL SUELO CON ESTABILICAL

Muestra No.	Característica	Ensaye	Condiciones iniciales							Condiciones finales								
			dpron, cm	hprom (cm)	Área (cm ²)	Vol (cm ³)	Peso (g)	γ_m (kN/m ³)	w (%)	γ_d (kN/m ³)	dpron, cm	hprom (cm)	Área (cm ²)	Vol (cm ³)	Peso (g)	γ_m (kN/m ³)	w (%)	γ_d (kN/m ³)
41	7A	Mr	7.083	14.388	39.40	566.85	909.3	15.74	22.5	12.85	7.112	14.388	39.73	571.58	905.52	15.541	22.1	12.724
42	7A	Mr	7.099	14.371	39.58	568.82	906.56	15.63	22.5	12.76	7.109	14.374	39.69	570.54	903.64	15.537	22.7	12.665
26	14A	Mr	7.105	14.405	39.65	571.13	913.98	15.70	22.8	12.78	7.109	14.391	39.69	571.21	908.42	15.601	22.3	12.752
27	14A	Mr	7.094	14.394	39.53	568.92	911.64	15.72	22.8	12.80	7.117	14.387	39.78	572.34	905.6	15.522	21.6	12.761
51	14A	Mr	7.086	14.43	39.44	569.06	909.08	15.67	22.5	12.79	7.099	14.48	39.58	573.13	901.09	15.424	21.3	12.711
229	28A	Mr	7.102	14.38	39.61	569.65	905.53	15.59	22.5	12.73	7.107	14.389	39.67	570.81	901.39	15.491	21.6	12.743
112	75	Mr	7.101	14.39	39.60	569.89	1027.43	17.69	25.1	14.14	7.105	14.345	39.65	568.75	889.91	15.350	18.3	12.973
113	75	Mr	7.105	14.382	39.65	570.21	910.88	15.67	23.1	12.73	7.098	14.344	39.57	567.59	876.15	15.143	17.7	12.869
99	14S	Mr	7.098	14.42	39.57	570.60	912.99	15.70	22.9	12.77	7.098	14.375	39.57	568.81	879.39	15.166	16.8	12.983
101	14S	Mr	7.108	14.419	39.68	572.16	918	15.74	22.9	12.81	7.108	14.351	39.68	569.47	882.56	15.204	17.5	12.936
181	28S	Mr	7.084	14.413	39.41	568.07	894.93	15.45	23.1	12.55	7.075	14.388	39.31	565.65	809.6	14.042	11.8	12.561
240	28S	Mr	7.099	14.41	39.58	570.36	896.14	15.41	22.6	12.57	7.104	14.333	39.64	568.11	847.66	14.637	15.2	12.709
243	28S	Mr	7.105	14.41	39.65	571.32	905.23	15.54	22.6	12.68	7.108	14.354	39.68	569.59	840.69	14.479	14.2	12.683
197	7A-14H-14A	Mr	7.089	14.406	39.47	568.60	894.88	15.44	23	12.55	7.106	14.385	39.66	570.49	898.91	17.022	26.4	13.471
199	7A-14H-14A	Mr	7.1	14.392	39.59	569.81	897.86	15.46	23	12.57	7.117	14.421	39.78	573.69	993.77	16.993	35.7	12.520
143	14A-14H-14A	Mr	7.118	14.416	39.79	573.66	920.07	15.73	23.5	12.74	7.123	14.389	39.85	573.39	993.63	17.009	24.6	13.644
144	14A-14H-14A	Mr	7.1	14.419	39.59	570.88	918.36	15.78	23.5	12.78	7.108	14.38	39.68	570.62	991.18	17.040	24.6	13.674
145	14A-14H-14A	Mr	7.099	14.401	39.58	570.00	918.34	15.81	23.5	12.80	7.121	14.419	39.83	574.26	992.56	16.956	24.7	13.599
147	28A-14H-14A	Mr	7.119	14.411	39.80	573.62	922.6	15.78	23.2	12.81	7.152	14.372	40.17	577.38	997.38	16.946	32.2	12.823
148	28A-14H-14A	Mr	7.119	14.396	39.80	573.02	921.92	15.78	23.2	12.81	7.116	14.384	39.77	572.06	993.49	17.037	32.3	12.880
267	0A	CS	7.107	14.37	39.67	570.06	906.1	15.59	23	12.68	7.107	14.374	39.67	570.22	906.1	15.588	22.5	12.727
268	0A	CS	7.107	14.38	39.67	570.46	904.58	15.56	23	12.65	7.107	14.378	39.67	570.38	904.58	15.558	22.6	12.695
269	0A	CS	7.101	14.4	39.60	570.29	905.12	15.57	23	12.66	7.101	14.403	39.60	570.40	905.12	15.567	22.4	12.714
6	7A	CS	7.094	14.422	39.53	570.03	910.15	15.66	23.4	12.69	7.111	14.423	39.71	572.81	905.76	15.512	23.2	12.588
7	7A	CS	7.083	14.403	39.40	567.52	904.86	15.64	23.4	12.68	7.113	14.394	39.74	571.98	901.08	15.454	23.3	12.533
64	7A	CS	7.088	14.403	39.46	568.32	908.73	15.69	22.5	12.80	7.126	14.404	39.88	574.47	904.65	15.448	22.1	12.655
6	14A	CS	7.094	14.422	39.53	570.03	910.15	15.66	23.4	12.69	7.111	14.423	39.71	572.81	905.76	15.512	23.2	12.588
28	14A	CS	7.099	14.386	39.58	569.41	907.63	15.64	22.8	12.73	7.095	14.369	39.54	568.10	901.38	15.565	21.6	12.799
65	14A	CS	7.104	14.434	39.64	572.12	911.79	15.63	22.5	12.76	7.104	14.442	39.64	572.43	907.78	15.557	22	12.747
66	14A	CS	7.101	14.402	39.60	570.36	909.7	15.65	22.5	12.77	7.129	14.404	39.92	574.95	904.96	15.441	22.6	12.655
17	28A	CS	7.078	14.418	39.35	567.31	910.79	15.75	23.3	12.77	7.097	14.389	39.56	569.21	902.58	15.555	22.1	12.741
18	28A	CS	7.098	14.411	39.57	570.24	910.68	15.67	23.3	12.71	7.115	14.374	39.76	571.50	903.35	15.506	21.9	12.720
19	28A	CS	7.093	14.407	39.51	569.28	908.15	15.65	23.3	12.69	7.097	14.379	39.56	568.81	901.09	15.541	22.1	12.728
93	75	CS	7.088	14.388	39.46	567.73	910.69	15.74	22.9	12.80	7.108	14.352	39.68	569.51	879.69	15.153	18.2	12.818
94	75	CS	7.099	14.39	39.58	569.57	914.31	15.75	22.9	12.81	7.107	14.362	39.67	569.74	881.45	15.177	18.8	12.858
95	75	CS	7.106	14.426	39.66	572.12	918.49	15.75	22.9	12.81	7.106	14.365	39.66	569.72	881.69	15.182	18.1	12.861
113	75	CS	7.105	14.382	39.65	570.21	910.88	15.67	23.1	12.73	7.123	14.344	39.57	567.59	876.15	15.143	17.7	12.869
114	75	CS	7.102	14.408	39.61	570.76	914.21	15.71	23.1	12.76	7.131	14.358	39.94	573.44	884.28	15.128	18.6	12.757
115	75	CS	7.117	14.368	39.78	571.59	914.66	15.70	23	12.76	7.132	14.356	39.95	573.52	889.89	15.222	19.2	12.767
132	14S	CS	7.099	14.412	39.58	570.44	904.62	15.56	22.8	12.67	7.076	14.326	39.32	563.37	850.27	14.806	15.7	12.801
166	14S	CS	7.1	14.409	39.59	570.48	900.74	15.49	23.1	12.58	7.073	14.305	39.29	562.06	838.71	14.638	14.9	12.738
168	14S	CS	7.113	14.39	39.74	571.82	899.85	15.44	23.1	12.54	7.077	14.421	39.34	567.26	838.59	14.502	14.8	12.630
133	28S	CS	7.116	14.396	39.77	572.54	918.89	15.74	22.9	12.81	7.064	14.279	39.19	559.62	832.22	14.589	11.5	13.084
134	28S	CS	7.115	14.414	39.76	573.09	918.68	15.73	22.9	12.80	7.06	14.279	39.15	558.98	830.39	14.573	11.2	13.03
135	28S	CS	7.099	14.41	39.58	570.36	915.07	15.74	22.9	12.81	7.083	14.284	39.40	562.83	838	14.606	12.5	12.986
136	28S	CS	7.101	14.424	39.60	571.24	916.45	15.74	22.9	12.81	7.063	14.308	39.18	560.59	833.01	14.577	12	13.014
119	7A-14H-14A	CS	7.098	14.417	39.57	570.48	911.57	15.68	22.7	12.78	7.127	14.376	39.89	573.51	998.8	17.085	32.9	12.854
120	7A-14H-14A	CS	7.108	14.413	39.68	571.93	916.16	15.71	22.7	12.81	7.122	14.371	39.84	572.51	998.76	17.114	33.1	12.855
121	7A-14H-14A	CS	7.109	14.386	39.69	571.02	916.11	15.68	22.7	12.78	7.118	14.379	39.79	572.18	998	17.111	33.7	12.796
126	14A-14H-14A	CS	7.118	14.421	39.79	573.86	920.94	15.74	22.9	12.81	7.117	14.383	39.78	572.18	994.95	17.058	32.8	12.846
127	14A-14H-14A	CS	7.093	14.395	39.51	568.80	912.39	15.74	22.9	12.80	7.12	14.393	39.82	573.06	986.72	16.891	33.2	12.679
220	14A-14H-14A	CS	7.112	14.433	39.73	573.36	903.08	15.45	22.5	12.61	7.126	14.413	39.88	574.83	985.5	16.892	31.9	12.810
86	28A-14H-14A	CS	7.109	14.376	39.69	570.62	913.11	15.70	22.7	12.79	7.116	14.391	39.77	572.34	985.5	16.892	31.9	12.810
87	28A-14H-14A	CS	7.112	14.402	39.73	572.13	911.76	15.63	22.7	12.74	7.12	1						

Características de los especímenes ensayados para el suelo 2 (Resistencia en compresión simple, módulo de resiliencia y deformación permanente)

RESUMEN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL SUELO NATURAL

Muestra No.	Característica	Ensaye	Condiciones Iniciales								Condiciones finales							
			dpron, cm	hprom (cm)	Área (cm ²)	Vol (cm ³)	Peso (g)	γ_d (kN/m ³)	w (%)	γ_s (kN/m ³)	dpron, cm	hprom (cm)	Área (cm ²)	Vol (cm ³)	Peso (g)	γ_m (kN/m ³)	w (%)	γ_e (kN/m ³)
256	OA	Mr	7.062	14.402	39.17	564.12	899.18	15.64	46.9	10.65	7.073	14.408	39.29	566.11	898.46	15.569	46	10.667
257	OA	Mr	7.063	14.373	39.18	563.14	898.24	15.65	46.9	10.65	7.09	14.398	39.53	569.08	897.51	15.474	45.7	10.621
25	7A	Mr	7.066	14.411	39.21	565.11	875.7	15.20	45.4	10.46	7.098	14.391	39.57	569.45	877.6	15.119	44.9	10.433
26	7A	Mr	7.06	14.409	39.15	564.07	877.07	15.25	45.4	10.49	7.118	14.371	39.79	571.87	878.68	15.073	45	10.397
111	14A	Mr	7.066	14.421	39.21	565.50	884.71	15.35	44.9	10.59	7.119	14.459	39.80	575.53	882.81	15.048	44.2	10.439
112	14A	Mr	7.069	14.406	39.25	565.39	884.79	15.35	44.9	10.59	7.115	14.451	39.76	574.56	883.4	15.083	44.1	10.466
113	14A	Mr	7.056	14.402	39.10	563.16	888.35	15.47	45	10.67	7.119	14.435	39.80	574.57	887.89	15.159	44.3	10.508
19	28A	Mr	7.07	14.346	39.26	563.20	890.05	15.50	45	10.69	7.124	14.386	39.86	573.43	886.27	15.162	44.2	10.513
21	28A	Mr	7.043	14.351	38.96	559.10	884.2	15.51	45	10.70	7.114	14.368	39.75	571.10	880.61	15.126	43.5	10.540
22	28A	Mr	7.063	14.332	39.18	561.53	886.48	15.49	45	10.68	7.118	14.353	39.79	571.15	881.91	15.148	43.7	10.541
140	75	Mr	7.058	14.374	39.12	562.54	881.52	15.37	45	10.60	7.068	14.326	39.24	562.09	859.42	14.999	41.6	10.594
142	75	Mr	7.06	14.381	39.15	562.96	879.69	15.33	45	10.57	7.062	14.319	39.17	560.87	850.45	14.875	40.8	10.567
73	145	Mr	7.063	14.349	39.18	562.20	898.2	15.67	45.6	10.77	6.999	14.113	38.47	542.98	842.24	15.217	36.3	11.164
74	145	Mr	7.07	14.352	39.26	563.43	900.22	15.67	45.6	10.77	7.019	14.127	38.69	546.63	847.02	15.201	36.7	11.118
152	7A-14H-14A	Mr	7.069	14.34	39.25	562.80	883.64	15.40	45.5	10.59	7.184	14.514	40.53	588.33	938.23	15.645	53.1	10.216
153	7A-14H-14A	Mr	7.061	14.37	39.16	562.70	878.76	15.46	45.5	10.62	7.133	14.509	39.96	579.79	935.31	15.825	52.6	10.370
200	14A-14H-14A	Mr	7.06	14.382	39.15	563.01	886.72	15.45	45.5	10.62	7.107	14.406	39.67	571.49	884.99	15.191	45.7	10.430
201	14A-14H-14A	Mr	7.06	14.403	39.15	563.84	887.14	15.44	45.5	10.61	7.111	14.428	39.71	573.00	885.3	15.157	45.5	10.419
70	28A-14H-14A	Mr	7.07	14.393	39.26	565.04	895.3	15.54	45.6	10.68	7.155	14.52	40.21	583.82	939.37	15.784	36.3	11.577
71	28A-14H-14A	Mr	7.057	14.34	39.11	560.89	894.49	15.64	45.6	10.75	7.135	14.468	39.98	578.48	938.37	15.913	52.7	10.424
253	OA	CS	7.061	14.377	39.16	562.96	895.53	15.60	46.9	10.63	7.083	14.387	39.40	566.89	895.23	15.492	45.8	10.627
254	OA	CS	7.064	14.407	39.19	564.63	898.29	15.61	46.9	10.63	7.093	14.423	39.51	569.91	897.95	15.457	46.1	10.582
255	OA	CS	7.063	14.396	39.18	564.04	897.58	15.61	46.9	10.63	7.096	14.412	39.55	569.96	897.25	15.443	46	10.581
2	7A	CS	7.06	14.4	39.15	563.72	891.52	15.51	44.9	10.71	7.127	14.43	39.89	575.67	889.17	15.152	43.8	10.537
3	7A	CS	7.063	14.348	39.18	562.16	893.25	15.59	44.9	10.76	7.103	14.359	39.63	568.98	882.73	15.219	43.8	10.587
4	14A	CS	7.063	14.399	39.18	564.16	887.79	15.44	45.4	10.62	7.098	14.415	39.57	570.40	884.73	15.216	43.9	10.576
5	14A	CS	7.077	14.349	39.34	564.43	892.7	15.52	45.4	10.67	7.099	14.368	39.58	568.70	890.14	15.355	43.8	10.682
6	14A	CS	7.077	14.305	39.34	562.70	896.59	15.63	45.4	10.75	7.087	14.38	39.45	567.25	894.05	15.462	43.9	10.742
9	28A	CS	7.078	14.36	39.35	565.02	891.47	15.48	45.1	10.67	7.059	14.402	39.14	563.64	887.35	15.444	43.8	10.743
10	28A	CS	7.041	14.303	38.94	556.91	888.41	15.65	45.1	10.79	7.09	14.37	39.48	567.34	884.23	15.294	43.9	10.628
11	28A	CS	7.05	14.366	39.04	560.80	893.37	15.63	45.1	10.77	7.116	14.384	39.77	572.06	889.14	15.247	44	10.592
140	75	CS	7.058	14.378	39.12	562.54	881.52	15.37	45	10.60	7.068	14.326	39.24	562.09	859.42	14.999	41.6	10.594
141	75	CS	7.07	14.377	39.26	564.41	881.32	15.32	45	10.56	7.082	14.346	39.39	565.11	862.64	14.975	42.1	10.535
142	75	CS	7.06	14.381	39.15	562.96	879.69	15.33	45	10.57	7.062	14.319	39.17	560.87	850.45	14.875	40.8	10.567
72	145	CS	7.065	14.36	39.20	562.95	896.79	15.63	45.6	10.74	7.006	14.163	38.55	545.99	844.68	15.177	36.7	11.103
73	145	CS	7.063	14.349	39.18	562.20	898.2	15.67	45.6	10.77	6.999	14.113	38.47	542.98	842.24	15.217	36.3	11.164
81	285	CS	7.062	14.367	39.17	562.75	902.81	15.74	45.6	10.81	6.968	14.017	38.13	534.52	823.96	15.122	32.5	11.412
83	285	CS	7.068	14.355	39.24	563.23	899.73	15.68	45.6	10.77	6.938	14.005	38.71	529.47	813.01	15.063	24.1	12.140
149	285	CS	7.069	14.376	39.25	564.62	887.1	15.50	45.6	10.65	6.954	14.134	37.98	536.82	815.9	14.916	32.3	11.267
151	285	CS	7.068	14.371	39.24	563.86	903.2	15.71	45.6	10.79	6.963	14.123	38.08	537.79	832.89	15.193	33.4	11.387
75	7A-14H-14A	CS	7.06	14.342	39.15	561.45	887.2	15.42	44.7	10.66	7.157	14.509	40.23	583.70	932.75	15.676	53.5	10.213
76	7A-14H-14A	CS	7.057	14.347	39.11	561.17	880.84	15.40	44.7	10.64	7.169	14.506	40.37	585.54	935.12	15.667	54	10.177
77	7A-14H-14A	CS	7.057	14.338	39.11	560.82	893.76	15.63	44.7	10.81	7.178	14.505	40.47	586.97	939.97	15.710	52.7	10.286
78	7A-14H-14A	CS	7.051	14.35	39.05	560.33	897.07	15.71	44.7	10.86	7.165	14.535	40.32	586.08	946.51	15.844	53.4	10.330
52	14A-14H-14A	CS	7.064	14.354	39.19	562.56	882.4	15.39	45.3	10.59	7.193	14.529	40.64	590.40	934.15	15.522	53.6	10.103
54	14A-14H-14A	CS	7.065	14.372	39.20	563.42	885.05	15.41	45.3	10.61	7.19	14.554	40.60	590.92	941.33	15.627	27.3	12.273
55	14A-14H-14A	CS	7.067	14.361	39.22	563.31	886.03	15.43	45.3	10.62	7.186	14.53	40.56	589.28	940.31	15.653	53.7	10.182
28	28A-14H-14A	CS	7.076	14.35	39.32	564.31	878.68	15.28	45.5	10.50	7.154	14.486	40.20	582.29	934.38	15.742	54.4	10.197
29	28A-14H-14A	CS	7.075	14.35	39.31	564.15	879.82	15.30	45.5	10.52	7.166	14.495	40.33	584.61	934.54	15.682	54.3	10.161
258	OA	Dp	7.063	14.385	39.18	563.61	903.46	15.73	46.9	10.71	7.121	14.395	39.83	573.30	902.29	15.439	45.6	10.603
227	7A	Dp	7.061	14.377	39.16	562.98	892.68	15.56	44.9	10.74	7.113	14.404	39.74	572.37	891.56	15.281	44.8	10.551
242	7A	Dp	7.064	14.394	39.19	564.12	888.46	15.45	45	10.65	7.103	14.416	39.63	571.24	887.15	15.235	45.3	10.487
239	14A	Dp	7.06	14.384	39.15	563.09	886.31	15.44	45	10.65	7.108	14.405	39.68	571.61	884.47	15.179	36.3	11.140
251	14A	Dp	7.063	14.428	39.18	565.30	890.46	15.45	45.3	10.64	7.112							

Evaluación de las propiedades de suelos estabilizados con óxido de calcio. El caso de suelos de la Ciudad de México

RESUMEN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL SUELO CON ESTABILICAL

Muestra No.	Característica	Ensayo	Condiciones iniciales								Condiciones finales							
			dpron, cm	hprom (cm)	Área (cm ²)	Vol (cm ³)	Peso (g)	γ_m (kN/m ³)	w (%)	γ_d (kN/m ³)	dpron, cm	hprom (cm)	Área (cm ²)	Vol (cm ³)	Peso (g)	γ_m (kN/m ³)	w (%)	γ_d (kN/m ³)
244	0A	Mr	7.063	14.393	39.18	563.88	881.35	15.33	46.7	10.45	7.102	14.418	39.61	571.16	880.69	15.126	45.03	10.430
245	0A	Mr	7.063	14.395	39.18	564.00	885.32	15.40	46.7	10.50	7.106	14.414	39.66	571.64	884.94	15.186	45.14	10.463
16	7A	Mr	7.071	14.344	39.27	563.28	897.6	15.63	47	10.63	7.132	14.401	39.95	575.32	896.41	15.285	45.98	10.471
17	7A	Mr	7.066	14.375	39.21	563.70	900.6	15.67	47	10.66	7.108	14.42	39.68	572.20	898.99	15.412	46.45	10.524
23	14A	Mr	7.067	14.366	39.22	563.50	894.32	15.57	47.1	10.59	7.123	14.421	39.85	574.66	890.59	15.203	46.54	10.375
24	14A	Mr	7.069	14.369	39.25	563.94	888.1	15.45	47.1	10.51	7.11	14.424	39.70	572.69	885.55	15.161	46.07	10.385
25	14A	Mr	7.065	14.379	39.20	563.69	891.39	15.51	47.1	10.55	7.14	14.423	40.04	577.49	887.65	15.079	46.3	10.307
9	28A	Mr	7.076	14.375	39.32	565.29	897.98	15.58	47.1	10.59	7.119	14.397	39.80	573.06	892.53	15.279	46.04	10.462
27	28A	Mr	7.074	14.377	39.30	565.05	890.9	15.47	47.1	10.52	7.107	14.416	39.67	571.88	887.68	15.227	46.46	10.397
49	75	Mr	7.062	14.385	39.17	563.45	898.2	15.64	46.8	10.65	7.097	14.395	39.56	569.45	883.03	15.212	43.8	10.579
50	75	Mr	7.06	14.365	39.15	562.39	897.45	15.65	46.8	10.61	7.108	14.376	39.68	570.46	882.7	15.180	44.29	10.520
91	75	Mr	7.066	14.35	39.21	562.72	890.63	15.53	46.8	10.58	7.133	14.372	39.96	574.32	874.66	14.940	44.98	10.305
92	75	Mr	7.069	14.357	39.25	563.47	891.38	15.52	46.8	10.57	7.133	14.372	39.96	574.32	874.66	14.940	44.98	10.305
118	14S	Mr	7.065	14.388	39.20	564.05	889.24	15.47	46.3	10.57	7.08	14.377	39.37	566.01	852.49	14.775	42.49	10.369
119	14S	Mr	7.069	14.369	39.25	563.94	887.36	15.44	46.3	10.55	7.092	14.299	39.50	564.85	845.9	14.691	41.76	10.363
120	14S	Mr	7.061	14.37	39.16	562.70	885.3	15.43	46.3	10.55	7.062	14.323	39.17	561.09	735.74	12.861	40.65	9.147
194	28S	Mr	7.061	14.389	39.16	563.45	888.85	15.48	47.1	10.52	7.089	14.332	39.47	565.68	812.19	14.088	33.94	10.516
195	28S	Mr	7.062	14.375	39.17	563.06	891.29	15.53	47.1	10.56	7.064	14.336	39.19	561.85	818.42	14.290	35.22	10.568
196	28S	Mr	7.065	14.378	39.20	563.66	892.24	15.53	47.1	10.56	7.079	14.344	39.36	564.55	826.5	14.362	33.33	10.772
145	7A-14H-14A	Mr	7.058	14.37	39.12	562.23	879.67	15.35	46.4	10.48	7.122	14.434	39.84	575.02	914.29	15.598	53.35	10.172
159	7A-14H-14A	Mr	7.065	14.423	39.20	565.42	895.44	15.54	46.2	10.62	7.097	14.468	39.56	572.33	730.52	12.521	50.64	8.312
217	7A-14H-14A	Mr	7.061	14.377	39.16	562.98	879.66	15.33	47.1	10.42	7.109	14.424	39.69	572.52	913.95	15.661	54.49	10.137
135	14A-14H-14A	Mr	7.061	14.392	39.16	563.57	880.35	15.32	46.3	10.47	7.122	14.435	39.84	575.06	917.59	15.653	52.1	10.291
136	14A-14H-14A	Mr	7.069	14.37	39.25	563.98	880.12	15.31	46.3	10.46	7.114	14.418	39.75	573.09	917.6	15.707	52.46	10.303
137	14A-14H-14A	Mr	7.064	14.387	39.19	563.85	882.27	15.35	46.3	10.49	7.123	14.424	39.85	574.78	917.33	15.656	51.96	10.303
29	28A-14H-14A	Mr	7.072	14.405	39.28	565.83	887.1	15.38	46.6	10.49	7.135	14.455	39.98	577.96	921.52	15.641	52.32	10.269
30	28A-14H-14A	Mr	7.061	14.359	39.16	562.27	886.26	15.46	46.6	10.55	7.132	14.407	39.95	575.56	918.42	15.654	52.43	10.270
31	28A-14H-14A	Mr	7.071	14.366	39.27	564.14	884.5	15.38	46.6	10.49	7.14	14.408	40.04	576.89	919.09	15.629	51.86	10.292
32	28A-14H-14A	Mr	7.064	14.364	39.19	562.95	889.69	15.50	46.6	10.58	7.139	14.438	40.03	577.93	922.41	15.657	51.88	10.309
235	0A	CS	7.061	14.398	39.16	563.80	891.6	15.51	47.1	10.55	7.113	14.411	39.74	572.61	891.06	15.266	46.52	10.419
236	0A	CS	7.064	14.36	39.19	562.79	889.26	15.50	47.1	10.54	7.1	14.377	39.59	569.21	888.75	15.317	46.62	10.447
237	0A	CS	7.063	14.351	39.18	562.28	888.63	15.50	47.1	10.54	7.092	14.383	39.50	568.17	888.01	15.332	46.33	10.478
246	0A	CS	7.064	14.4	39.19	564.36	886.98	15.42	46.7	10.51	7.091	14.442	39.49	569.47	886.51	15.271	44.93	10.537
247	0A	CS	7.063	14.411	39.18	564.63	884.8	15.37	46.7	10.48	7.098	14.438	39.57	571.31	884.28	15.184	44.94	10.476
1	7A	CS	7.059	14.422	39.14	564.42	893.28	15.53	47.2	10.55	7.131	14.443	39.94	576.83	883.81	15.031	45.74	10.313
2	7A	CS	7.065	14.421	39.20	565.34	894.89	15.53	47.2	10.55	7.129	14.448	39.92	576.71	893.32	15.194	45.92	10.414
3	7A	CS	7.066	14.432	39.21	565.93	894.54	15.51	47.2	10.54	7.112	14.463	39.73	574.56	891.99	15.236	46.47	10.398
4	14A	CS	7.082	14.481	39.39	570.43	893.91	15.37	46.6	10.48	7.116	14.523	39.77	577.59	891.32	15.139	44.97	10.443
5	14A	CS	7.075	14.426	39.31	567.14	892.02	15.43	46.6	10.52	7.109	14.453	39.69	573.68	889.86	15.217	45.58	10.453
6	14A	CS	7.081	14.456	39.38	569.28	896.12	15.44	46.6	10.53	7.135	14.449	39.98	579.36	893.32	15.126	45.65	10.385
38	28A	CS	7.068	14.364	39.24	563.58	894.35	15.57	46.8	10.61	7.121	14.402	39.83	573.58	890.85	15.236	45.95	10.439
39	28A	CS	7.07	14.357	39.26	563.63	893.14	15.55	46.8	10.59	7.126	14.398	39.88	574.23	888.99	15.187	45.48	10.439
40	28A	CS	7.07	14.387	39.26	564.81	897.02	15.58	46.8	10.61	7.123	14.4	39.85	573.82	892.01	15.250	44.45	10.553
49	75	CS	7.062	14.385	39.17	563.45	898.2	15.64	46.8	10.65	7.097	14.395	39.56	569.45	883.03	15.212	43.8	10.579
50	75	CS	7.06	14.366	39.15	563.59	897.45	15.65	46.8	10.66	7.108	14.376	39.68	570.46	882.7	15.180	44.29	10.520
51	75	CS	7.065	14.373	39.20	563.46	895.16	15.59	46.8	10.62	7.094	14.367	39.53	567.86	887.59	15.334	43.84	10.660
118	14S	CS	7.065	14.388	39.20	564.05	889.24	15.47	46.3	10.57	7.08	14.377	39.37	566.00	852.49	14.775	42.49	10.369
119	14S	CS	7.069	14.369	39.25	563.94	887.36	15.44	46.3	10.55	7.092	14.299	39.50	564.85	845.9	14.691	41.76	10.363
120	14S	CS	7.061	14.37	39.16	562.70	885.3	15.43	46.3	10.55	7.062	14.323	39.17	561.02	835.74	14.614	40.65	10.390
188	28S	CS	7.06	14.372	39.15	562.62	887.23	15.47	46.2	10.58	7.083	14.33	39.40	564.64	822.64	14.292	37.39	10.403
122	7A-14H-14A	CS	7.066	14.383	39.21	564.01	890.77	15.49	47.1	10.53	7.11	14.445	39.70	573.52	922.46	15.779	53.31	10.292
123	7A-14H-14A	CS	7.028	14.386	39.78	558.08	892.01	15.68	47.1	10.66	7.14	14.442	40.04	577.37	922.98	15.682	52.99	10.251
124	7A-14H-14A	CS	7.066	14.405	39.21	564.87	892.59	15.50	47.1	10.54	7.123	14.449	39.85	575.78	923.07	15.727	53.15	10.269
125	7A-14H-14A	CS	7.069	14.39	39.25	564.76	8											

Características de los especímenes ensayados para el suelo 3 (Resistencia en compresión simple, módulo de resiliencia y deformación permanente)

RESUMEN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL SUELO NATURAL

Muestra No.	Característica	Ensaje	dprom, cm	hprom (cm)	Área (cm ²)	Vol (cm ³)	Peso (g)	γ_m (kN/m ³)	w (%)	γ_d (kN/m ³)	Condiciones iniciales				Condiciones finales			
											dprom, cm	hprom (cm)	Área (cm ²)	Vol (cm ³)	Peso (g)	γ_m (kN/m ³)	w (%)	γ_d (kN/m ³)
224	OA	Mr	7.064	14.365	39.19	562.99	799.51	13.93	69.2	8.23	7.064	14.423	39.19	565.26	799.2	13.870	69.8	8.170
225	OA	Mr	7.033	14.323	38.85	565.31	800.59	14.12	69.2	8.34	7.088	14.461	39.46	570.61	799.8	13.750	69.2	8.126
17	7A	Mr	7.081	14.354	39.38	565.27	813.39	14.12	70	8.31	7.096	14.366	39.55	568.14	810.72	13.999	69.1	8.278
18	7A	Mr	7.083	14.354	39.40	565.59	807.95	14.01	69.9	8.25	7.109	14.351	39.69	569.63	805.51	13.872	69.3	8.194
19	7A	Mr	7.088	14.354	39.46	566.38	814.1	14.10	69.9	8.30	7.089	14.369	39.47	567.14	811.34	14.034	69	8.307
21	14A	Mr	7.041	14.363	38.94	559.25	801.57	14.06	69.9	8.27	7.111	14.422	39.71	572.77	798.82	13.682	68.2	8.133
22	14A	Mr	7.054	14.366	39.08	561.43	798.39	13.95	69.4	8.23	7.107	14.426	39.67	572.28	795.37	13.634	67.9	8.121
23	14A	Mr	7.044	14.385	38.97	560.58	800.93	14.02	69.5	8.27	7.089	14.433	39.47	569.66	798.56	13.752	68.2	8.175
24	28A	Mr	7.053	14.367	39.07	561.31	803.64	14.05	70.1	8.26	7.098	14.389	39.57	569.37	798.24	13.753	69	8.140
26	28A	Mr	7.046	14.374	38.99	560.47	798.5	13.98	70.8	8.18	7.087	14.367	39.45	566.74	793.56	13.736	69.7	8.095
27	28A	Mr	7.017	14.335	38.67	554.36	798.7	14.13	70	8.31	7.087	14.402	39.45	568.12	794	13.710	69.5	8.087
81	75	Mr	7.05	14.386	39.04	561.58	802.63	14.02	69.4	8.28	7.07	14.332	39.26	562.65	780.48	13.608	65.3	8.232
83	75	Mr	7.045	14.339	38.98	560.94	805.16	14.08	69.4	8.31	7.058	14.333	39.12	560.78	782.05	13.681	65.1	8.286
243	145	Mr	7.038	14.432	38.90	561.46	801.45	14.00	70	8.24	6.987	14.082	38.34	539.93	706.53	12.837	49.7	8.578
244	145	Mr	7.041	14.346	38.94	558.59	806	14.16	70	8.33	6.982	14.163	38.29	542.26	721.37	13.050	51.9	8.589
180	285	Mr	7.024	14.324	38.75	555.04	809.26	14.30	69.9	8.42	7.044	14.149	38.97	551.39	802.7	10.723	26.7	8.465
181	285	Mr	7.032	14.33	38.84	556.54	808.66	14.25	69.9	8.39	7.002	14.157	38.51	545.14	611	10.995	28.8	8.539
99	7A-14H-14A	Mr	7.032	14.335	38.84	556.73	804.5	14.18	69.8	8.35	7.104	14.474	39.64	573.70	854.93	14.619	77	8.259
147	7A-14H-14A	Mr	7.035	14.387	39.04	561.62	801.45	14.00	69	8.29	7.155	14.579	40.21	586.19	862.56	14.435	77.8	8.117
148	7A-14H-14A	Mr	7.028	14.347	38.79	556.56	801.77	14.13	69.5	8.34	7.13	14.559	39.93	581.30	861	14.530	78.4	8.145
153	14A-14H-14A	Mr	7.065	14.345	39.20	562.36	809.7	14.12	69.5	8.33	7.111	14.472	39.71	574.75	859.86	14.676	77.8	8.255
235	14A-14H-14A	Mr	7.014	14.378	38.64	555.55	790.53	13.96	68.8	8.27	7.123	14.467	39.85	576.49	837.64	14.254	75.8	8.109
44	28A-14H-14A	Mr	7.07	14.33	39.26	562.57	806.44	14.06	69.4	8.30	7.109	14.435	39.69	572.96	850.83	14.568	76.5	8.252
45	28A-14H-14A	Mr	7.04	14.36	38.93	558.97	804.94	14.13	69.4	8.34	7.108	14.441	39.68	573.04	853.51	14.611	76.8	8.265
228	OA	CS	7.046	14.389	38.99	561.06	806.8	14.11	69.2	8.34	7.076	14.446	39.32	568.09	806.17	13.921	69.2	8.228
246	OA	CS	7.068	14.378	39.24	564.13	799.98	13.91	70	8.18	7.07	14.382	39.26	564.61	799.08	13.884	69.8	8.175
2	7A	CS	7.08	14.378	39.37	566.05	818.11	14.18	69.7	8.36	7.098	14.405	39.57	570.00	816.18	14.047	69.1	8.309
3	7A	CS	7.075	14.392	39.31	565.80	814.23	14.12	69.7	8.32	7.115	14.392	39.76	572.22	816.11	13.991	69.2	8.271
16	7A	CS	7.091	14.349	39.49	566.67	811.07	14.04	69.9	8.26	7.084	14.392	39.41	567.24	808.35	13.980	68.6	8.290
7	14A	CS	7.086	14.378	39.44	567.01	797.83	13.80	69.4	8.15	7.1	14.379	39.59	569.29	797.93	13.750	68.5	8.161
8	14A	CS	7.061	14.38	39.16	563.10	792.41	13.81	70.1	8.12	7.105	14.39	39.65	570.53	801.31	13.778	68.6	8.170
9	14A	CS	7.067	14.38	39.22	564.05	806.01	14.02	70	8.25	7.099	14.427	39.58	571.03	801.76	13.774	68.7	8.166
12	28A	CS	7.066	14.384	39.21	564.05	808	13.98	69.6	8.25	7.102	14.348	39.63	568.39	807.96	13.945	67.7	8.313
13	28A	CS	7.074	14.329	39.30	563.17	804.4	14.01	69.6	8.26	7.105	14.384	39.65	570.29	808.17	13.902	67.7	8.288
14	28A	CS	7.09	14.314	39.48	565.12	805.07	13.98	69.6	8.24	7.091	14.359	39.49	567.06	804.51	13.918	67.3	8.318
15	28A	CS	7.09	14.374	39.48	567.49	806.61	13.94	69.6	8.22	7.087	14.338	39.45	565.59	804.79	13.959	67.6	8.327
81	75	CS	7.044	14.382	38.97	560.47	810.75	14.19	69.9	8.35	7.069	14.314	39.25	561.78	785.1	13.710	64.2	8.351
82	75	CS	7.044	14.374	38.97	560.15	804.77	14.09	69.9	8.30	7.048	14.32	39.01	558.68	781.5	13.722	64.4	8.349
83	75	CS	7.066	14.374	38.97	563.66	808.99	14.08	69.9	8.29	7.058	14.306	39.12	559.72	785.5	13.767	63.8	8.406
119	145	CS	7.045	14.346	38.98	559.22	801.52	14.06	69.3	8.30	7.031	14.259	38.83	553.62	756.94	13.413	58.7	8.452
120	145	CS	7.043	14.364	38.96	559.61	801.74	14.05	69.3	8.30	7.043	14.254	38.96	555.32	762.72	13.474	60.6	8.391
157	145	CS	7.072	14.385	39.28	565.05	798.48	13.86	68.9	8.21	7.081	14.254	39.38	561.33	770.33	13.463	60.2	8.405
158	145	CS	7.043	14.386	38.96	560.46	801.6	14.03	68.9	8.31	7.042	14.292	38.99	556.64	772.27	13.610	61.6	8.423
159	145	CS	7.057	14.345	39.11	561.09	802.24	14.03	68.9	8.31	7.036	14.323	38.88	556.90	772.29	13.604	62.6	8.366
97	28S	CS	7.032	14.359	38.84	557.66	802.83	14.12	69.8	8.32	7.042	14.237	38.95	554.50	756.41	13.382	58.6	8.440
98	28S	CS	7.046	14.334	38.99	558.91	803.06	14.10	69.8	8.30	7.037	14.243	38.89	553.95	756.11	13.390	58.3	8.457
123	28S	CS	7.074	14.362	39.30	564.46	802.39	13.95	69.2	8.24	7.04	14.239	38.93	554.26	731.6	12.949	53.2	8.454
124	28S	CS	7.054	14.365	39.08	561.39	801.24	14.00	69.2	8.28	7.024	14.245	38.75	551.98	736.79	13.095	53.6	8.523
112	7A-14H-14A	CS	7.046	14.385	38.99	560.90	806.92	14.08	69.4	8.31	7.114	14.5	39.75	576.35	855.13	14.555	78.4	8.161
113	7A-14H-14A	CS	7.046	14.303	38.99	557.70	806.16	14.20	69.4	8.38	7.109	14.554	39.69	577.68	861.85	14.636	77.3	8.161
114	7A-14H-14A	CS	7.052	14.38	39.06	561.66	804.52	14.05	69.4	8.30	7.087	14.516	39.45	572.62	860.39	14.740	80	8.191
63	14A-14H-14A	CS	7.063	14.386	38.98	563.65	801.91	13.96	69.4	8.24	7.109	14.494	39.69	573.50	849.91	14.493	79.1	8.092
64	14A-14H-14A	CS	7.045	14.387	38.98	560.82	798.24	13.96	69.4	8.24	7.115	14.496	39.76	576.35	848.16	14.437	79.6	8.040
65	14A-14H-14A	CS	7.062	14.384	39.17	563.41	801.48	13.96	69.4	8.24	7.132	14.						

Evaluación de las propiedades de suelos estabilizados con óxido de calcio. El caso de suelos de la Ciudad de México

RESUMEN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL SUELO CON ESTABILICAL

Muestra No.	Característica	Ensayo	Condiciones iniciales							Condiciones finales								
			dpron, cm	hprom (cm)	Área (cm ²)	Vol (cm ³)	Peso (g)	γ_m (kN/m ³)	w (%)	γ_d (kN/m ³)	dpron, cm	hprom (cm)	Área (cm ²)	Vol (cm ³)	Peso (g)	γ_m (kN/m ³)	w (%)	γ_d (kN/m ³)
229	0A	Mr	7.056	14.359	39.10	561.48	801.4	14.00	69	8.29	7.104	14.404	39.64	570.93	801.39	13.770	68.91	8.152
230	0A	Mr	7.081	14.374	39.38	566.05	798.63	13.84	69	8.19	7.128	14.412	39.90	575.11	797.78	13.608	68.43	8.079
234	0A	Mr	7.012	14.379	38.62	555.27	790.89	13.97	68.8	8.28	7.104	14.411	39.64	571.20	790.31	13.573	68.83	8.039
254	0A	Mr	7.081	14.379	39.38	566.25	790.89	13.70	68.8	8.12	7.108	14.406	39.68	571.65	791.87	13.589	70.84	7.954
255	0A	Mr	7.051	14.366	39.05	560.96	790.11	13.82	68.1	8.22	7.118	14.393	39.79	572.74	786.58	13.473	71.01	7.878
259	0A	Mr	7.039	14.339	38.91	557.96	784.67	13.80	68.1	8.21	7.13	14.374	39.93	573.92	784.12	13.403	69.39	7.913
260	0A	Mr	7.032	14.359	38.84	557.66	786.13	13.83	68.8	8.19	7.117	14.375	39.78	571.88	782.22	13.419	69.66	7.909
84	7A	Mr	7.039	14.395	38.91	560.18	792.35	13.88	68.7	8.23	7.098	14.412	39.57	570.28	798.8	13.741	68.84	8.139
85	7A	Mr	7.051	14.358	39.05	560.64	793.34	13.88	68.7	8.23	7.091	14.381	39.49	567.93	799.24	13.805	69.01	8.168
23	14A	Mr	7.061	14.38	39.16	563.10	801.27	13.96	68	8.31	7.107	14.469	39.67	573.99	798.42	13.646	65.85	8.228
24	14A	Mr	7.085	14.382	39.42	567.01	801.93	13.87	68	8.26	7.114	14.408	39.75	572.69	799.28	13.691	65.65	8.265
25	14A	Mr	7.073	14.381	39.29	565.05	796.61	13.83	68	8.23	7.122	14.405	39.84	573.86	793.75	13.569	66.2	8.164
16	28A	Mr	7.073	14.38	39.29	565.01	801.57	13.92	68.6	8.25	7.115	14.421	39.76	573.37	811.07	13.877	66.21	8.349
17	28A	Mr	7.077	14.354	39.34	564.63	802.49	13.94	68.6	8.27	7.125	14.379	39.87	573.31	797.03	13.638	66.16	8.208
18	28A	Mr	7.093	14.341	39.51	566.67	803.15	13.90	68.6	8.25	7.106	14.383	39.66	570.41	802.63	13.804	66.61	8.285
19	28A	Mr	7.047	14.357	39.00	559.97	795.1	13.93	68.6	8.26	7.085	14.396	39.42	567.56	795.16	13.682	65.83	8.251
35	75	Mr	7.052	14.347	39.06	560.37	806.65	14.12	69.7	8.32	7.083	14.355	39.40	565.66	769.82	13.351	61.87	8.248
36	75	Mr	7.06	14.359	39.15	562.11	809.4	14.13	69.7	8.32	7.105	14.384	39.65	570.29	775.11	13.333	64.01	8.129
32	145	Mr	7.038	14.358	38.80	558.58	805.79	14.15	69.7	8.34	7.105	14.335	39.65	568.35	755.9	13.047	59.49	8.181
33	145	Mr	7.022	14.358	38.73	558.04	806.67	14.23	69.7	8.38	7.082	14.348	39.39	565.19	760.69	13.203	59.74	8.265
27	28S	Mr	7.061	14.371	39.16	562.74	797.41	13.90	68.3	8.26	7.105	14.368	39.65	569.66	715.18	12.316	49.33	8.247
28	28S	Mr	7.063	14.343	39.18	561.97	799.38	13.95	68.3	8.29	7.099	14.328	39.58	567.11	721.96	12.489	53.42	8.140
200	7A-14H-14A	Mr	7.059	14.309	39.14	560.00	796.95	13.96	68.5	8.29	7.098	14.391	39.57	569.45	837.42	14.426	76.11	8.192
201	7A-14H-14A	Mr	7.047	14.33	39.00	558.91	795.6	13.96	68.5	8.29	7.116	14.369	39.77	571.46	838.34	14.391	75.11	8.218
173	14A-14H-14A	Mr	7.057	14.31	39.11	559.72	781.22	13.69	68.2	8.14	7.101	14.383	39.60	569.61	839.35	14.455	77.31	8.153
175	147A-14H-14A	Mr	7.049	14.356	39.03	560.32	785.19	13.75	68.2	8.17	7.102	14.368	39.61	569.18	831.34	14.326	77.26	8.083
183	14A-14H-14A	Mr	7.065	14.34	39.20	562.17	794.2	13.86	68.4	8.23	7.115	14.382	39.76	571.82	834.04	14.309	76.93	8.087
197	14A-14H-14A	Mr	7.047	14.337	39.00	559.19	797.02	13.98	69	8.27	7.126	14.358	39.88	572.63	836.37	14.328	76.29	8.128
12	28A-14H-14A	Mr	7.065	14.337	39.20	562.05	789.49	13.78	68	8.20	7.118	14.349	39.79	570.99	830.83	14.274	74.7	8.171
13	28A-14H-14A	Mr	7.062	14.325	39.17	561.10	788.46	13.79	68	8.20	7.103	14.346	39.63	568.47	831.7	14.353	75.67	8.170
116	28A-14H-14A	Mr	7.085	14.352	39.42	565.83	794.14	13.77	69	8.15	7.085	14.375	39.42	566.73	837.62	14.499	76.29	8.225
231	0A	CS	7.061	14.428	39.16	564.98	799.8	13.89	68	8.22	7.092	14.453	39.50	570.93	800.89	13.761	68.54	8.165
232	0A	CS	7.06	14.357	39.15	562.04	798.45	13.94	69	8.25	7.111	14.381	39.71	571.14	797.82	13.704	68.86	8.115
233	0A	CS	7.068	14.333	39.24	562.37	798.97	13.94	69	8.25	7.095	14.384	39.54	568.69	798.62	13.776	68.85	8.159
1	7A	CS	7.064	14.335	39.19	561.81	802.88	14.02	69.7	8.31	7.083	14.353	39.40	565.55	793.95	13.772	67.01	8.246
2	7A	CS	7.084	14.386	39.41	567.01	803.35	13.90	68.7	8.24	7.083	14.362	39.40	565.90	793.35	13.754	67.19	8.226
3	7A	CS	7.082	14.396	39.39	567.08	802.88	13.89	68.7	8.23	7.08	14.417	39.37	567.59	802.88	13.877	67.49	8.285
9	14A	CS	7.072	14.323	39.28	562.61	793.95	13.84	68.7	8.21	7.107	14.367	39.67	569.94	788.26	13.568	65.59	8.194
10	14A	CS	7.06	14.359	39.15	561.11	788.57	13.76	68.1	8.19	7.107	14.367	39.67	569.94	788.26	13.568	65.59	8.194
11	14A	CS	7.064	14.359	39.19	562.75	785.75	13.70	68.1	8.15	7.097	14.379	39.56	568.81	782.31	13.492	65.64	8.145
5	28A	CS	7.041	14.35	38.94	558.74	793.41	13.93	68.4	8.27	7.123	14.407	39.85	574.10	788.48	13.473	66.44	8.095
6	28A	CS	7.073	14.363	39.29	564.34	793.41	13.79	68.4	8.19	7.107	14.444	39.67	573.00	791.82	13.556	66.23	8.155
7	28A	CS	7.072	14.329	39.28	562.85	800.95	13.96	68.4	8.29	7.09	14.393	39.48	568.24	795	13.725	66.04	8.266
8	28A	CS	7.089	14.316	39.47	565.04	801.58	13.92	68.4	8.27	7.121	14.398	39.83	573.42	795.71	13.613	66.4	8.181
37	75	CS	7.07	14.346	39.26	563.20	799.9	13.93	68.8	8.25	7.106	14.349	39.66	569.07	776.88	13.392	62.4	8.247
38	75	CS	7.065	14.369	39.20	563.30	794.5	13.84	68.8	8.20	7.101	14.38	39.60	569.49	769.09	13.246	61.63	8.197
39	75	CS	7.044	14.362	38.87	559.69	796.4	13.96	68.8	8.27	7.111	14.362	39.71	570.38	774.02	13.312	61.4	8.248
30	145	CS	7.068	14.376	39.24	564.06	806.48	14.03	69.7	8.26	7.099	14.346	39.58	567.83	751.81	12.989	58.15	8.213
32	145	CS	7.038	14.358	38.90	558.58	795.79	13.45	69.7	8.34	7.105	14.335	39.65	568.35	755.9	13.047	59.49	8.181
33	145	CS	7.052	14.343	39.06	560.22	794.34	13.91	68.6	8.25	7.082	14.348	39.39	565.19	760.69	13.203	59.74	8.265
34	145	CS	7.063	14.343	39.18	561.97	797.45	13.92	68.6	8.26	7.097	14.341	39.56	567.31	765.89	13.244	59.32	8.313
102	145	CS	7.067	14.362	39.16	562.35	790.79	13.91	69.8	8.23	7.102	14.369	39.61	569.22	830.73	14.317	75.7	8.185
69	7A-14H-14A	CS	7.061	14.357	39.11	560.97	789.42	13.80	69.8	8.13	7.089	14.363	39.47	566.90	751.65	13.007	58.88	8.187
90	28S	CS	7.042	14.362	38.95	559.37	797.6	13.99	69.2	8.27	7.074	14.35	39.30	563.99	719.77	12.520	50.01	8.346
91	28S	CS	7.045	14.341														



COMUNICACIONES

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES



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

publicaciones@imt.mx

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